

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur* VIDENSKAB

MARSVIN MORSEKODER

Partikelterapi mod kræft
Videnskabelig usikkerhed i kemi
Varm sommer med uventede konsekvenser
for vandmiljøet

NR.6 - 2018 DECEMBER: 50 KR.

Har vi de nødvendige råstoffer til en grøn omstilling?

I omstillingen fra fossilt brændsel til grøn energi er det vigtigt, at vi bliver uafhængige af specifikke råstoffer som litium. Derfor skal vi forske bredt og have fokus på genbrug.

Det står klart for de fleste, at mængden af olie på planeten er begrænset, og at fordelingen af olie ikke har været lige heldig for alle lande. På nuværende tidspunkt vurderes det, at Jordens oliereserver vil række til cirka 50 års forbrug. Men lidt finurligt er det, at prognoserne i 1970'erne også forudsagde, at der kun var 50 års forbrug af olie tilbage. At vi trods øget olieforbrug har kunnet holde trit med efterspørgslen skyldes nye oliefund og bedre udnyttelse af eksisterende olieforekomster. Men det kan ikke fortsætte i det uendelige, så vi har brug for at finde alternativer – uagtet, at der også andre gode grunde til at slippe ud af vores olieafhængighed.

Det kan for eksempel være sol- og vindenergi. Selvom der her er tale om vedvarende energikilder, kan omstillingen til at udnytte sol og vind også støde på udfordringer. Visse kritiske råstoffer er altafgørende for, om grønteknologi kan erstatte olie. Hvilke udfordringer giver det for eksempel, at der er ved at opstå et enormt behov for batterier til de elbiler, der anses som en væsentlig del af fremtidens olieløse samfund?

Får vi litium-mangel?

De mest brugte batterier i dag er baseret på litium, såkaldte Li-ion batterier. Navnet kunne antyde, at hovedbestanddelen af batteriet er litium, men dette er dog ikke korrekt. Litium er den aktive del, som bevæger sig i batteriet. En bedre elbil har et batteri med en vægt på cirka 450 kg, og heraf er 60 kg litium, hvilket svarer til litiumindholdet i mere end 10.000 smartphones. Den årlige produktion af litium svarer til 43 millioner kg, hvilket med nutidens batteriteknologi vil svare til rundt regnet 720.000 biler om året. Dette antal svarer til bare en hundrededel af antallet af personbiler produceret på årsbasis på verdensplan (verdens bilproduktion var i



Mogens Christensen er lektor ved Institut for Kemi og Interdisciplinary Nanoscience Center, Aarhus Universitet. Han forsker i magnetiske materialer, som hovedsageligt ikke er sjældne jordartsmetaller. mch@chem.au.dk

2017 på 73,5 millioner). Det vil naturligvis være muligt at øge produktionen af litium fra de kendte reserver, som udgør cirka 16 milliarder kg, men med omkring 1 milliard biler i verden, så vil der kun være omkring 16 kg litium per bil. Ligesom olien er det dog sandsynligt, at det med tiden vil være muligt at finde mere litium.

Litium er ikke det eneste grundstof, som er problematisk i forbindelse med batterier. Også kobolt er en begrænset ressource, som rangerer højt på listen over kritiske råstoffer, som årligt opdateres af EU. Kobolt er også forbundet med andre problematikker, eftersom mere end 50 % af verdens samlede koboltproduktion foregår i den Demokratiske Republik Congo. Dette område har tidligere været konfliktzone på grund af grundstofferne tantal og niobium, som bruges i blandt andet mobiltelefoner. Tantal og niobium var medvirkende til at opretholde en af de blodigste borgerkrige på det afrikanske kontinent i årene fra 1998 til 2014.

Vigtigt at have flere teknologier i spil

For at undgå at løbe ind i den samme afhængighedsproblematik med litium som med olie er det derfor uhyre vigtigt at forske i brugen af alternative grundstoffer til fremstilling af batterier. For eksempel er det muligt at bruge nikkel eller mangan i stedet for kobolt i batteriets katode, og disse grundstoffer er langt mere almindelige i jordskorpen. Alternativt til litium er det muligt at bruge natrium, i hvert fald til stationære batterier. Det er også væsentligt ikke at begrænse forskningen til kun én teknologi, men at kigge på række forskellige muligheder. Lagring af energi på gasform, for eksempel som brint, metan eller blot trykluft, er gode alternativer til batterier. De vil dog være lidt langsomme, når det gælder om at omdanne den oplagrede energi til strøm. Denne begrænsning gælder også for energilagring i form af varmt, smeltet salt.

Endelig bør svinghjul også nævnes i forbindelse med energilagring; her fastholdes energien ved hjælp af kinetisk energi, som er bundet på stedet i form af en roterende masse. Svinghjulet udmærker sig i forhold til batteriet ved ikke at blive slidt over tid, hvor det er alment kendt, at et batteri bliver dårligere og dårligere, hvilket ofte medfører at vi til sidst udskifter hele vores mobiltelefon.

I omstillingen til et energisystem, der ikke er baseret på olie, er det altså nødvendigt at have flere potentielle teknologier i spil. I den proces er en genbrugstankegang også meget vigtig. For eksempel bliver litiummet i det slidte batteri i mobiltelefonen jo ikke "brændt af" ligesom olie, men kan genudvindes fra det brugte batteri og indgå i nye batterier. Jo mere, vi kan genbruge, des mindre har vi behov for at udvinde nye råstoffer. ■

indhold



De fleste hvaler kommunikerer med hinanden ved hjælp af lavfrekvent lyd. Men ikke marsvinet, der udelukkende producerer signaler af høj frekvens. Sandsynligvis skyldes det, at de derved kan undgå at blive opdaget og spist af spækhuggere.

8



Dansk forskning i overgangsmetalkatalysatorer skal være med til at skabe de værktøjer, som fremtidens medicinalindustri, plastindustri og mange andre industrier skal bruge for at lave bedre produkter til en verden med vokseværk.

28

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 Kort Nyt
- 8 Marsvin morsekoder for at undgå spækhuggere
- 13 Sådan gør frøen sit spyt til lim
- 14 Partikelterapi
- 18 Kræftceller overlever ved at bøje cellemembranen
- 22 Varm sommer med uventede konsekvenser for vandmiljøet
- 28 Katalysatorer: Sådan skaber forskere fremtidens kemiske værktøjer



Danmarks første facilitet til behandling af kræftpatienter med partikelterapi åbner snart. Strålebehandling med partikler kan være et alternativ til traditionel strålebehandling med røntgenstråler, men det er også en teknologisk udfordrende disciplin.

14



Kemiske forbindelser, som findes i fødevarer eller produkter, vi bruger til daglig, kan indebære risici for sundhed og miljø. Men hvordan afgør man, hvad der er farligt og bør forbydes og reguleres? Og kan dette afgøres rent videnskabeligt?

38

PERSPEKTIV - DEBAT

- 2 SYNSPUNKT: Har vi de nødvendige råstoffer til en grøn omstilling?
- 35 HPV-vaccinen: En blanding af fakta og følelse
- 38 Videnskabelig usikkerhed i kemi: Hvad er farligt?
- 44 BAGSIDEN: Kloakrobotterne kommer

AKTUEL NATURVIDENSKAB

Udgiver

Aarhus Universitet, Science & Technology, i samarbejde med:

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

Ansvarshavende

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

Redaktion

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

E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk



SPONSOR-
ABONNENTER



Skik på fremtidens informationsstrømme

Mængden af data vokser disse år eksplosivt. På tre timer genererer vi flere data, end der eksisterede i 2003.

Katja Hose, der er nyudnævnt professor i datalogi, har en mission. Hun vil redde menneskeheden fra at blive skibbrudne på fremtidens uendelige informationshav – eller med andre ord sørge for, at vi får lettere adgang til nøjagtige og pålidelige informationer.

Verden oversvømmes af milliarder af dataelementer, som er forbundet via et stadigt voksende antal links. Den almindeligt kendte del er naturligvis internettet med dets mange websites, som brugerne tilgår for at finde informationer om det meste. Men internettet er ikke kun en samling websites.

»Internettet giver adgang til enorme mængder åbne data. En meget stor mængde af de data bliver aldrig udforsket og dermed heller ikke udnyttet. Det er u hensigtsmæssigt, og det vil jeg ændre på med min forskning«, siger hun.

Der findes nemlig en pendant til det bredt



Katja Hose er nyudnævnt professor på Aalborg Universitet takket være en bevilling fra Poul Due Jensens Fond/Grundfos Fonden. Foto: Lars Horn/Baghuset

kendte internet: det semantiske web. I modsætning til det almindelige internet med dets www-sider giver det semantiske web adgang til en særlig type åbne data, som stammer fra forskellige datakilder og skal læses af maskiner. Og målet er, at de maskiner med tiden skal blive i stand til automatisk at

behandle, fortolke og konkludere ud fra de tilgængelige informationer.

»Der er dog stadig et langt stykke vej, til vi har nået det mål«, påpeger Katja Hose, hvis forskning ligger i krydsfeltet mellem big data, maskinlæring og semantiske teknologier.

Et intelligent semantisk web vil bl.a. kunne bruges til at søge informationer og til at tjekke facts. Det kan eksempelvis bruges af journalister og forskere. Det vil alt andet lige være lettere og mere pålideligt at modtage hårde facts fra det intelligente web i stedet for, at man som bruger skal spille tid på at læse lange artikler fra det almindelige internet for at uddrage de ønskede fakta.

»Jeg skal bare vide, hvor Obama er født. Lad være med at overdynde mig med tekst, bare giv mig det rigtige svar«, siger Katja Hose som et eksempel med henvisning til, at der tidligere har været diskussioner om, hvorvidt han er født på Hawaii eller i Kenya.

Sanne Holm Nielsen, Aalborg Universitet.

To millioner sommerfugle skal på nettet

Statens Naturhistoriske Museum på Københavns Universitet er hjemsted for to millioner sommerfugle – indsamlet fra hele kloden gennem de seneste 250 år. Og hver sommerfugl fortæller sin lille historie om naturens tilstand på daværende tidspunkt.

Nu skal sommerfuglesamlingen digitaliseres, så den vigtige viden kan komme forskere og andre interesserede til nytte. Og det skal ske med hjælp fra blandt andet frivillige sommerfugle-entusiaster. I dag er under to procent af samlingerne på Statens Naturhistoriske Museum digitaliseret og dermed gjort bredt tilgængeligt for offentligheden. Digitaliseringen af hele sommerfuglesamlingen er en fortsættelse af dette vigtige arbejde – og sommerfuglene er ikke tilfældigt valgt, siger lektor Thomas Pape fra Statens Naturhistoriske Museum.



Foto: Birgitte Rubæk, Statens Naturhistoriske Museum.

»Vi digitaliserer sommerfuglesamlingen først, fordi sommerfugle er følsomme over for selv små miljøforandringer. De kan ligesom et barometer fortælle os om forandringer i naturen, for eksempel hvis bestandene pludselig forsvinder. Der ligger derfor en masse information gemt i de her små dyr, som blandt andet kan give et fingerpeg om, hvordan vores natur vil reagere på fremtidens klimaforandringer«.

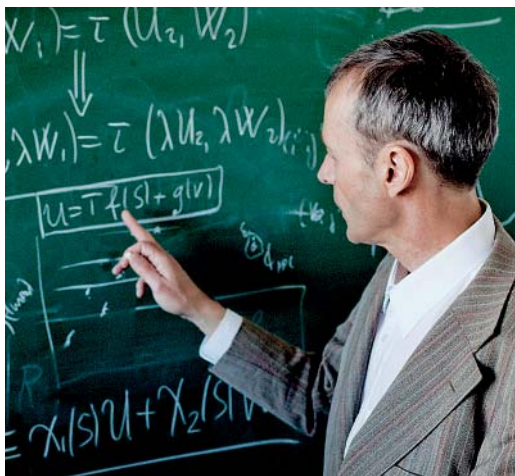
Museet har indtil videre affotograferet 4.000 eksemplarer fra sommerfuglesamlingen, som er lagt ud på hjemmesiden Zooniverse. Hver sommerfugl er knyttet til nogle få, men vitale oplysninger om fundet, skrevet på bitte små etiketter. Disse oplysninger findes endnu kun på etiketterne, men museet ønsker at digitalisere dem og gøre dem frit tilgængelige via internettet. Statens Naturhistoriske Museum søger derfor nu frivillige, som skal hjælpe med at afkode etiketterne og skrive oplysningerne ind på hjemmesiden. Det kaldes *crowdsourcing*, når man beder et netværk af mennesker om hjælp til en særlig opgave. I dette tilfælde består opgaven i at få borgerne i Danmark til at afkode de oplysninger, der står på de små etiketter.

Michael Skov Jensen, Københavns Universitet.
www.zooniverse.org/projects/adJordan/danish-butterflies-and-moths-2020-challenge

Klimavenlig asfalt reducerer rullemodstand

Ny klimavenlig asfalt mindsker rullemodstanden mellem dæk og asfalt og forventes at reducere vejstøj og brændstofforbrug, så udledningen af CO₂ falder. Den klimavenlige asfalt er siden 2011 udviklet i to forskningsprojekter ledet af Jeppe Dyre, professor i fysik på Roskilde Universitet. Projekterne, som var finansierede henholdsvis af det Strategiske Forskningsråd og Innovationsfonden, involverede en række partnere, fx Vejdirektoratet, entreprenørvirksomheden NCC, det franske statslige vejforskningslaboratorium og det tyske dækfirma Continental. Den specifikke asfalt er udviklet af Vejdirektoratet og NCC, mens RUC har stået for den mere grundforskningsmæssige del af projektet.

Forskerne har undersøgt hvilke parametre, der bestemmer en vejs rullemodstand. Formålet er ud fra målinger af vejens tekstur at kunne opstille en matematisk model for rullemodstand, så man fremover kan mindske netop dette forhold. På RUC har man arbejdet med molekyle-dynamiske beregninger baserede på en numerisk løsning af Newtons bevægelsesligning, dvs. et stort sæt koblede differentialligninger – typisk i størrelsesordenen 6.000-30.000 styk. Seje væsker som fx



Professor Jeppe Dyre, RUC. Foto: Uffe Weng

bitumen (den sorte klistrede del af asfalten) er karakteriserede ved en meget langsom dynamik. Forskergruppen på RUC har opstillet modeller for netop disse væsker, som studeres ved computer-simuleringer af molekyledynamik. For at kunne teste teorierne er det nødvendigt at ramme den interessante dynamik, og derfor skal simuleringerne foretages over en (for molekyledynamik) enormt lang tidsskala.

»Det er forbavsende svært at måle rullemodstand pålideligt på vejene. På Roskilde Universitet fortsætter arbejdet derfor nu med

at teste vores matematiske modeller for rullemodstand i et specialbygget laboratorium, der, så vidt vi ved, er det eneste laboratorium i verden specifikt designet til formålet«, fortæller professor Jeppe Dyre.

Vejdirektoratet har i løbet af 2018 udlagt og testet den klimavenlige asfalt på i alt 50 km vejstrækninger flere steder i landet for at undersøge holdbarheden, slidstyrken, køreegenskaberne og selvfølgelig rullemodstanden. Hvis forventningerne holder, vil regeringen fra 2020 lægge klimavenlig asfalt på alle statsveje i takt med, at belægningen skal fornyes. Den udvikling glæder Jeppe Dyre:

»I hvert af årene 2012, 2013 og 2014 udlagde vi omkring 1 km test-asfalt. I år er det 50 km, og nu er planen, at alle de 3800 km statsveje skal have "vores" asfalt. Jeg må sige, det er gået meget hurtigere end forventet«.

Den særlige asfalt vil også økonomisk være en stor gevinst for borgere og virksomheder, som tilsammen forventes at spare ca. 40 mio. kr. i brændstof for hver million kroner, der investeres i den nye belægning.

Af RUC Kommunikation & Presse

Formidlingshæder til klimaforsker

Hvis man er interesseret i, hvad klimaforskere har at sige om udviklingen af klimaet og hvilke udfordringer, det stiller menneskeheden overfor, er man uden tvivl stødt på navnet Sebastian Mernild. Han er professor i klimaforandringer og glaciologi og til daglig administrerende direktør for Nansen Centeret i Bergen i Norge, og så er han en af hovedforfatterne på den næste rapport fra FN's klimapanel IPCC. Ikke mindst er han en flittig formidler af de forskningsresultater, han selv og andre klimaforskere er nået frem til – blandt andet her i bladet, hvor han gennem tiden har bidraget til flere end 20 artikler.

Denne engagerede indsats på tv, i radioprogrammer, foredrag og populærvidenskabe-



Foto: Edward Hanna, Lincoln University, UK.

lige artikler er han for nylig blevet hædret for ved at modtage Rosenkjærprisen, som uddeles af DR. Prisen er opkaldt efter magister Jens Rosenkjær, der var foredragschef i Statsradiofonien fra 1937 til 1953 og uddeles til en person, "der har vist evner for at gøre et vanskeligt stof tilgængeligt for et bredere publikum i en forståelig og levende form". Sidst en forsker indenfor naturvidenskab fik prisen var i 2013, hvor den blev givet til geolog Minik Rosing.

Med Rosenkjærprisen følger 50.000 kroner, og samtidig kommer Sebastian H. Mernild efter planen til at medvirke i P1-programmer om klimaet i 2019. Og mon ikke også, at der vil komme flere artikler fra hans hånd i Aktuel Naturvidenskab?

CRK, Kilde: dr.dk

Isen gemte på kæmpekrater

I gården på Geologisk Museum i København – lige uden for Center for GeoGenetik's vinduer – står der en 20 tons tung jernmeteorit fundet i Nordgrønland. Men den er i småtingsafdelingen i forhold til, hvad forskere på selvsamme center i samarbejde med et internationalt team nu har fundet spor af i det nordlige Grønland.

Der er intet tilbage af meteoren, men nedslaget fra den dannede et gigantisk krater på 31 km i diameter, begravet under indlandsisen. Det er første gang, at et krater af den størrelse er fundet under en af Jordens iskapper. Siden strukturen blev opdaget i 2015 har forskerne arbejdet på at bekræfte opdagelsen, som nu er publiceret i det internationale tidsskrift *Science Advances*. Hovedmanden bag det opsigtsvækkende fund, som er gået verden rundt, er professor Kurt H. Kjær fra Center for Geogenetik:

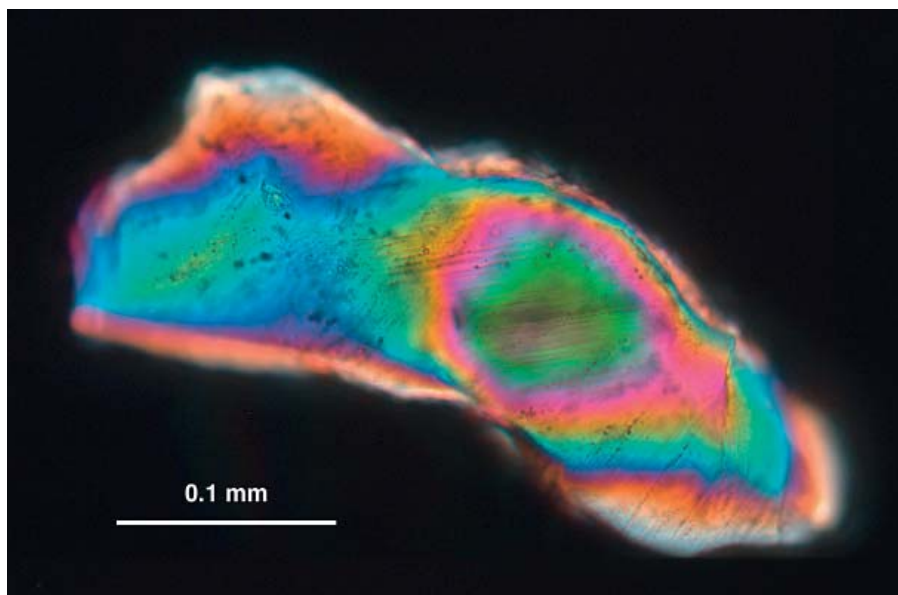
»Krateret er usædvanligt velbevaret. Det er overraskende, fordi gletsjer-is er en utrolig effektiv slibemaskine, som hurtigt vil være i stand til at fjerne sporene fra nedslaget. Det betyder, at krateret må være ungt set med geologiske øjne. Indtil videre har det ikke været muligt at datere krateret, men meget tyder på, at det er yngre end tre millioner år, og muligvis blev det dannet så sent som for 12.000 år siden ved afslutningen af den seneste istid«.

På størrelse med Bornholm

Meteorokrateret er på størrelse med Bornholm. Det placerer krateret blandt de 25 største i hele verden. Beregninger viser, at der skal en cirka 1 km stor jernmeteor til for at lave et krater med disse dimensioner. Da



Hiawatha meteorokrateret findes i Inglefield Land, Nordvest Grønland. Grafik: Statens Naturhistoriske Museum.



Det afgørende bevis: Sandkorn af kvarts fra Hiawatha-meteorokrateret gennemsat af choklameller. Choklamellerne ses som tætliggende striber i flere retninger. De er dannet ved ekstrem sammentrykning efterfulgt af ekspansion og varmeudvikling i det første sekund af kraterdannelsen og er et sikkert bevis for chokpåvirkning ved meteoritnedslag. Kvarts er farveløst – farverne skyldes optiske filtre i mikroskopet. Foto: Statens Naturhistoriske Museum.

meteoren ramte Nordvestgrønland lavede den et syv km dybt hul i jordskorpen, og i minutterne efter nedslaget kollapsede det dybe krater, og derefter opstod det krater, vi ser i dag i landskabet.

Krateret blev opdaget, da forskerne i december 2015 nærstuderede et helt nyt kort over topografien under Grønlands indlandsis. De bemærkede en gigantisk, men hidtil upåagtet cirkulær fordybning under Hiawatha-gletscheren ved indlandsisens rand i Nordgrønland.

Mistanken om et kæmpekrater fra en stor meteor blev bestyrket, da forskerholdet i maj 2016 sendte et tysk forskningsfly fra Alfred Wegener Institutet til at overflyve Hiawatha-gletscheren med en ny kraftig radar for at kortlægge kraterbunden og den overliggende is. Og i sommeren 2016 og 2017 besøgte forskerholdet igen Hiawatha-gletscheren. Denne gang på landjorden for at kortlægge tektoniske strukturer i geologien ud for gletscherfoden og for at indsamle prøver af de sedimentter og aflejringer, som bliver vasket ud fra kraterets bund via en smeltevandsskud

» En del af de udvaskede mineralkorn inde-

holder chok-lameller dannet ved det voldsomme nedslag, og det er et helt afgørende bevis for, at fordybning under Hiawatha-gletscheren er et meteorokrater,« siger lektor Nicolaj K. Larsen, der er lektor ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet og adjungeret professor ved Center for Geogenetik.

Nedslagets konsekvenser for livet

Fra tidligere studier ved man, at store meteornedslag i Jordens historie har haft store konsekvenser for både klimaet og livet på Jorden. Det er derfor meget nærlæggende at spørge, hvilke konsekvenser meteornedslaget ved Hiawatha-gletscheren havde for livet og klimaet dengang.

»Det næste trin i vores undersøgelse bliver at tidsfæste alderen på krateret. Det bliver en udfordring, da det vil kræve en bestemt type materiale fra bunden af strukturen. Men det er helt afgørende, hvis vi skal forstå betydningen af Hiawatha-meteoren i relation til klimaet og livet på Jorden,« konkluderer professor Kurt H. Kjær.

Af Martin Leonard Bertelsen, Statens Naturhistoriske Museum, Københavns Universitet.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aar8173>

Havets marsvin har fået en ny fjende: Gråsælen

Biologer har længe haft mistanken, men nu er der DNA-bevis: Gråsæler jager, dræber og æder marsvin.

For 10-15 år siden var der ingen gråsæler i Danmark, men i dag er antallet nærmest eksploderet. SDU-biolog og ekspert i havpattedyr, Kirstin Anderson Hansen fra SDUs Marine Biological Research Center, følger nøje udviklingen.

I takt med deres store udbredelse har hun og kolleger observeret flere og flere døde marsvin, der med al tydelighed har været udsat for angreb.

»Hidtil har vi ikke kunne sige med sikkerhed, hvad der var sket med disse marsvin. Måske de døde til havs og skyllede op på en strand, hvor ådselsædere, fx ræve, har ædt af dem. Men vi har også længe mistænkt, at de er blevet dræbt og ædt af gråsæler. Nu har vi for første gang foretaget DNA-analyser af et marsvinekadaver og kan med sikkerhed sige, at en gråsæl har ædt af det«, siger hun.

Hun betragter det som højst sandsynligt, at en gråsæl har jaget og dræbt marsvinet. Studiet, der er foretaget i samarbejde med forskere fra



Resterne af et marsvin på vadehavsøen Sild. Foto: Sönke Lorenzen.

University of Veterinary Medicine Hannover er publiceret i *Journal of Sea Research*.

Gråsæler er rovdyr. De adskiller sig fra den anden sælart i Nordeuropa, den spættede sæl, ved at være op til tre gange større. De opfører sig som rovdyr og jager ikke kun

fisk, men også havpattedyr.

Selvom det kun er få år siden, at de første døde marsvin begyndte at dukke op, er Kirstin Anderson Hansen heller ikke overrasket over de nye tegn på gråsælers adfærd.

»Der er måske så mange gråsæler nu, at de er ved at tilpasse sig den øgede konkurrence fra artsfæller, og i den forbindelse udvikler nogle en ny jagtstrategi«, siger hun.

Marsvinekadaverne er karakteriseret ved, at der kun er skelet og hud tilbage, mens indvolde og kød er væk. I Danmark er der ikke fundet kadavere. Observationerne er især fra Nordtyskland og Holland og Skotland. Herfra er der også beretninger om gråsæler, der angriber og æder unge spættede sæler.

Selvom man skal betragte gråsæler som et til tider aggressivt rovdyr, er der ingen grund til at være bange for dem i Danmark, mener Kirstin Anderson Hansen. Der foreligger da heller ingen rapporter om sammenstød mellem mennesker og gråsæler i Danmark.

Birgitte Svennevig, SDU. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.07.008>

Dyster musik højner spilleglæden

Et spil dam bliver meget sjovere, når musikken afspejler dit næste træk. Forskning viser, at dynamisk musik forstærker indlevelsen i spil, og computerspilsindustrien er ved at få øjnene op for lydbilledet. Vi kender det godt. En gyserfilm uden lyd er bare ikke særlig hyggelig. I spil sker også store dramaer. Du bliver slået hjem eller dør endda. Og hvis musikken afspejler dramaet på skærmen, så stiger spilleglæden, viser ny forskning.

»Vi satte to personer til at spille dam på computeren. Kunstig intelligens fulgte deres spil og tonede musikken efter deres næste træk. Hvis de stod over for et afgørende træk, hvor de kunne tabe spillet, så steg intensiteten i musikken«, siger spildesigner og adjunkt Marco Scirea fra SDU Embodied Systems for Robotics and Learning.

Da det gammelkendte brætspil dam blev

peppet op med stemningsmusik, så steg spilleglæden. I alt deltog 29 forsøgspersoner, og i efterfølgende interview svarede spillerne, at de fik en bedre og mere engagerende spiloplevelse, når musikken var dynamisk og underbyggede stemningerne i spillet.

Robot-komponist

Marco Scirea er en stor musikelsker og har udviklet robot-komponisten MetaCompose. Han har fodret den kunstige intelligens med helt basal musikviden fra klassisk vestlig musik. Regler om hvilke musikstykker, der vækker følelser som glæde, begejstring eller frygt. Robotkomponisten følger spillets udvikling på computeren og komponerer selv musikken efter intensiteten i spillet.

»Computerspil har en tendens til at blive kedelige efter et stykke tid. Min tese er, at det er på grund af det meget monotone lydbillede. Det her er et lille studie, men det er første gang,

at forskning viser, at dynamisk og følelsesbestemt musik forstærker spiloplevelsen«.

For nyligt vandt Marco Scirea "Best Paper Award" for bedste videnskabelige artikel på konferencen AudioMostly i England, og spilindustrien så småt er ved at få øjnene op for hele lydbilledets muligheder for at skabe mere intense stemninger i spil. Marco Scirea peger på Melodrive, som er en tysk startup fra 2017, som skaber original musik, som matcher det, som sker i spillet.

»Computerspil er visuelt flotte, men nu er der ved at komme fokus på, hvad et dynamisk lydbillede kan tilføre. Musikken forstærker stemninger, og det kunne være spændende at forske videre i, om man via musik i spil kan skabe følelser. Hvis man for eksempel er stresset, kan et spil med den rigtige musik så gøre dig mindre stresset?«.

Birgitte Dalgaard, SDU.



To marsvin fra Fjord og Bælt centeret i Kerteminde. Marsvin i fangenskab hjælper os i forståelsen af deres vilde artsfæller. Foto: Peter Verhoog.

MARSVIN MORSEKODER for at undgå spækhuggere

Om forfatteren



Pernille Meyer Sørensen er forskningsassistent ved Sektion for havpattedyrsforskning, Institut for Bioscience, Aarhus Universitet.

Hun interesserer sig for, hvordan havpattedyr bruger akustisk kommunikation i sociale interaktioner med artsfæller, samt hvordan naturlige og menneskeskabte forstyrrelser, såsom støj, begrænser havpattedyrs mulighed for at kommunikere.

I 2019 rejser hun til University of Bristol i Storbritannien, hvor hun skal undersøge dannelsen af alliancer hos øresvin, og hvordan disse påvirkes af det akustiske miljø.

pernille.soerensen@bios.au.dk

De fleste hvaler kommunikerer med hinanden ved hjælp af lavfrekvent lyd. Men ikke marsvinet, der udelukkende producerer signaler af høj frekvens. Sandsynligvis skyldes det, at de derved kan undgå at blive opdaget og spist af spækhuggere.

Et hurtigt glimt af en rygfinne eller to, der forsvinder bag en bølgetop – sådan oplever man oftest mødet med marsvin på trods af, at der lever omkring 40.000 af dem i de indre danske farvande. Marsvinenes sky natur og kortvarige besøg ved overfladen gør, at vi ved overraskende lidt om den lille hval. Heldigvis har ny teknologi gjort, at vi inden for de seneste fem år er kommet helt tæt på marsvinenes liv.

Modsat marsvin lever landlevende

pattedyr i et miljø, hvor syns- og lugtesansen i høj grad bruges til navigation og fødesøgning. Disse sanser er dog ikke særligt effektive over længere afstande under vand, og derfor benytter hvaler sig i stedet for af lyd og deres hørelse. Marsvin benytter sig af specielle højfrekvente klik, der først og fremmest bruges til ekkolokalisering. Ekkolokalisering er en proces, hvor marsvinet udsender et kort klik, der vandrer gennem vandet, indtil det rammer et byttedyr eller en barriere såsom bunden eller overfladen.

En dag i marsvinets liv

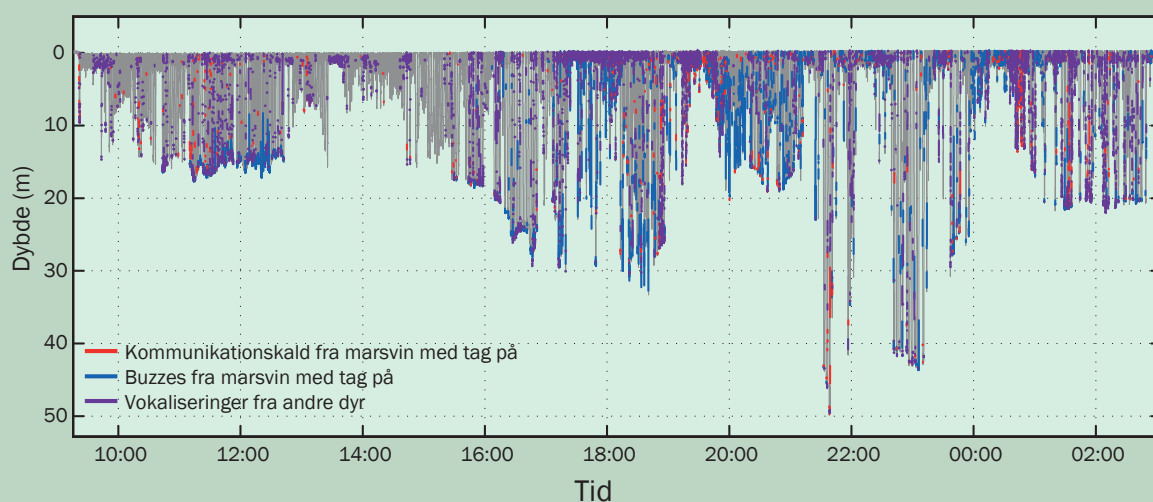
På fotoet ses et vildt marsvin udstyret med en instrumentpakke, også kaldet en DTAG. Marsvinene bliver håndteret i få minutter, hvor DTAG'en sættes på, og herefter bliver de sat tilbage i havet. Taggen optager de klik, marsvinet udsender. Marsvinets klik laves ved strukturer i åndehullet kaldet abelæberne. Ved at presse luft forbi disse strukturer kan der dannes klik, som efterfølgende sendes ud gennem marsvinets pande i det væv, man kalder melonen. Melonens fedtholdige sammensætning er med til at retningsorientere klikkene i en lydkegle foran dyret. Modsat mennesker har marsvin ikke et ydre øre, der leder lyden til det indre øre. I stedet opfanges deres egne ekkoe og lyde gennem underkæben, hvor lyden via et lydtransporterende væv sendes til det indre øre.



Foto: Sektion for havpattedyrsforskning, Aarhus Universitet.

Nederst: Data, vi indsamler ved hjælp af DTAGs, giver os blandt andet information om, hvor dybt og hvor lang tid marsvinene dykker, og hvornår de udsender klik. Her ses en såkaldt dykkerprofil, hvor dyb-

den ses som en funktion af tid. De grå linjer illustrerer marsvinets bevægelse op og ned i vandsøjlen. Derudover er der med rød, blå og lilla farver markeret, hvornår dette marsvin udsender kald og buzzes, og hvornår andre dyr kan høres på optagelserne.



Herfra reflekteres lyden tilbage til marsvinet som et ekko. Ved at udsende serier af klik og lytte efter de tilbagevendende ekkoer, kan marsvinet orientere sig om sine omgivelser og få information om, hvor dets bytte befinder sig, hvilket hjælper den til at fange byttet. Når marsvinet nærmer sig sit bytte, vil det klikke hurtigere og hurtigere for at få en hurtigere opdatering om, hvor og hvordan byttet bevæger sig. Denne fase kaldes et buzz, og her klikker marsvinet med en hastighed på cirka 500 klik i sekundet.

Det meste af energien i marsvins klik ligger mellem 100 og 160 kHz, og de hører også godt i dette frekvensområde. Men de hører også godt ved lave frekvenser helt ned til ~10 kHz. Til sammenligning er den højeste lyd, mennesker kan høre, 20 kHz. Højfrekvente klik er mere retningsorienterede, og marsvin får derfor kun ekkoer tilbage fra objekter i en smal lydkegle foran dem. Dette er en stor fordel, når marsvinet skal fokusere på og fange sit bytte, idet dyret undgår at tage stilling til alt omkring sig.

Lavfrekvent kommunikation

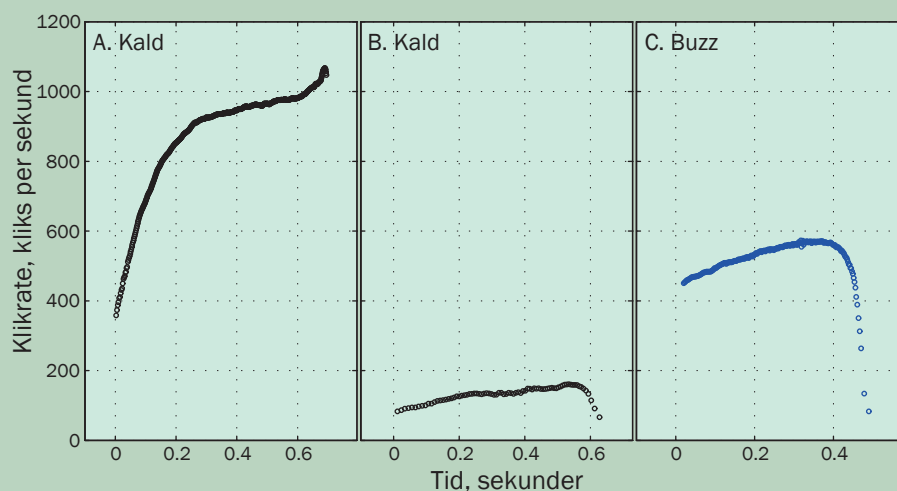
Alle tandhvaler benytter sig af højfrekvente klik til ekkolokalisering. Der er dog to vigtige ulemper ved at bruge højfrekvente signaler: Højfrekvente lyde dæmpes hurtigere, og klikkenes retningsorientering vil reducere det volumen, lydens energi spredes over. Disse egenskaber er ikke særligt fordelagtige, når man ønsker at udveksle information med en artsfælle. Som en konsekvens af dette bruger mange hvaler lavfrekvente lyde, når de kommunikerer med artsfæller for at kunne videregive og modtage information over

Kommunikation og hvalernes tilpasning til et liv i havet

Kommunikation kan defineres som overførslen af information fra en afsender til en modtager og modtagerens efterfølgende brug af denne information til at foretage en handling. Sådant information kan forekomme i mange former, og en organisme behøver derfor særligt indrettede sanseorganer til at kunne modtage og oversætte

denne information. Da hvalernes forfædre for cirka 70 millioner år siden vandrede tilbage til havet, hvor alt liv oprindeligt opstod, skulle de i høj grad tilpasse sig et helt andet sensorisk miljø. I vand begrænses synssansen til få meter, og brug af lugtesansen vil oftest være en alt for langsommelig proces. Modsat er lyd et meget effektivt transportmid-

del; lyd transmitteres fire-fem gange hurtigere i vand end i luft, og lyd af en given frekvens bevæger sig længere i vand end over overfladen. Derfor benytter alle hvaler sig af lyd til at kommunikere og navigere med, og nogle arter af hvaler, tandhvalerne, har endda udviklet ekkolokalisering til at detektere og fange deres byttedyr ved hjælp af lyd.



Marsvin benytter sig af de samme højfrekvente klik til ekkolokalisering og kommunikation. Det lader dog til, at måden, hvorpå marsvin adskiller klikserier til fødesøgning fra klikserier til kommunikation, er via ændringer i varigheden mellem de enkelte klik, der udsendes i en serie. I figuren ses klikraten, det vil sige hvor mange klik, der udsendes per sekund, som en funktion af tid for tre forskellige klikserier.

(A) og (B) viser to kald med forskellige repetitionsrater. I (A) repeteres størstedelen af alle klik med en rate på mere end 800 klik per sekund. I (B) udsendes hvert enkelt klik med en lavere rate på omkring 100 klik per sekund. (C) viser den rate, marsvinet klikker med i et fødesøgnings-buzz. Her udsendes størstedelen af klikkene med en repetitionsrate på omkring 500 klik per sekund.

lange afstande og i alle retninger. Det er for eksempel tilfældet med pukkelhvalernes sang og delfinernes individualspecifikke fløjt. Tidligere optagelser har aldrig afsløret lignende lavfrekvente signaler fra marsvinet, så det tyder på, at marsvinet kun producerer højfrekvente klik. Men betyder det så, at marsvinet slet ikke kommunikerer, og at deres sky adfærd afspejler en asocial livsstil? Og hvis ikke, hvad gør de så for at kommunikere og holde kontakt med artsfæller? Denne problemstilling satte jeg mig for at undersøge nærmere i mit speciale i samarbejde med professor Peter Teglberg Madsen, postdoc Danuta Wisniewska, AIAS fellow Frants Jen-

sen, Seniorforsker Mark Johnson og Seniorforsker Jonas Teilmann.

Specialdesignet rygsæk til marsvin

For at følge vilde marsvins naturlige adfærd kan man benytte specialdesignede instrumentpakker, der ved hjælp af sugekopper sættes fast på ryggen af hvalerne. Herfra måler de hvalens bevægelse i tre dimensioner, hvor dybt hvalen dykker samt alle de lyde, hvalen oplever og selv producerer. Spørgsmålet er så bare, hvordan man kommer tæt nok på en hval til at kunne sætte instrumentpakken på? For marsvinet er vi på Aarhus Universitet så heldige at have gode kontakter til

lokale fiskere. Når der somme tider går et marsvin i deres bundgarn, kontakter fiskerne os, så vi kan tage ud og sætte instrumentpakken på marsvinets ryg, hvorefter dyret slippes fri. Når sugekopperne slippes marsvinet efter (forhåbentligt) mange timers optagelser, vil instrumentpakken flyde til overfladen. Ved hjælp af pakkens radiosender kan vi da pejle os ind på, hvor den befinder sig, og hente den hjem.

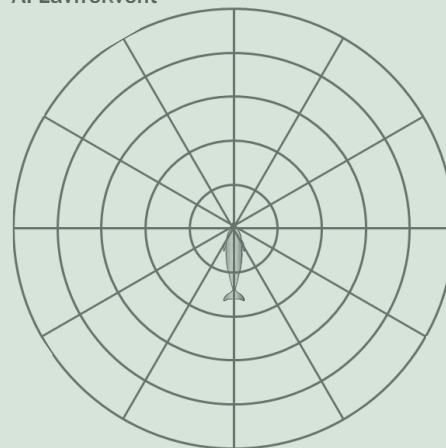
Marsvinet taler i morsekoder

Det lykkedes os på den måde at få data fra seks forskellige marsvin, svarende til 96 timers optagelser. Ved manuel gennemgang af alle optagelserne kunne vi bekræfte, at

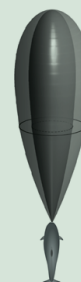
Active space

Active space defineres som den maksimale afstand, en modtager er i stand til at høre og afkode informationen i et signal fra en afsender. Hvor stor denne afstand er, afhænger af modtagerens høreevne, mængden af støj i miljøet og miljøets struktur og endelig signalets egenskaber. Et lavfrekvent signal kan sendes over lange afstande, hvorimod højfrekvente signaler hurtigt dæmpes, og når til sammenligning ikke særlig langt. Desuden vil energien i lavfrekvente signaler blive spredt mere eller mindre i alle retninger (A), i modsætning til højfrekvente signaler, der er meget retningsorienterede (B). Derfor bruger tandhvaler ofte højfrekvente signaler til fødesøgning (ekkolokalisering) og lavfrekvente signaler til kommunikation. Marsvinet er her en undtagelse, idet den kun udsender højfrekvente klik, som bruges til både ekkolokalisering og kommunikation.

A. Lavfrekvent

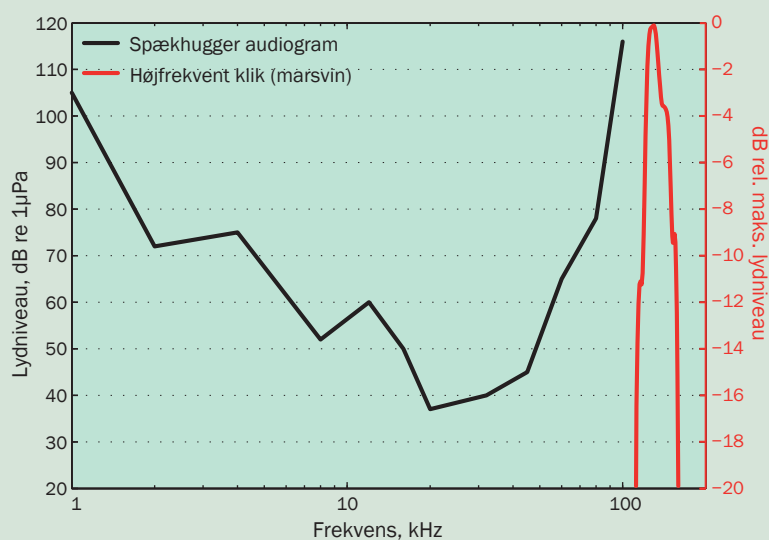


B. Højfrekvent



Audiogram

Evnen til at høre kan illustreres ved et såkaldt audiogram. Et audiogram illustrerer det lydniveau, der skal til, for at en organisme kan høre en lyd ved en given frekvens. Audiogrammet for en spækhugger er illustreret i figuren (venstre y-akse, sort) og viser, at dette dyr hører bedst mellem 20 og 45 kHz, hvorimod dens evne til at høre svækkes ved frekvenser, der nærmer sig flankerne nær 1 og 100 kHz. På figuren er ligeledes plottet energien i et marsvins højfrekvente klik (højre y-akse, rød). Som det kan ses af figuren, overlapper spækhuggerens høreevne ikke med de frekvenser, marsvinet klikker med. Det bakker derfor op om den teori, at marsvin udelukkende benytter sig af højfrekvente klik til ekkolokalisering såvel som kommunikation for at undgå at blive opdaget og spist af spækhuggere.



vilde marsvin udelukkende producerer højfrekvente klik. Det betyder dog langt fra, at marsvinene ikke var i kontakt med artsfæller, tværtimod! To af dyrene var sammen med deres kalve, da de fik måleinstrumentet på, men alle dyrene var ofte i kontakt med eller i nærheden af andre marsvin. Det kunne jeg bekræfte ved at adskille klik fra "vores eget dyr" fra andre marsvins klik. Når instrumentpakken sidder på ryggen af marsvinet bag ved det lydproducerende organ, vil de klik, man optager, nemlig have en anden frekvenssammensætning end den, man optager foran dyret.

Men hvis marsvinet ikke kan kom-

munikere ved hjælp af lavfrekvente signaler, hvordan kommunikerer de så med andre marsvin? I analysen af marsvinenes klik så jeg hurtigt, at der var nogle serier af klik, der lød og så anderledes ud end ekkolokaliserings-buzzet. I buzzet kan man ved hjælp af særlige analyseteknikker visualisere de ekkoe, der sendes tilbage fra byttedyret, og fra instrumentpakkens bevægelsesdata kan man tydeligt se de ændringer, der finder sted, idet marsvinet suger sit bytte ind i munden. Men for en lang række af de klikserier, jeg analyserede, var der ingen af disse karakteristika til stede. Derudover blev disse særlige klikserier ofte gentaget flere gange

i træk og i høj grad på de tidspunkter, hvor andre marsvin kunne høres på optagelserne. Der er derfor stor sandsynlighed for, at marsvinet benytter disse særlige klikserier til kommunikation med artsfæller. Men hvis de benytter sig af den samme type klik til både fødesøgning og kommunikation, hvordan kan andre marsvin så vide, om de bliver snakket til, eller om det andet marsvin blot leder efter føde? En mulighed er, at marsvinene i stedet videregiver information via klikkenes repetitionsrate – lidt på samme måde, som vi kender det fra morsekodning. Ganske rigtigt så jeg, at de klikserier, der blev brugt til kommunikation, oftest blev udsendt

Videre læsning
marinebioacoustics.files.
wordpress.com

Clausen, K. T., Wahlberg, M., Beedholm, K., Deruiter, S. & Madsen, P. T. 2010. Click communication in harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *Bioacoustics*, 20, 1-28.

Morisaka, T. & Connor, R.C., 2007. Predation by killer whales (*Orcinus orca*) and the evolution of whistle loss and narrow-band high frequency clicks in odontocetes. *Journal of Evolutionary Biology*, 20(1976), pp.1439-1458.

Sørensen, P. M., Wisniewska, D. M., Jensen, F. H., Johnson, M., Teilmann, J. & Madsen, P. T. 2018. Click communication in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Scientific reports*, 8:9702.

Perrin, W.F., Würsig, B. & Thewissen, J. G. M. (eds). 2009. *Encyclopedia of marine mammals*. Academic Press.

Forskningen blev støttet af the German Federal Agency for Nature Conservation (BfN), Carlsberg-fondet og Danmarks Frie Forskningsfond (FNU).

med en repetitionsrate, der var langsommere eller hurtigere end repetitionsraten i et buzz. Det lader altså til, at tiden mellem de enkelte klik i en serie benyttes til at indkode information og hjælper marsvinene med at adskille klikserier til fødesøgning fra kommunikationskald.

Marsvinet leger gemmeleg

Som en konsekvens af klikkenes høje frekvensindhold og deres derved korte rækkevidde, udsendte marsvinene ofte det samme kald flere gange i træk, og de enkelte klik blev udsendt med en højere intensitet end enkelte klik i de lignende buzzes. Dette er formentlig en måde, hvorpå marsvinene øger sandsynligheden for at blive hørt eller holde kontakt med deres artsfæller. Det virker som en meget besværlig form for kommunikation, så hvorfor har marsvinet ikke udviklet lavfrekvente signaler, såsom øresvinets fløjt? Den bedste forklaring herpå er truslen fra spækhuggere. Spækhuggerens leveområder overlapper geografisk i høj grad med marsvinets, og nogle

spækhuggere spiser udelukkende andre havpattedyr. Denne type spækhuggere lytter efter lydssignaler udsendt af deres bytte i stedet for selv at ekkolokalisere. Det gør de formentlig for at undgå, at deres bytte hører dem. Så hvordan sikrer marsvinet sig, at det kan kommunikere og finde føde uden at blive opdaget? De kan enten tie helt stille, eller de kan producere klik af en frekvens, som spækhuggerne ikke kan høre. Sidstnævnte er lige præcis det, marsvinene gør. Studier har vist, at spækhuggere ikke kan høre lyde med en frekvens på mere end cirka 100 kHz. Ved at benytte sig af højfrekvente klik (>100 kHz), har marsvin altså den fordel, at de kan blive ved med at søge føde og kommunikere uden at blive hørt af spækhuggere. Så selvom marsvin i danske farvande overordnet set sjældent får besøg af spækhuggere (der blev udryddet i vores del af Nordsøen for cirka 100 år siden), har spækhuggerens tilstedeværelse evolutionært set tilsyneladende medført, at marsvinene har tilpasset sig brugen af højfrekvente klik

til kommunikation, fordi lavfrekvente signaler har øget risikoen for at blive spækhuggerens aftensmad.

“Hvad snakker du om?”

Selvom vi har lært en masse nyt om marsvinet inden for de seneste par år, er der stadig meget, vi endnu ikke ved om Danmarks eneste, hjemmehørende hval. I den kommende tid håber vi på at undersøge, hvor mange forskellige typer af kald, de bruger, og hvordan de bruger dem. Ved at afspille de forskellige kaldtyper for marsvin i fangenskab, kan vi undersøge, hvordan marsvinene reagerer og dermed få indsigt i, hvad marsvinene fortæller med deres kald, samt få en større forståelse for deres sociale liv. Når vi på denne måde lærer mere om, hvordan marsvinets lyd fungerer, og hvor vigtig den er for kommunikation og fødesøgning, hjælper det os også til at forstå, hvordan og i hvor høj grad marsvin bliver forstyrret af menneskeskabt støjforurening fra eksempelvis skibstrafik. En viden, vi kan bruge til bedre at beskytte marsvinene i naturen. ■

Science på RUC

Naturvidenskab i virkeligheden

Interesserer du dig for Matematisk Modellering?

Nye uddannelser på Roskilde Universitet:

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

ruc.dk/matematik-pa-roskilde-universitet



Sådan gør frøen sit spyt til lim

Forskere har med list og avanceret teknologi analyseret grænsefladen mellem frøens tunge og frøens bytte: I samme øjeblik frøen trækker tungen tilbage, omstrukturerer proteiner i frøens spyt sig og gør spytet klæbrigt.

De fleste ved det, men de færreste har set det: At frøer fanger deres bytte med tungen. Det går nemlig så hurtigt – hele tungens tur ud til insektet og retur til munden tager mindre end en tiendedel af et sekund – at det menneskelige øje ikke når at opfange det.

I de senere år har videnskaben fundet ud af, at frøernes effektive fangstteknik bygger på en kombination af særdeles bløde tunger og spyt, der bliver til lim, når det udsættes for tryk. Spytet, eller slimen i spytet, er ikke i sig selv klæbende. Det bliver det først, når der er brug for det – nemlig når frøens tunge har fat i byttet og trækker det ind i munden. De stærke g-kræfter giver netop det tryk, som gør slimen klæbrig.

Nu har et internationalt forskerhold fra universiteterne i Aarhus, Oregon og Kiel ved hjælp af nye og avancerede teknikker afsløret, hvad der rent kemisk sker i slimens overflade, når det sker.

Kemi i tungeaftryk

Forskerne har analyseret frøers tungeaftryk med en særlig form for røntgenabsorptions-spektroskopi, NEXAFS (near edge x-ray absorption fine structure), som de amerikanske forskere i øvrigt selv har været med til at udvikle.

Teknologien gjorde det muligt for forskerne at analysere de yderste 4-5 nanometer af tungeaftrykkene, og de har netop publiceret resultaterne i det videnskabelige tidsskrift *Biointerphases*:

Nogle proteiner i slimen arrangerer sig i velordnede tråd-strukturer, såkaldte fibriller, så snart tungen begynder den bratte tilbagetur til frøens mund.

Proteinerne er muciner, nogle særlige glykoproteiner (sukkerholdige proteiner), som bl.a. gør slim sej og vandbindende – også hos mennesker, og ikke kun i spyt.



Så tæt på og dog så fjernt. En frø forsøger at fange en fårekilling, som er gemt bag et tyndt stykke vel-pudset glas. Når frøen trækker tungen tilbage, efterlader den et klistret og kemisk tungeaftryk. Sådanne aftryk har et forskerhold nu analyseret. Foto: Kiel University.

Vender samme vej

Forskerne skildrer, hvordan disse proteins sekundære strukturer er tilfældigt arrangerede, lige ind til frøen trækker tungen tilbage. Når molekylerne arrangerer sig i fibriller, gør de det sådan, at de vandbindende (hydrofile) grupper vender indad mod frøens tunge, mens de vandskyende (hydrofobe) grupper vender ud mod byttet. Eller glasskiven, i dette tilfælde.

Og fordi fibrillerne vender i samme retning og ligger tæt sammen, kan de skabe en elektrisk tiltrækning via de såkaldte Van der Waals kræfter. Fibrillernes orientering har også den fordel, at den holder slimen fast på tungen.

»Det fysiske input – altså tungens tilbagetrækning – ændrer slimens kemi, og det er sådan, frøen tænder for limen«, siger Joe E. Baio, som er hovedforfatter på artiklen og lektor i kemisk ingeniørvidenskab på Oregon State University.

Frøer blev overlistet

Og hvor fik forskerne så tungeaftrykkene fra? Dem skaffede de ved at lokke hornfrøer til at affyre deres tunger mod fårekillinger, som forskerne på snedig vis havde placeret bag tynde glasplader.

»Vi var selvfølgelig nødt til at give frøerne deres bytte straks efter, for ellers gad de ikke forsøge igen. De er jo ikke dumme,« forklarer lektor Tobias Weidner fra Institut for Kemi på Aarhus Universitet.

Baggrunden for projektet er at skabe ny viden, der kan bruges til at udvikle biometriske materialer. Næste trin bliver at identificere den specifikke mucin-sekvens, så forskerne kan genskabe evnen til at slå klæbeevnen til og fra i kunstige, trykfølsomme klæbemidler.

Peter F. Gammelby, Aarhus Universitet. *Biointerphases* 13, 06E408 (2018); <https://doi.org/10.1116/1.5052651>

PARTIKELTERAPI

proBEAM



En stråleterapeut er i gang med at teste de kliniske arbejdsgange på en dukke lavet af materialer, der simulerer menneskeligt væv (så den også fungerer realistisk på scanningsbilleder). Her gøres der klar til et strålefelt, der kommer ind mod kraniet skråt bagfra. Foto: K. Seiersen.

Danmarks første facilitet til behandling af kræftpatienter med partikelterapi åbner snart ved Aarhus Universitetshospital. Strålebehandling med partikler kan være et attraktivt alternativ til traditionel strålebehandling med røntgenstråler, men det er også en teknologisk udfordrende disciplin.

Om forfatterne

Pernille Bræmer-Jensen er studerende pernille.braemer@phys.au.dk

Christian Flohr Nielsen er ph.d.-studerende christianfn@phys.au.dk

Begge ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Mona Lynggaard Skogly er lærer ved Tradium Randers

Helle Ransborg Svenningsen er lærer ved Skive College

Christian Skou Søndergaard er hospitalsfysiker ved Dansk Center for Partikelterapi, Chr.Sondergaard@aarhus.rm.dk

De fleste danskere får på et eller andet tidspunkt i deres liv en kræftsygdom tæt ind på livet. Statistikken fortæller os, at hver tredje dansker vil opleve at få stillet diagnosen kræft. Heldigvis er der en stadig udvikling af gode behandlingsmuligheder, som sikrer, at mange enten helt kureres eller får sygdomsudviklingen bremset.

Hvilken behandling, man vælger til den enkelte patient, afhænger af faktorer som kræfttypen, patientens alder, hvor fremskreden kræftsygdommen er samt det

forventede omfang af bivirkninger. De mest almindelige former for behandling er operation, strålebehandling og kemoterapi, ofte i kombination.

Strålebehandlingen gives almindeligvis som røntgenbestråling, som også påvirker det omkringliggende raske væv. En mere skånsom teknik er at benytte bestråling med protoner – en teknik, der hidtil ikke har været tilgængelig i Danmark, hvorfor patienter med behov for denne type behandling tidligere er blevet sendt til USA. Men det ændrer sig fra starten af 2019, hvor et

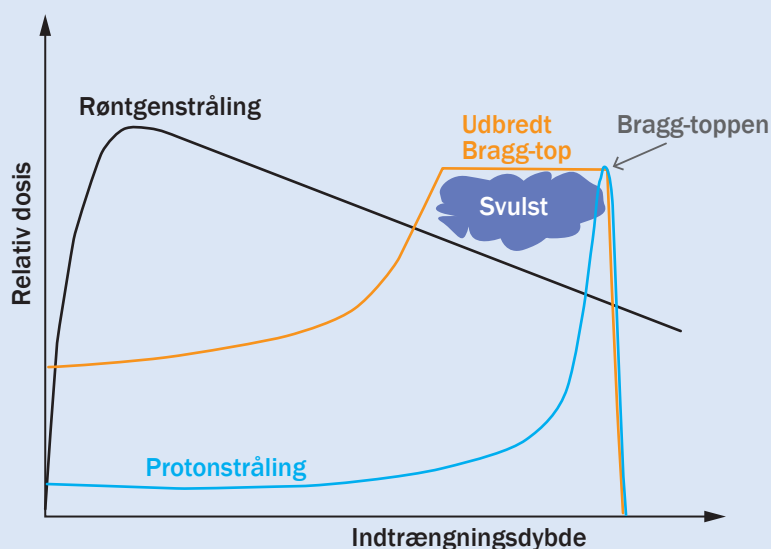
nyt nationalt center for partikelterapi på Aarhus Universitetshospital vil begynde at behandle patienter med protonstråler.

Stråling mod kræft

Kræftceller kan opstå tilfældigt eller være forårsaget af ydre faktorer (som rygning) og er karakteriseret ved ukontrolleret vækst, således at der udvikles svulster, som invaderer det omkringliggende væv og organer. Kroppens celler er udstyret med et reparationsystem, som almindeligvis forhindrer fejlramte celler i at udvikle sig, men det formår kræftcellerne altså at undvige.

Fordelen ved partikelstråling

Figuren viser et eksempel på, hvordan henholdsvis røntgenstråling og protonstråling afsætter dosis ved strålebehandling af kræft. Det fremgår, at røntgenstråling afsætter sin energi hele vejen gennem kroppen med den største dosis nær overfladen, mens protonerne derimod afsætter deres energi i en markant top. Denne top kaldes Bragg-toppen efter fysikeren William Bragg, som påviste effekten ved undersøgelse af ionisering af luft med α -partikler i 1904. Da indtrængningsdybden af protonerne er bestemt af deres energi, kan man levere dosis til et større område ved at have flere protonstråler med varierende energier. Dette kaldes en udbredt Bragg-top (Spread Out Bragg Peak, SOBP), som er vist som eksempel med den orange kurve.



Traditionel strålebehandling med røntgenstråler sigter på at ødelægge kræftcellerne og stoppe sygdomsudviklingen. Når røntgenstrålerne rammer atomer eller molekyler, kan der blive slået elektroner løs, og dermed dannes ioner (man kalder det derfor for ioniserende stråling). Cellen består mestendels af vand, og strålingen medfører, at H_2O -molekyler omdannes til hydroxylradikaler, som ødelægger cellens DNA, så den går til. Strålingen skelner ikke mellem raske og syge celler, og det er derfor væsentligt ved strålebehandling at afgrænse strålingen så godt som muligt til selve svulsten. Heldigvis er det raske væv dog lidt bedre end kræftcellerne til at komme sig efter strålingspåvirkning, hvilket giver en behandlingsmæssig gevinst, som vi udnytter ved at udføre behandlingen strakt ud over en længere periode.

Men det raske væv, som rammes, vil kunne påvirkes i et omfang, så det giver bivirkninger for patienten. Det kan være forbigående bivirkninger som hudrødmen, men det kan også medføre varige skader som kognitiv påvirkning ved bestråling af hjernen. Problematikken omkring bivirkninger er meget afhængig af, hvor i kroppen, der skal bestråles, hvor meget stråledosis, der er

nødvendig at give til svulsten, og det generelle sygdomsbillede. At reducere bivirkningerne ved strålebehandling vil generelt forbedre patientens livskvalitet både under og efter behandlingen, men det kan i nogle tilfælde være en nødvendighed for overhovedet at gøre det tåleligt at gennemføre den ønskede behandling.

Der er derfor en væsentlig motivation i at forbedre teknikkerne til at få så meget stråledosis i tumor som muligt og så lidt unødigt stråling til det raske væv som muligt. Det er netop her partikelterapi kommer ind i billedet, idet man her udnytter en anden strålingsfysik til en bedre dosisafsættelse.

Protoner i kræftbehandling

Ved partikelterapi bruger man stråler af ladede partikler, typisk protoner eller de tungere kulstofkerner, i stedet for røntgenstråler. I princippet er virkningsmekanismen den samme som ved røntgenstråling – både røntgenstråler og partikelstråler virker celledræbende i kraft af den ionisering, de forårsager, når de trænger ind i vævet. Men rent strålingsfysisk er det helt forskellige mekanismer, der forårsager ioniseringen. Røntgenstrålingen består

af neutrale partikler (fotoner), som vekselvirker med elektronerne i vævets molekyler via enkeltstående hændelser med en given sandsynlighed. Derfor er der også en vis sandsynlighed for, at de trænger hele vejen gennem patienten (hvilket igen er årsagen til, at man kan tage røntgenbilleder). Protoner er derimod elektrisk ladede partikler, der på deres vej gennem vævet nedbremses på grund af kontinuerligt virkende elektriske kræfter. På grund af denne nedbremsning har protonerne en endelig rækkevidde i vævet, og de kan således ikke fortsætte hele vejen gennem patienten.

Fordelen ved at bruge ladede partikler som protoner til kræftbehandling er, at de har en meget karakteristisk måde at afsætte dosis på: De afsætter således den største dosis lige før, de er bremsede helt ned. Til sammenligning afsætter røntgenstråling den største dosis i starten af deres vej gennem patienten – og som nævnt passerer en stor del af røntgenstrålingen hele vejen igennem patienten.

Indtrængningsdybden af protonerne i kroppen er bestemt ved energien af protonstrålen, og man kan således ved at ændre energien præcis

Partikelstrålen styres med store magneter, som afbøjer og fokuserer strålen.

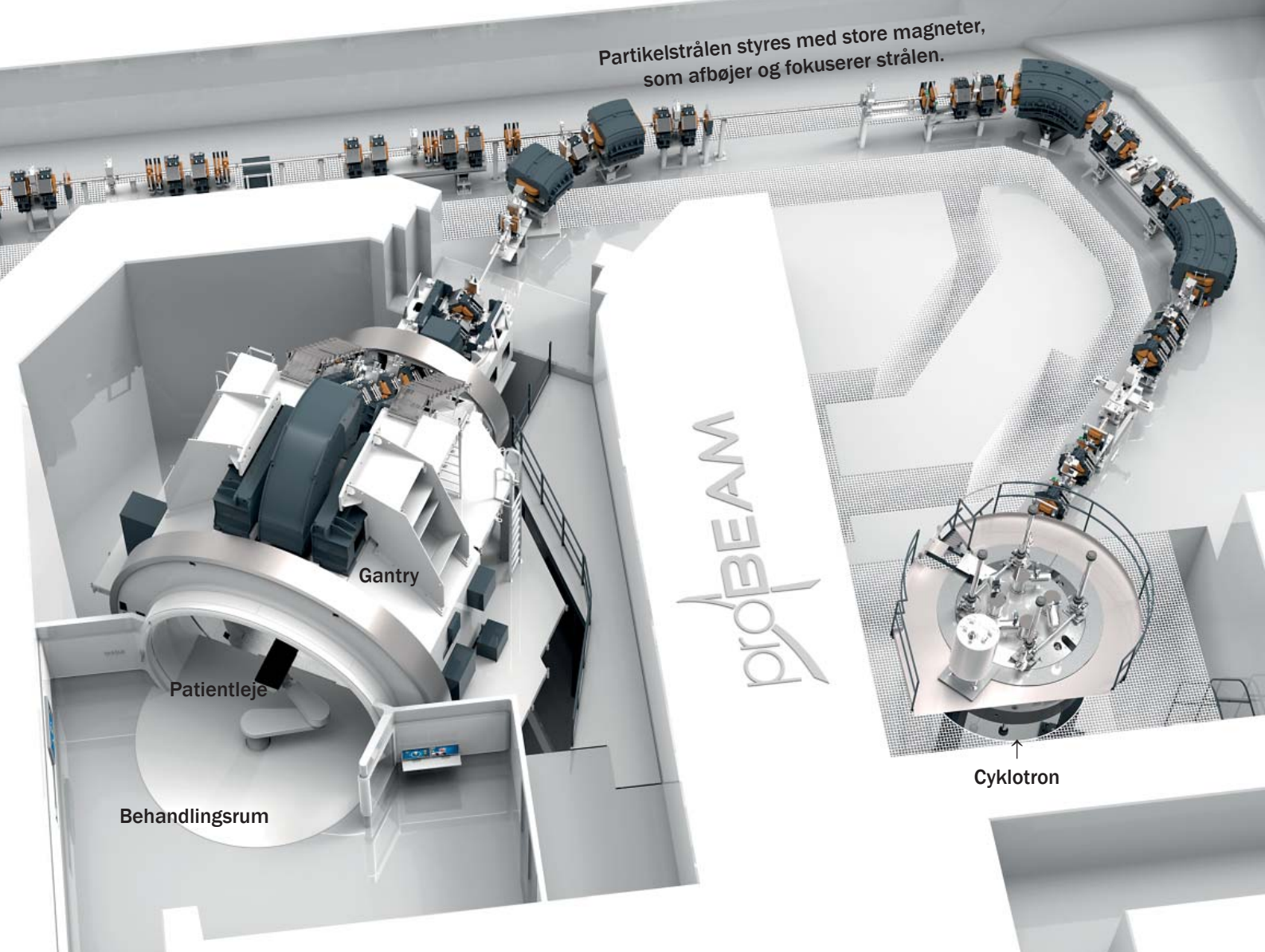


Illustration af acceleratoranlægget til protonbestråling på Dansk Center for Partikelterapi. Til højre ses acceleratoren, cyklotronen, hvorfra protonerne tilpasses i energi og bringes frem til behandlingsrummet. I behandlingsrummet ligger patienten på et robot-

leje midt i en mere end 200 tons tung, tre etager høj, roterende konstruktion – et såkaldt gantry – som muliggør at patienten kan bestråles fra alle sider. Der er op til fire meter tykke betonnure omkring cyklotronen. Grafik: Varian Medical Systems.

Dansk Center for Partikelterapi

Dansk Center for Partikelterapi (DCPT) ved Aarhus Universitets-hospital er bygget op omkring et acceleratoranlæg til protonbehandling leveret af det amerikanske firma Varian.

Acceleratoranlægget er i sig selv en stor konstruktion, der fylder op til tre etager i højden og kræver en del beton til afskærmning. Derudover huser DCPT også en lang række understøttende funktioner som scannere (CT, PET-CT, MR), ambulatorier og kontorer – så etableringen af partikelterapi er en større affære end blot at købe en ny accelerator.

Behandlingen gives i tre rum, hvor strålen leveres via et såkaldt gantry, som gør det muligt at bestråle patienten fra alle vinkler i rotationsplanet. Derudover er der et forskningsrum med et horisontalt strålerør, hvor man kan foretage fundamentale radiobiologiske og strålingsfysiske undersøgelser. Det kan for eksempel være bestråling af cellekulturer eller udvikling af nye detektorer.

Hjertet i anlægget er acceleratoren, en cyklotron, hvor protonerne accelereres op til en energi på 250 MeV. For at variere behandlingsdybden i patienten skal energien af

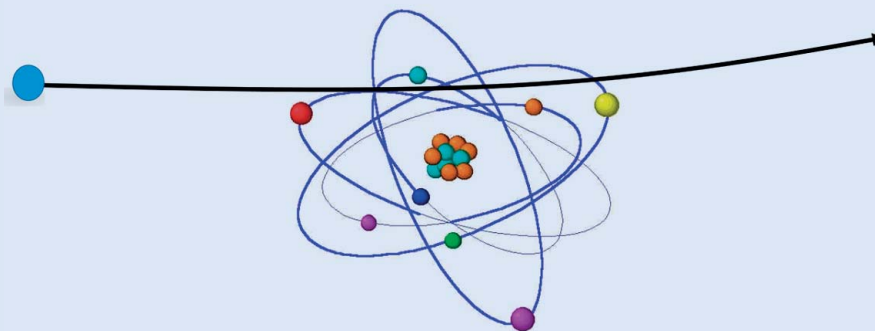
strålen kunne sænkes, hvilket gøres ved efterfølgende at lade strålen passere igennem en såkaldt degrader, der er en konstruktion med kiler af grafit, hvormed strålen kan bremses ved passage gennem en veldefineret mængde materiale.

Når protonstrålen frembringes og tilpasses i energi, produceres der særligt omkring cyklotronen og degraderen en stor mængde energirige neutroner, som omgivelserne skal beskyttes imod. Derfor er betonnæggene omkring acceleratoren op til fire meter tykke, hvorfor denne del af bygningen ikke uden grund kaldes for bunkeren.

Kollisionens fysik

En billardbal, der rammer en anden billardbal med samme masse, vil højst sandsynligt primært blive afbøjet fra sin indkommende retning. Dens energitab vil være ret begrænset, medmindre den rammer den anden bal centralt. Hvis billardballen derimod rammer en samling små kugler med samme totalmasse, vil den sandsynligvis kun ændre retning meget lidt, men vil derimod tabe en betydelig mængde af sin kinetiske energi, på grund af de mange små energioverførsler til kuglerne.

Det er næsten det samme, der sker under nedbremsningen af en hurtig, tung, elektrisk ladet partikel som en proton, der gennemtrænger



et materiale. Energitalet af det tunge projektil sker hovedsageligt – analogt med billard-tilfældet – gennem mange små energioverførsler til elektronerne i det materiale, projektilet gennemtrænger.

Overførslen af energi til elektroner – og derfor energitabet for projek-

tillet – oprinder fra den elektriske vekselvirkning mellem protonen og elektronerne. En hurtig udledning af en partikels vekselvirkning ind i et materiale viser, at partiklen hovedsageligt mister energi ved lave hastigheder, hvilket forklarer energiafsætningen i form af en Bragg-top.

Illustration af proton, som bevæger sig igennem elektronskyen omkring et atom med mulighed for at løsrive elektroner gennem elektriske vekselvirkninger.

opbygge en dosisfordeling, som er koncentreret til selve kræfttumoren og som ikke belaster det omkringliggende væv.

Den koncentrerede og præcist leverede dosis er således fordelene ved partikelterapi, men det er samtidig en af de største udfordringer. Når man meget præcist ved hjælp af energien af protonerne kan styre, hvor den største dosis afsættes i kroppen, bliver det desto mere vigtigt, at man kender tumorens placering med stor nøjagtighed og mængden af materiale på vejen ind til den. Ellers kan det betyde, at den store dosis bliver afsat i raskt væv i stedet for i tumoren. Det giver nogle begrænsninger for, hvilke typer kræft der med fordel kan behandles med partikelstråling. Hvis tumoren befinder sig i lungerne, vil den konstant ændre placering, når patienten trækker vejret, mens tømning/fyldning af et hulrum (eksempelvis en tarm) vil betyde, at en passerende stråle vil stoppe i en anden dybde end beregnet. Der bliver derfor forsket i forskellige teknikker, der kan korrigere for disse bevægelser og forandringer, så man eksempelvis kan ændre dosisplanen undervejs i stråleforløbet (såkaldt adaptiv strålebehandling).

Teknik med endnu uforløst potentiale

Partikelterapi har altså åbenlyst potentiale for at give en mere skånsom strålebehandling, men den øgede præcision giver udfordringer med at sikre, at dosis afsættes i svulsten. Dertil kommer, at det kræver et acceleratoranlæg (og tilhørende bygning) af en anselig størrelse med deraf følgende høje etableringsomkostninger og krav til den nødvendige ekspertise. Det er derfor forståeligt, at partikelterapi har haft et langt tilløb til at blive et etableret behandlingstilbud.

Startskuddet til partikelterapien tilskrives således ofte den amerikanske fysiker Robert Wilson, som i 1946 beskrev det terapeutiske potentiale ved nedbremsning af protoner. De første behandlinger med protoner fandt sted ved Lawrence Berkeley Laboratory i 1954, og i årene efter blev der også forsøgt med tungere kerner. Det var behandlinger, som foregik som sekundære aktiviteter i fysikforskningsmiljøer, hvor acceleratorene alligevel var tilgængelige. Et anlæg i et klinisk hospitalsmiljø blev først taget i drift i 1990, mens det første rent kommercielt producerede anlæg blev taget i drift i 2001 på

Massachusetts General Hospital.

Denne historisk begrænsede adgang til partikelterapi betyder også, at partikelterapi er en teknik, hvis fulde potentiale endnu ikke er udfoldet, afprøvet og undersøgt. Partikelterapi er i høj grad en tværfaglig disciplin, og Dansk Center for Partikelterapi har med sin nationale forankring og indlejring i et stort universitetshospitalsmiljø en enestående mulighed for at bidrage til såvel kliniske studier som fundamentale radiobiologiske eksperimenter. Sidstnævnte vil foregå i det særlige forskningsrum, som ikke har det store roterende gantry, som patienterne ligger i, men et horisontalt strålerør. I dette forskningsrum bliver der faciliteter til studier af protonstrålers radiobiologiske effekter, for eksempel i tumormodeller på mus.

Når centeret i løbet af et par år får etableret den fulde behandlingsskapacitet på op mod 1200 patienter om året, vil mange forskellige kræfttyper med gavn af partikelterapi kunne behandles. Særligt vil børn og unge med kræft, som i dag sendes til behandling i USA, kunne tilbydes et forløb, som er væsentligt mindre belastende for familiernes hverdag. ■

Supplerende læsning
Nyvang, L., Petersen, L., Seiersen, K., og Staunum, P.F.: *Hospitalsfysik – stråleterapi og nuklearmedicin*, Fysikforlaget 2018.

Bræmer-Jensen, P., & Uggerhøj, U. I. (2017). *Protonterapiens fysik – en kort udledning af Bragg-kurven og dens top*. Kvant, 28(2), 13–17.

Søndergaard, C. S. (2016). *Strålebehandling med partikler*. Kvant, (2), 28–31.

Knudsen, H., Bassler, N., Möller, S.P. og Uggerhøj, U.: *Antipartikler mod kræft*, Aktuell Naturvidenskab nr. 6, 2006

Riis, M.V., *Dansk viden bag ny kræftbehandling*. Aktuell Naturvidenskab nr. 4, 2005.

Online undervisningsmateriale om medicinsk anvendelse af partikel-acceleratorer ved Lars Hjorth Præstegaard, AUH: www.coursera.org/learn/medical-applications-particle-accelerators

Om forfatterne



Theresa Louise Boye¹ er ph.d.-studerende på Kræftens Bekæmpelse. Arbejder med cellestudier af membranreparation, modelmembraner og rekombinant fremstilling af Annexiner.



Martin Berg Klenow² er ph.d.-studerende ved Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, SDU. Arbejder med modelsystemer for membranreparation.



Jesper Nylandsted¹ er leder af Membrane Integrity Group på Kræftens Bekæmpelse. Forskning i mekanismer for membranreparation og nye behandlingsformer for kræft, som udnytter disse mekanismer.



Adam Cohen Simonsen² er lektor ved Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, SDU. Forskning i membrans fysik og udvikling af modelsystemer til at undersøge membranrelaterede mekanismer i celler.

1) Membrane Integrity Group, Kræftens Bekæmpelse, Center for Kræftforskning, København.
www.cancer.dk/research

2) Institut for Fysik, Kemi og Farmaci (FKF), Syddansk Universitet (SDU).
www.sdu.dk/da/om_sdu/institutter_centre/fysik_kemi_og_farmaci

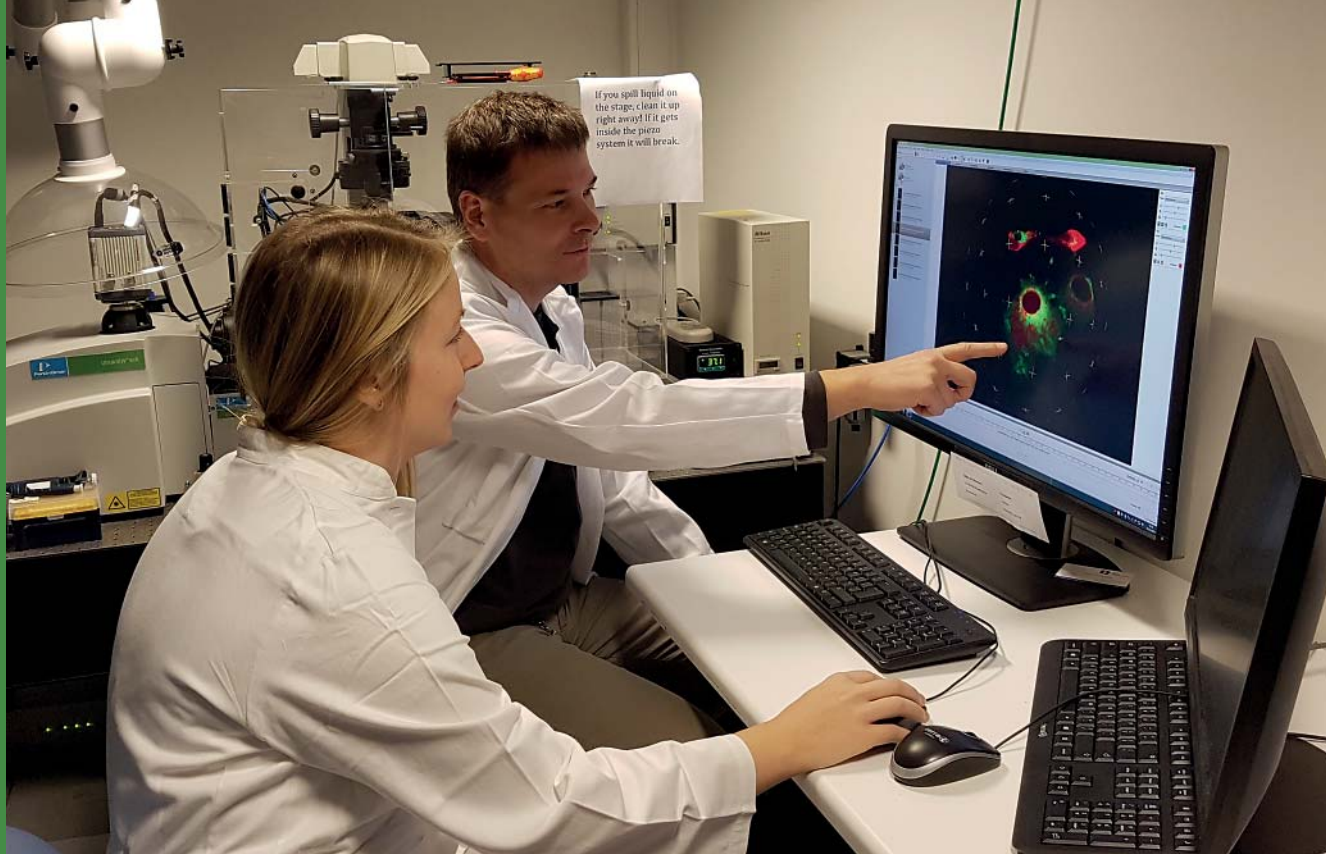


Foto: Stine Lauritzen Sønder

KRÆFTCELLER OVERLEVER VED AT BØJE CELLEMEMBRANEN

Kræftceller er meget robuste overfor skader, f.eks. reparerer de selv huller i deres cellemembran. Det er en af grundene til, at kræft effektivt kan sprede sig. Forskerne er nu kommet nærmere en forståelse af, hvordan reparationsprocessen i celler foregår på nanoskala. På sigt kan det føre til mere effektiv behandling.

Biologiske celler er omgivet af en plasmamembran, som adskiller dem fra omgivelserne. Det er en forudsætning for liv, som vi kender det. Plasmamembranen består af en blød film af fedtstoffer med en tykkelse på kun to fedtmolekyler eller cirka 5 nanometer. En nanometer er en meter delt med en milliard.

Hvis plasmamembranen bliver beskadiget, er det nødvendigt for cellen, at skaden repareres på få sekunder. Ellers dør den, fordi den ikke kan opretholde sin unikke sammensætning, hvis den er utæt. Skader på membranen kan opstå ved påvirkninger fra det omgivende væv og forekommer særlig ofte i celletyper, som er meget aktive og dynamiske. Det gælder eksempel-

vis mange kræftformer. Anlægget for at reparere huller findes også i normale celler, men kræftceller har udviklet en særlig "superkraft" til at reparere membranskader. Hvis vi kan forstå, hvordan de gør det, åbner det i princippet mulighed for at udnytte den viden til sygdomsbehandling. Og med et nyt forsknings-samarbejde mellem Kræftens Bekæmpelse og Syddansk Universitet

er den forståelse nu kommet et skridt nærmere.

Cellemembraner er simple og sofistikerede

Membraner findes overalt i celler. Plasmamembranen afgrænser cellen mod omgivelserne, og inde i cellen definerer membraner en lang række organeller. Organeller er strukturer i cellen med særlige funktioner, f.eks. mitokondriet, som er cellens "kraftværk".

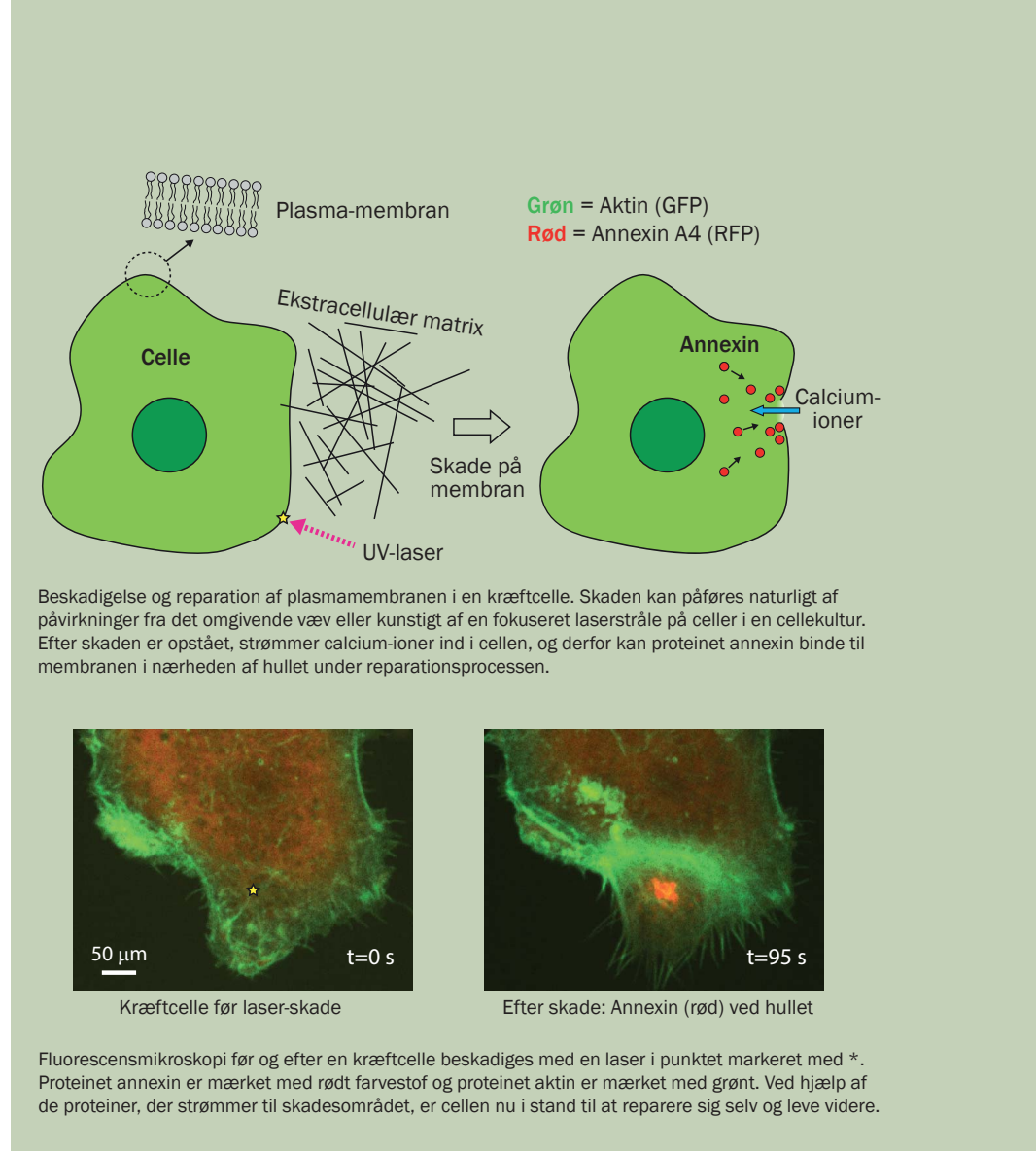
Selvom cellemembraner er yderst komplekse og består af mange dele, så er den basale struktur simpel: En film bestående af fedtstoffer som spontant samler sig til et dobbeltlag i vand. Selvsamlingen skyldes, at fedtmolekylerne er amfifile, dvs. den ene del af molekylet kan binde til vand (hydrofil), mens den anden ende skyr vandet (hydrofob). I dobbeltlagets struktur har den hydrofile del af fedtmolekylerne kontakt med vandet, mens den hydrofobe del er skærmet fra vandet.

Plasmamembranens opgave er dog ikke kun at isolere cellens indhold fra omgivelserne, men i lige så høj grad at sørge for en kontrolleret transport af molekyler og signaler ind og ud af cellen. Denne transport foregår ved hjælp af mange tusinde forskellige proteiner i cellemembranen, som er specialiseret til hver deres opgave.

Hvis der går hul på plasmamembranen, forstyrres cellens kemiske balance, og det fører hurtigt til, at cellen dør, hvis skaden ikke udbedres. Men i mange tilfælde kan celler reparere selv ret store skader på membranen og leve videre. Studiet af membranreparation er et voksende felt, men fortsat relativt nyt. Men den forskningsmæssige interesse er stor, da processen spiller en væsentlig rolle i en lang række sygdomme.

Selvlysende farvestof afslører reparationsproteiner

Tidligere mente mange forskere, at huller i cellemembranen spontant lukker sig selv, da membranen er



en blød og selvsamlet struktur. I dag ved vi, at sådan spontan reparation formodentlig kun er relevant for meget små huller på få nanometer. For større skader har celler udviklet avancerede processer til at reparere huller, og forskningen er i disse år kommet nærmere en forståelse af de basale mekanismer. Problemet er grundlæggende tværfagligt og kræver bl.a. samarbejde mellem cellebiologer og biofysikere.

En afgørende metode til at få viden om membranreparation er at studere, hvordan individuelle celler i en cellekultur reagerer, når de udsættes for en kontrolleret form for skade. En cellekultur består af celler udenfor deres naturlige omgivelser, som er dyrket i et kunstigt vækstmedie.

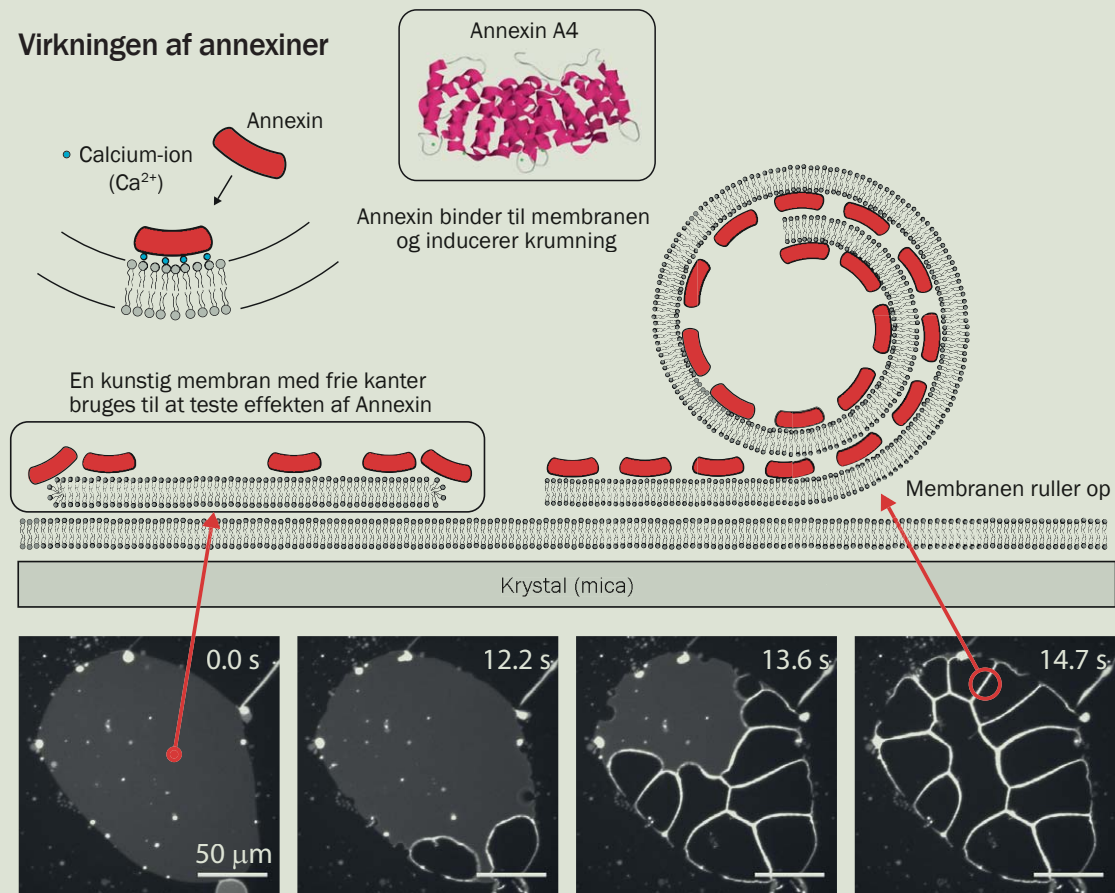
Vi har filmet cellers reaktion på en skade i et fluorescensmikroskop,

hvor vigtige molekyler er markeret med fluorescerende, dvs. selvlysende, farvestof. Herved kan vi følge med i, hvordan reparationsmolekylerne bliver omfordelt i cellen efter en skade.

Når en kræftcelle under mikroskop bliver beskudt med en kraftig, fokuseret laserstråle, opstår et hul i plasmamembranen på få mikrometer. Efter ganske få sekunder ser vi, at et protein ved navn annexin A4 (farvet rødt) bliver koncentreret omkring skaden. Lidt senere bliver også proteinet aktin (farvet grønt), som indgår i cellens skelet, koncentreret. Med de særlige proteiner, der strømmer til skadesområdet, er cellen nu i stand til at reparere sig selv og leve videre.

Ud fra forsøget ved vi derfor, at flere proteiner i annexin-familien er involveret i membranreparation.

Virkningen af annexiner



Øverst: Kunstige membraner kan benyttes til at teste virkningen af annexiner under kontrollerede forhold. Annexin binder til membraner med negative ladninger ved hjælp af calcium-ioner. Når det binder, medfører annexin en "spontan krumning" i membranen – det vil sige, at membranen har lavere energi, hvis den er bøjet. En flad membran-ø på et fast underlag reagerer derfor på binding af annexin ved at rulle op.

Nederst: Film optaget med fluorescens-mikroskop, som viser den gradvise oprulning af en membran-ø inden for få sekunder. Rullerne er de lyse bånd, som starter forskellige steder på kanten af membran-øen og til sidst transformerer membranen til et skeletlignende mønster af ruller.

Annexiner kan binde til membraner, når der er calcium-ioner (Ca^{2+}) til stede, og en skade på plasmamembranen medfører netop, at calcium strømmer ind i cellen udefra. Men det store spørgsmål er, præcis hvilken virkning annexiner har på membraner, og hvad mekanismen er for reparationen. Her viser det sig, at forsøg med kunstige membraner kan give nogle af svarene.

Membran-sandwich tillader forsøg

For at komme nærmere, hvordan annexiner påvirker membraner, har vi designet et kunstigt system, som efterligner vigtige forhold i en celle under reparationen. Når der går hul på plasmamembranen, opstår en fri kant i membranen. Denne frie kant

er sandsynligvis en vigtig struktur i reparationsprocessen.

Hvis man forsøger at lave en fritstående kugleformet membran, en såkaldt vesikel, med et hul, viser det sig dog hurtigt, at membranen er ustabil. Vesiklen går i stykker – lidt som en sæbeboble, der springer. Det skyldes, at frie kanter i membraner har en høj energi, som giver anledning til en kraft langs kanten af hullet. Kraften kaldes en linjespænding.

I stedet anbragte vi membranen på en overflade, som stabiliserer membraner med frie kanter. Nærmere bestemt benytter vi et dobbelt membransystem af flade "membran-øer", som ligger ovenpå en anden membran, der så igen

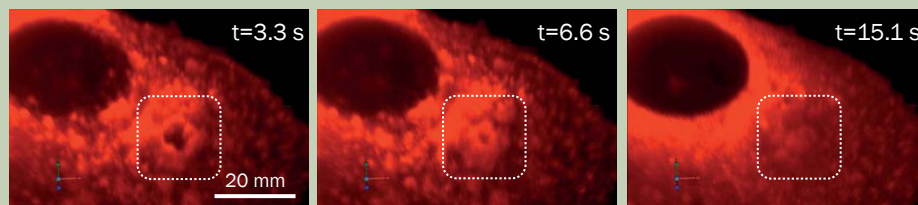
er stabiliseret af overfladen på en krystal. Virkningen af denne membran-sandwich er, at membran-øerne bliver holdt fast på overfladen af så tilpas svage kræfter, at de stadig opfører sig som fritstående membraner, men samtidig er så stabile, at det er muligt at lave forsøg med dem. Kanten af membran-øen efterligner kanten af et hul. Systemet kan derfor benyttes til at studere, hvordan annexiner virker nær huller i plasmamembranen.

Selve den kunstige membran består af de to fedtmolekyler POPC og POPS. POPS er nødvendigt, for at annexin kan binde. Når de kunstige membran-øer bliver udsat for annexin A4, sker det specielle, at membranen i løbet af ganske få sekunder ruller sig sammen.

Øverst: Efter annexin har bundet, krummer membranen og danner en karakteristisk krave-struktur omkring hullet. Den frie kant i membranen langs randen af hullet giver anledning til en såkaldt linjespænding langs kanten. I en simpel model vil krumningen og linjespændingen tilsammen definere formen af kraven.



Nederst: 3-dimensionel fluorescens-mikroskopi viser dannelsen af en kortlivet krave-struktur i en kræftcelle under en succesfuld reparationsproces.



Processen starter fra de frie kanter. Det minder om et gulvtæppe, som rulles sammen, bortset fra at her er der tale om et blødt, selvsamlet materiale med en tykkelse på 5 nanometer.

I eksperimenterne kan vi se, at oprulningen starter flere steder langs kanten af membran-øen, og at rullerne til sidst mødes i lange, lysende bånd. Vi har eftervist, at processen rent faktisk er en rulning og ikke en anden form for ændring i membranens struktur. Dette er bl.a. gjort ved at måle tykkelsen af rullerne med teknikken Atomar Kraftmikroskopi (AFM), som kan "se" formen af strukturer i membraner på nanoskala.

Reparation starter med en krum kant

Vi fortolker rulle-forsøgene sådan, at når annexin binder til overfladen af en membran, bliver der induceret en såkaldt 'spontan krumning'. Det betyder, at membranen kan opnå en lavere energi ved at være krum end ved at være flad. Det er velkendt, at mange proteiner og biomolekyler kan få membraner til at bøje ved at inducere spontan krumning, når de binder.

Årsagen til, at annexin A4 medfører bøjning af membraner, er formodentlig, at proteinet har form som en krum skive, hvor den konvekse del af molekylet - altså den overflade, der buer udad - binder til over-

fladen af membraner, når der er calcium-ioner tilstede. I mennesker findes der 12 forskellige proteiner i familien af annexiner, der alle indeholder et såkaldt 'core-domæne' med form som en krum skive, som kan binde til membraner. Derfor er det naturligt at forvente, at alle annexiner kan få membraner til at bøje. Det er da også konklusionen fra vores forsøg med kunstige membran-øer, hvor vi har testet flere medlemmer af annexin-familien.

Hvordan skal man så oversætte resultatet af modellforsøgene til forholdene i en celle? Forsøgene med kunstige membran-øer fortæller os, at annexiner virker ved at få membraner til at bøje i nærheden af frie kanter svarende til kanten af et hul i plasmamembranen.

Hvis vi betragter geometrien af et cirkulært hul, så medfører en spontan krumning af membranen i nærheden af hullet, at der bliver dannet en karakteristisk "krave-formet" struktur udenom hullet. Den førnævnte linjespænding, som virker som en slags elastik langs kanten af hullet, modvirker dannelsen af en krave. Den endelige form af krave-strukturen er derfor en balance mellem linjespændingen og den spontane krumning. Ved hjælp af en teoretisk model for bøjning af membraner har vi eftervist, at annexin rent faktisk kan danne en kraveformet struktur uden om et hul.

Forståelse bringer kræftforskningen fremad

Vores resultater tyder på, at krumning af membranen udenom et hul udgør det første trin i cellens reparations-system. Ved hjælp af 3D-fluorescensbilleder af celler under reparation har det også været muligt direkte at fange denne kortlivede kravestruktur i en levende celle.

Den endelige lukning af hullet sker formodentlig ved, at kraven indsnævres og til sidst bliver afsnøret. Vi ved, at bl.a. endnu et protein kaldet annexin A6 er involveret i denne proces - forventelig sammen med en række andre proteiner.

Vores resultater indikerer samlet, at krumning spiller en afgørende rolle i membranreparation, men det er samtidig også er klart, at processen endnu ikke er fuldt forstået. Vi arbejder derfor i øjeblikket på at afdekke flere aspekter, eksempelvis ved hjælp af nye slags modellforsøg og computersimuleringer af membraner.

Hvis vi til sidst fuldt ud forstår, hvordan reparationsmekanismen virker, så åbner det i princippet mulighed for at udnytte den viden til sygdomsbehandling. Det er ikke umuligt at forestille sig, at der i fremtiden udvikles lægemidler, som f.eks. kan hæmme reparationsmekanismen i kræftceller, så de dermed bliver mindre modstandsdygtige overfor andre typer af behandling. ■

Yderligere læsning
"Annexin A4 and A6 induce membrane curvature and constriction during cell membrane repair". T.L. Boye, K. Maeda, W. Pezeshkian, S. L. Sønder, S.C. Haeger, V. Gerke, A. C. Simonsen, J. Nylandsted. Nature Communications 8: 1623 (2017), DOI: 10.1038/s41467-017-01743-6

"Annexins induce curvature on free-edge membranes displaying distinct morphologies" T. L. Boye, J. C. Jepsen, K. Maeda, W. Pezeshkian, V. Solovyeva, J. Nylandsted, A. C. Simonsen. Scientific Reports 8:10309 (2018), DOI:10.1038/s41598-018-28481-z

Projektet er finansieret af Danmarks Frie Forskningsfond (DFF).

VARM SOMMER MED UVENTEDE KONSEKVENSER FOR VANDMILJØET

Forfatterne



Kaj Sand-Jensen er professor, ksandjensen@bio.ku.dk



Kenneth Thorø Martinsen er videnskabelig assistent, kenneth.martinsen@bio.ku.dk



Theis Kragh er lektor, tkragh@bio.ku.dk

Alle ved Sektion for Ferskvandsbiologi, Biologisk Institut, Københavns Universitet.

Den ekstreme sommer i 2018 medførte udbredt udtørring og iltsvind i vandområder i Norden. Det har gjort det tydeligt, at der eksisterer hidtil undervurderede trusler mod de ferske vandes kvalitet som følge af de klimaændringer, vi kan forvente i fremtiden.

Sommeren 2018 blev ekstrem tør og rekordvarm. Det udløste overraskende og voldsomme konsekvenser såsom uset tørke på markerne, i villahaverne og i naturen, nødslagtning af kreaturer og store miljøproblemer i damme, søer og vandløb. I tal endte middelnedbøren helt nede på 27 mm om måneden i maj-juli sammenlignet med 56 mm i 30-årsnormalen i 1961-1990. Og middeltemperaturen blev hele 3 grader højere end 30-årsnormalen.

Vi gik ind i forsommeren med en forventning om, at vi kunne gennemføre vore studier som planlagt og lidet anende, at vejret ville kuldaste al forudgående planlægning.

I de seneste år har vi studeret stofomsætningen i damme på Øland i Sverige. Denne sommer skulle vi vurdere betydningen for planternes fotosyntese af den daglige udfældning og genopløsning af kalk. I den store Filsø ved Varde skulle vi bare gennemføre den årlige opgørelse af fiskebestandenes sammensætning, mens de mange automatiske sensorer løbende overvågede søens miljøtilstand.

Men sommerens vejrrekord ændrede alt. Vi blev mindet om, at der eksisterer undervurderede trusler mod de ferske vandes kvalitet som følge af klimaændringerne. Varme og tørke øger risikoen for både udtørring og øget frigivelse af driv-

husgasser fra dammene. Og varme og tørke afbrudt af skybrud øger risikoen for pludselig iltsvind i søer og vandløb.

Udtørrende damme

Da vi nåede frem til Øland først i juni, kunne det umuligt blive "business as usual". Den varme og tørre maj havde enten udtørret vores undersøgelsesdamme eller blot efterladt 10-15 cm vand. Denne situation skabte nye muligheder for at sammenligne det ekstreme med det normale fra tidligere år.

Med den lave vanddybde nåede vandtemperaturerne i dagtimerne op på 30 grader. De sammenpresede planter havde sværere ved at



↑ Tørken i sommeren 2018 slog særlig hårdt igennem på Øland, som det fremgår af satellitfotos i 2018 (til venstre) sammenlignet med året før. Foto fra Landsat 8, USGS Earthexplorer.

← Delvis udtørrende damme og søer er generelt et stigende fænomen. Det omfatter nu næsten alle vandområder på Øland på nær den dybe sø Hornsjön. På fotoet ses en udtørrende dam på Øland juni 2018. Indsat foto: en lille gedde har overlevet på det lave vand. Fotos: Theis Kragh.

udføre fotosyntese og producere ilt og var begyndt at henfalde. Den normale, regelmæssige iltudvikling over døgnnet i overfladevandet var afløst af springende iltværdier, ofte meget lave eller nul, på grund af manglende opblanding af vandet i den tætte vegetation. Kun meget tolerante dyr og planter overlever hyppige iltsvind og vandtemperaturer på 30 grader i sådanne ekstreme miljøer.

Det er ganske vist ikke usædvanligt, at lavvandede damme tørrer ud hen på sommeren. Frøer, salamandre, insekter og damrødder er alle tilpasset til situationen og forlader den udtørrende dam som voksne individer eller overlever i dammen som æg eller andre modstandsdygtige stadier i sedimentet. Men i 2018 skete udtørringen allerede i foråret eller forsommeren. De store mose-snegle, som ellers er meget robuste og kan klare sig i nogle dage uden ilt, var allerede døde, da vi ankom. Fiskene overlever heller ikke iltsvind

og udtørring af dammene. Derfor undgår haletudser og de fleste insekter at blive ædt af fisk, omend salamandre og store insekter rykker op som toprovdyr og i et vist omfang overtager fiskenes plads.

Hyppigere udtørring og mindsket vanddækning er et tiltagende fænomen i det stadigt varmere klima ikke bare på Øland men på hele Jorden. Allerede nu er 0,81 millioner km² (29 %) sæsonmæssigt udtørrende områder, sammenlignet med 2,78 million km² permanente ferske vande på globalt plan. Med forudsigelsen af varmere og tørrere somre og vådere vintre og forår i Norden, kan vi forvente, at betydningen af vekslen mellem udtørring og vanddækning i fremtiden vil stige og omfatte en stadig større del af vandområderne.

Vand i tankbiler

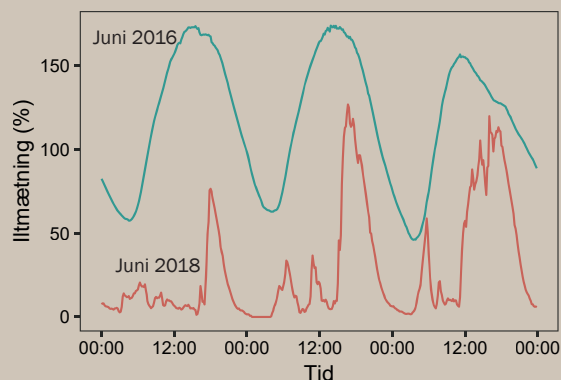
På Øland står grundvandet rekord-lavt, og de store fladvandede søer på de 85 km² store udyrkede kalk-

flader ("Store Alvaret") udtørres i stigende grad om sommeren, hvis de ikke allerede er blevet permanent tørre, for den stigende vinternedbør er i de senere år gået uden om Kalmar og Øland, der ligger i regnlæ af det smålandske højland.

Det sænkede grundvandsniveau er ikke blot vigtig for naturen på Øland, men også for landbruget. Vandforbruget i det ølandske landbrug til markerne og mælkeproduktionen er stort og stigende. En malkeko drikker omkring 100 liter vand om dagen. Siden 2016 er der i sommerperioder blevet kørt 1000 m³ vand om dagen i tankbiler fra fastlandet til Øland. En meget dyr og energikrævende løsning. En permanent forsyningslinje over Kalmarsund med samme kapacitet blev etableret i juni 2018. Allerede i 2017 blev et anlæg til afsaltning af havvand taget i brug på nord-Øland, og et tilsvarende anlæg skal stå klar på syd-Øland i 2019 med en

Når dammen tørrer ud

Lav vandstand i dammene på Øland førte til høje vandtemperaturer og mere vekslende iltindhold sammenlignet med de samme damme med højere vandstand i tidligere år. Lavt iltindhold eller total iltsvind sammen med høje vandtemperaturer skaber et voldsomt stress, som de færreste organismer overlever. Figuren viser iltindholdet i samme dam over tre døgn med lav vandstand i juni 2018 (rød kurve) sammenlignet med ved højere vandstand i juni 2016 (blågrøn kurve).



Når dammene tørrer helt ud, og sedimentet eksponeres til luftens ilt, øges nedbrydningen af organisk stof og frigivelsen af CO₂ til luften, så længe sedimentet er fugtigt. Frigivelse af CO₂ fra dammenes overflade både ved høj og lav vandstand er således meget lavere end fra de lufteksponerede fugtige sedimenter. Figuren viser frigivelsen af CO₂ til luften fra dammens overflade (-1 m) og fra de lufteksponerede sedimenter i stigende afstand fra vandkanten (brune punkter). Vandindholdet i sedimenterne er vist med blå punkter.

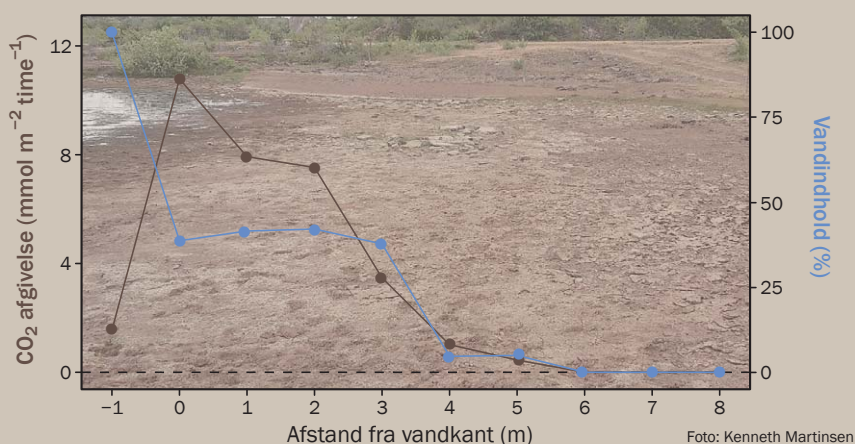


Foto: Kenneth Martinsen

daglig kapacitet på 3000 m³. Det er altså Sverige 2018 og ikke landene på den arabiske halvø. Det er et åbent spørgsmål, om vandressourcen rækker til at fortsætte den nuværende landbrugsstruktur på Øland.

Som tørken blev værre og værre i løbet af sommeren, udbrød der store skovbrande i Sverige, noget uhørt for Norden, mens vi er vant til at læse om naturbrande i Sydeuropa, Californien og Australien.

Udtørring kan give mere drivhusgas

Vekslende udtørring og vanddækning i søer, damme og vådområder påvirker ikke blot organismene. Disse fænomener er også vigtige for omsætningen af organisk kulstof og dermed for frigivelsen af drivhusgasserne CO₂ og metan til luften.

I søer og damme med permanent vandfyldning sker der en løbende ophobning af organisk stof i bun-

den. Både gamle og nyanlagte søer er effektive til at parkere organisk kulstof i søbunden. Ophobningen er betinget af, at der sædvanligvis er iltfrit i de vanddækkede sedimenter, idet fraværet af ilt hæmmer bakteriernes nedbrydning af det organiske stof.

Da dammenes sedimenter som følge af udtørringen var blevet eksponeret til luftens ilt, kunne vi på de udtørrende sedimentflader måle, at nedbrydning af organisk stof til CO₂ var ti gange højere end under vand. Det varer ved, indtil det blotlagte sediment er tørret ud, og bakteriernes omsætning går i stå. Hvis vi antager, at de lufteksponerede sedimenter holder sig fugtige i blot 17 dage om sommeren, eventuelt på grund af perioder med regn, så vil nedbrydningen af det organiske stof i det lufteksponerede sediment modsvare hele ophobningen af organisk stof under vand i dammen i resten af året. Det samme forhold finder vi sandsynligvis i andre lav-

vandede vandområder rundt om i verden, hvor vandstanden kan veksle kraftigt over tid. Søers og dammes evne til at fjerne kulstof fra kredsløbet kan altså mindskes eller helt forsvinde, hvis de i fremtidens klima i stigende omfang tørrer ud.

Iltsvindskatastrofe i Filsø

Senere på sommeren nåede vi frem til endnu en øjenåbner, denne gang den 6. august i Søndersø, der er sydbassinet i Filsø. Da båden gled ud på den 25 grader varme, spejlblanke sø, lå der døde fisk overalt, flydende rundt i overfladen eller opskyllet på bredderne. En optælling viste, at de fleste store gedder og aborrer var døde, mens nogle småfisk havde overlevet på ganske lavt vand. Op mod 80 % af fiskebiomassen var gået til. Hvad pokker var der sket?

Normalt blæser det ved Filsø, og krappe bølger kruser næsten altid overfladen i den lavvandede sø, hvis middeldybde blot er 1,3 m.



Løbende iltmålinger på to faste stationer i Søndersø havde der- for indtil sommeren 2018 aldrig tidligere vist mindre end 70 % iltmætning. Vejrdata, vandtil- førsel, vandets temperatur og iltindhold fra faste stationer samt indholdet af organisk stof i vandprøver indsamlet hver 10. dag dannede grundlag for vores arbejde med at afdække års- agerne til fiskedøden.

I en lang tør, varm og stille perio- de med begrænset iltudveksling med luften forud for iltsvindet og fiskedøden svingede iltmæt- ningen i søvandet mellem 70 % om natten og maksimalt 170 % om dagen. Vandmasserne blev opblan- det ved afkøling og nedsynkning af overfladevandet hver nat, og iltmæt- ningen på dybeste sted (3,35 m) var trods det varme og stille vejr over 50 %; først under 20-40% opstår der problemer med fiskenes overlevelse. Altså tilsyneladende fred og ingen fare for, at pludselig opblanding



En prøve af vandet fra Søndersø den 8. august viser tydeligt den voldsomme brunfarvning af vandet.

Foto: Jan Skriver.

af det begrænsede volumen af bundvand kunne skabe iltproblemer i søen. Opblanding af bundvandet skete jo allerede hver nat.

Skybrud og organisk stof var synderen

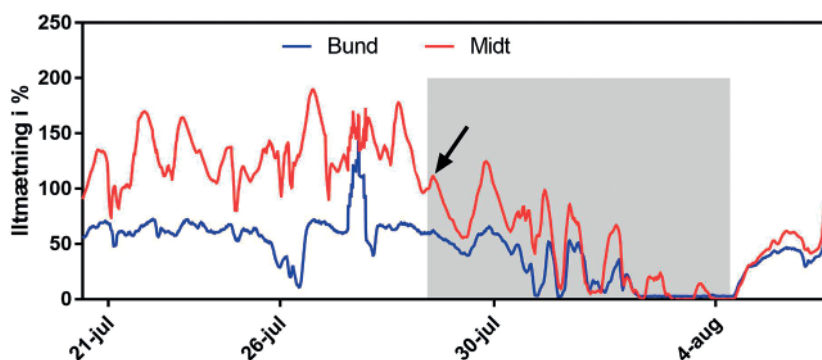
Vores undersøgelser viste derimod, at kilderne til iltsvindet skulle sø- ges i det store opland. Efter kraftig

nedbør over oplandet den 28. juli skete der en pludselig og markant øgning af tilstrøm- ningen af vand til Søndersø, hvilket samlet over flere dage summerede op til cirka 20 % af søens vandvolumen. Det tilstrømmende vand øgede mængden af opløst organisk stof og brunfarvning af søvan- det med mellem 170 og 200 %. På samme tid steg iltforbruget i hele vandmassen med 2,5 gan- ge, og fytoplanktonets iltpro- duktion blev stærkt nedsat på grund af lysmangel i det brune vand. Det bakterielle iltforbrug i vandmasserne om natten steg så meget, at 80 % af indholdet i fuldt iltmættet vand kunne forbruges på otte timer. Øget bakterielt iltfor- brug i kombination med mindsket iltproduktion gennem fotosyntese, selvfølgelig forstærket af høje vandtemperaturer og den lave iltudveksling med luften, udløste totalt iltsvind og fiskedød i dagene 2.-4. august.

Fiskedøden i Filsø var massiv. Masser af døde fisk flød rundt i Søndersø mellem 28. juli og 4. august 2018. Foto: Theis Kragh



Siden iltsvindet i Søndersø er der foregået en betydelig indvandring af fisk fra Mellemsø, som ikke blev ramt af iltsvindet. Det drejer sig især om små skaller, som drager fordel af at kunne leve i fred for de store rovfisk som gedder og aborrer, der døde under iltsvindet og endnu ikke er genindvandret. Fotoet er taget 37 dage efter iltsvindet. Foto: Emil Kristensen.



Kraftig nedbør over Filsø den 28. juli medførte kraftig tilstrømning af brunt vand med let omsætteligt organisk stof fra det store opland til det sydlige bassin Søndersø. Brunfarvningen i søen og den samlede koncentration af organisk stof steg med 170-200 %. Det øgede iltforbrug i søvandet, den lavere iltproduktion ved fytoplanktonets fotosyntese som følge af brunfarvning og endelig den usædvanligt lave ilttilførsel fra luften i det stille, varme vejr udløste i de følgende dage totalt iltsvind i hele vandmassen med udbredt fiskedød til følge. Figuren viser iltmætningen i overfladevand (rødt) og i bundvandet (blåt) i Søndersø i perioden før og efter iltsvindet i sommeren 2018.

Da det organiske stof var blevet nedbrudt og fotosyntesen igen kommet i omdrejninger, og vinden igen øgede iltudvekslingen mellem søen og luften, steg iltmætningen igen til 100 % og lagde den fatale hændelse bag sig. Havde vi ikke haft de løbende målinger og vandkemiske data, ville vi næppe have kunnet afdække årsagen til fiskedøden.

Vi har endnu ikke målinger af kilderne til det iltforbrugende og det brunfarvede organiske stof fra oplandet. Men vi har paralleller til dette hændelsesforløb fra denne sommer i blandt andet Lyngbygård Å og tidligere i Lindborg Å og Alling Å. Efter tørre perioder førte skybrud i alle tre vandløb til udsylning af mørkebrunt og iltforbrugende vand fra de omgivende tørvejorder med det resultat, at der opstod iltsvind i vandløbene

og fiskene flygtede eller døde.

Hidtil har vi især været opmærksomme på effekterne af nærings-tilførsler fra land til ferske vande og kystvande. Men nu kan vi se, at pludselige tilførsler af organisk stof fra oplandene også kan skabe problemer i forbindelse med varme, tørke og efterfølgende skybrud.

Klimaændringer og bæredygtighed

Vi er med sommerens studier blevet bevidste om, at der eksisterer undervurderede trusler mod de ferske vandes kvalitet som følge af klimaændringerne. Risikoen forstærkes af en uhenigtsmæssig omgang med vandressourcen og en pludselig afstrømning fra land.

Et overset forhold, man skal være

opmærksom på ved svingende udtørring og vanddækning af jorder samt ved etablering af nye søer, er risikoen for methanfrigivelse, da methan er en meget kraftigere drivhusgas end CO_2 . Vi har målt en kraftig methanfrigivelse i den første sommer i en nyanlagt sø ved Næstved. Frigivelsen af CO_2 fra den oversvømmede søbund i august svarede til 40 % af frigivelsen fra de lufteksponerede, men stadigvæk fugtige sedimenter omkring dammene på Øland. Men dertil skal så lægges methanfrigivelsen, som i kulstof var fem gange mindre end CO_2 fra de lufteksponerede sedimenter, men i drivhuseffekt var seks gange større. Methanfrigivelsen fra den nyanlagte sø er langt den højeste, vi har målt, og den klinger nok af i de efterfølgende år, hvorefter deponeringen af kulstof i sedimentet under vand igen bliver den dominerende proces.

Der er mange sociale, økonomiske og politiske aspekter af klimaaendringer. Men der er også mange og tilmed uudforskede økologiske og ressourcemæssige aspekter, eksempelvis som følge af øget udtørring og frigivelse af klimagasser. Vi fik med den tørre og varme sommer 2018 en forsmag på, hvad klimaforandringerne kan komme til at betyde, takket være nogle få igangværende forskningsprojekter, som gav os baggrundstal til sammenligning med den ekstreme sommer. Dermed har vi sat fokus på fænomener i naturen og i kulturlandskabet, som må undersøges nærmere. ■



MAKE IT REAL

Mere end 40 procent af verdens befolkning lever med vandmangel.

Med en science-uddannelse lærer du at forstå, hvordan mennesket, jorden og naturen hænger sammen. Med denne viden kan du gøre en forskel og forandre – både dig selv og verden omkring dig.

Science-uddannelserne på AAU dækker over mere end 20 forskellige uddannelser inden for fx matematik, fysik, kemi, sundhed, IT og teknologi. Du kan læse både i Aalborg og København.

LÆS MERE PÅ SCIENCE.AAU.DK

FAKTA I 2015 vedtog verdens lande med FN's 17 verdensmål en ambitiøs udviklingsdagsorden, som frem til 2030 sætter kurs mod en mere bæredygtig udvikling for både mennesker og natur. Mål nr. 6 handler bl.a. om universel adgang til sikkert og billigt drikkevand til alle.

Overgangsmetalkatalysatorer er vigtige i om-dannelsen af kvælstof til kunstgødning.
Foto: Colourbox.

Katalysatorer: SÅDAN SKABER FORSKERE FREMTIDENS KEMISKE VÆRKTØJER

Om forfatteren
Kristian Sjøgren er
videnskabsjournalist
ksjoegren@gmail.com



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

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

Danmarks Frie Forsknings-
fond dækker alle viden-
skabelige hovedområder
og uddeler hvert år godt 1
mia. kr. til forskningspro-
jekter baseret på forsker-
nes egne ideer. Danmarks
Frie Forskningsfond består
af 84 anerkendte forskere
udpeget på baggrund
af deres høje faglige
kompetence. Formand for
Danmarks Frie Forsknings-
fond | Natur og Univers
er professor ved Aarhus
Universitet, Lars Arge.
Læs mere på
www.dff.dk

**Dansk forskning i overgangsmetalkatalysatorer skal være med til
at skabe de værktøjer, som fremtidens medicinalindustri,
kosmetikindustri, plastindustri og mange andre industrier
skal bruge for at lave bedre produkter til
en verden med vokseværk.**

Overgangsmetalkatalysatorer... Ja, det et tungebrækkende ord, men selvom mange måske hverken føler sig klædt på til udtale ordet eller overhovedet forstå, hvad det dækker over, er overgangsmetalkatalysatorer nogle af de absolut vigtigste værktøjer i den organiske kemikers værktøjskasse. Det betyder også, at når de er vigtige for den organiske kemiker, er de også vigtige for dig, for mig og for hr. og fru Danmark. Overgangsmetalkatalysatorer er nemlig fundamentet under en stor del af den industri, der bærer

samfundsøkonomien i Danmark og mange andre vestlige lande.

Overgangsmetalkatalysatorer er en essentiel bestanddel af den organiske kemi, og den organiske kemi er nødvendig for at udvikle plastik, brændstoffer, lægemidler, gummi, kosmetik, rengøringsmidler, farvestoffer, landbrugskemikalier og mange andre ting, som vi som forbrugere i dag tager for givet. At forestille sig at lave eksempelvis lægemidler uden overgangsmetalkatalysatorer er som at forestille sig at bygge et hus uden en skrumaskine. Ja, det kan sikkert godt lade sig

gøre, men det vil unægtelig være mere besværligt, og man skal i den grad tænke kreativt. Uden den organiske kemi kan det slet ikke lade sig gøre.

Når det kommer til overgangsmetalkatalysatorerne i sig selv, er det ikke bare kemikalier, man hiver ned fra hylden i supermarkedet. De skal nøje designes til at assistere helt specifikke kemiske reaktioner, og netop designet af overgangskatalysatorerne forsker folk som professor Troels Skrydstrup fra Institut for Kemi ved Aarhus Universitet i.



A portrait of Prof. Dr. Gert H. Evers, a middle-aged man with light brown hair, wearing glasses, a blue checkered shirt, and a grey suit jacket. He is smiling at the camera against a blurred background of modern architecture.

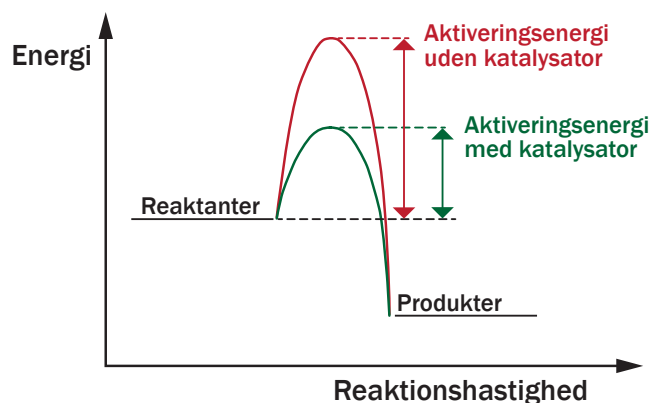
Det periodiske system over grundstofferne

[illegible]

Et overgangsmetal er et af de 38 grundstoffer i det periodiske system fra grupperne IIIB til IIB.
De er vist med turkis fave.



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK



Katalysatorerne sænker aktiveringsenergien, for at to molekyler kan reagere med hinanden. En katalysator indgår i den kemiske reaktion mellem reaktanterne uden selv at blive en del af det endelige produkt.

af 38 overgangsmetaller også får kemiske processer til at ske.

Lad os komme med nogle eksempler for at gøre det lidt mere konkret:

I medicinalindustrien er man storforbrugere af overgangsmetalkatalysatorer. Når lægemiddelfabrikanten skal designe nye lægemidler, bliver de hele tiden stillet overfor opgaven at få ét organisk molekyle til at blive til noget andet eller få to organiske molekyler til at danne et tredje. Her benytter de sig ofte af overgangsmetalkatalysatorer til at få processerne til at ske, så eksempelvis stofferne A og B bliver til stoffet C. Stoffet A kan i eksemplet være et stort molekyle med nogle interessante medicinske egenskaber, mens B kan være et mindre molekyle, som de syntetiske kemikere gerne vil klistre på A for at se, om det dermed kan noget nyt og endnu mere interessant. Det kan eksempelvis være, at det nye molekyle bedre binder til nogle receptorer i kroppen, så lægemidlet virker bedre. Modifikationer ved hjælp af organisk kemi og overgangsmetalkatalysatorer kan også få lægemidler til at have færre bivirkninger, få dem til at blive optaget hurtigere i kroppen eller gøre effekten af dem længerevarende. Det kan også være, at en kemisk modifikation er nødvendig for at gøre et lægemiddel stabilt nok til, at det kan indtages oralt og overleve turen gennem mavesyren.

Medicinalvirksomheden Lund-

beck bruger eksempelvis en del overgangsmetalkatalysatorer i produktionen af deres antidepressive lægemidler.

Et andet eksempel på brugen af overgangsmetalkatalysatorer er i omdannelsen af kvælstof til kunstgødning. Processen hedder Haber-Bosch-processen, hvori N_2 og $3H_2$ bliver til $2NH_3$. Heri indgår et af flere overgangsmetalkatalysatorer, som får den ellers naturlige proces til at forløbe hurtigere, så producenterne kan følge med efterspørgslen af kunstgødning. Det er anslået, at cirka halvdelen af alle proteiner i menneskekroppen indeholder nitrogen, som stammer fra Haber-Bosch-processen. Cirka en tredjedel af verdens befolkning er afhængige af mad, som kun kan produceres ved hjælp af kunstgødning.

»Det er blot to eksempler på områder, hvor overgangsmetalkatalysatorer spiller en vigtig rolle. Uden katalysatorerne ville verden slet ikke kunne understøtte de mange milliarder mennesker, der bor her. Derfor er det også nødvendigt at videreudvikle overgangsmetalkatalysatorerne, så de kan imødekomme fremtidens behov«, siger Troels Skrydstrup.

Sådan fungerer overgangsmetalkatalysatorer

Overgangsmetalkatalysatorerne er typisk metalkomplekser, hvor forskellige kemiske grupper er bundet til et metal. Det kan være svovlgrupper, kulstofgrupper eller fosforgrupper.

per. Afhængigt af de kemiske grupper sammensætning og placering i forhold til metallet får katalysatoren forskellige kemiske egenskaber. Det er dog vigtigt at pointere, at essensen i en katalysator er, at eksempelvis overgangsmetalkatalysatoren indgår i den kemiske reaktion mellem A og B, får dem til at danne C og derefter kommer ud af reaktionen i samme tilstand, som den gik ind i reaktionen med. Det vil sige, at man kan bruge katalysatoren igen. Den bliver ikke en bestanddel af slutproduktet.

I løbet af den kemiske reaktion kan katalysatoren flytte elektroner rundt mellem komponenterne i reaktionen, ligesom den kan danne kortvarige bindinger. Formålet med katalysatoren er at få reaktionen mellem A og B til at foregå hurtigere og uden et for stort spildprodukt. I de fleste kemiske reaktioner mellem A og B får man ikke bare C ud af det, men også spildproduktet D. En god overgangsmetalkatalysator efterlader så lille et D som muligt.

»Overgangsmetalkatalysatorerne sænker aktiveringsenergien, for at to molekyler kan reagere med hinanden. Selv komplekse processer kan på den måde komme til at kræve mindre energi, så de kan forløbe hurtigere. En af årsagerne til, at overgangsmetallerne er så gode til det her, er elektronerne i d-orbitalen, der er velegnede til at indgå i elektronoverførsler og hjælpe til med at få ting til at reagere med hinanden«, forklarer Troels Skrydstrup.

Guld som katalysator

Guld har først inden for det seneste årti fået sit gennembrud som katalysator i organisk kemi. At guld først er blevet bredt brugt som katalysator inden for det seneste årti, mens mange andre katalysatorer har været brugt i hundrede år, skyldes formentlig to ting.

For det første har forskere fejlagtigt troet, at guld ville være en dårlig katalysator. Guld er da også notorisk dårligt til at danne kemiske forbindelser, men på det seneste har forskere fundet ud af, at det alligevel har nogle særdeles velegnede egenskaber som katalysator i organisk kemi. Det er velkendt, at overgangsmetallers succes som katalysatorer er relateret til overgangsmetallets evne til at skifte mellem forskellige oxidationstrin for efter endt reaktion at skifte tilbage til sit oprindelige oxidationstrin. Guld kan forekomme i forskellige oxidations-

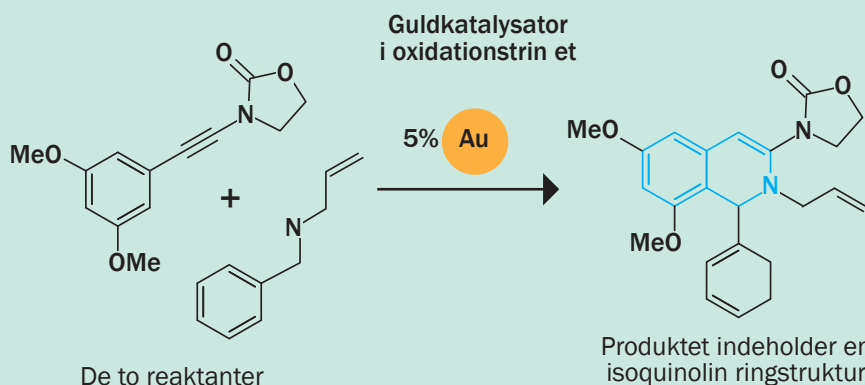
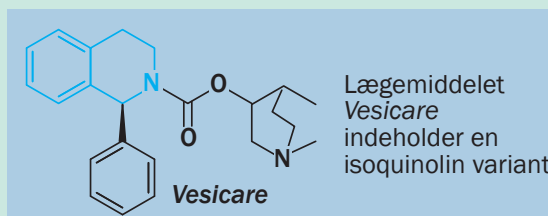
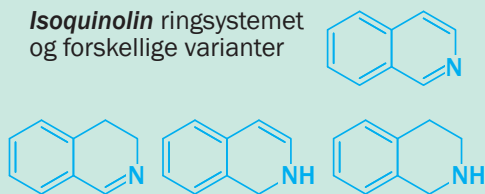
trin, og det seneste årti er forskere blevet opmærksomme på, at disse oxidationstrin kan udvise et bredt spektrum af kemisk reaktivitet.

Foruden den fejlslagene antagelse om gulds kemiske egenskaber, har der været en generel opfattelse af, at guld er både sjældent og dyrt, og derfor ikke før er blevet anvendt til katalyse. Det er dog en misforståelse, fordi der bliver udvundet meget mere guld, end der eksempelvis bliver udvundet andre katalyseovergangsmetaller, såsom palladium, platin og rhodium.

Over de seneste 10 år har en række forskningsgrupper verden over vist, at guldforbindinger kan anvendes til at katalysere en bred vifte af kemiske reaktioner. Guld har en bemærkelsesværdig egenskab til at katalysere syntesen af organiske forbindelser, som indeholder mange

ringsystemer, ud fra simple lineære strukturer. Denne egenskab er tiltalende, da mange lægemidlers struktur er bygget op omkring et skelet med flere organiske ringe, hvilket almindeligvis kræver mange syntetiske trin at konstruere. Med en guldkatalysator kan sådanne komplekse cykliske forbindelser fremstilles i blot et enkelt syntetisk trin. I udvikling af lægemidler vil gulds egenskaber som katalysator resultere i en øget adgang til relevante forbindelser, som lægemiddeludviklere kan undersøge for biologisk aktivitet, idet der kræves mindre tid til syntesen. Guld har derfor mange andre spændende egenskaber end blot at være et smukt skinnende metal. I andre oxidationstrin end nul er guld en fremragende genvej til kompleksitet i en verden, hvor der kræves stadigt mere af den kemiske diversitet for at muliggøre teknologiske fremskridt.

Isoquinolin ringsystemet og forskellige varianter



Et eksempel på en anvendelse af guldkemien

Troels Skrydstrup og hans forskningsgruppe publicerede i 2014 et eksempel på anvendelse af guldkemien i et studie, som omhandler fremstilling af heterocycliske ringsystemer ved navn isoquinolin. Denne ringstruktur og dets varianter findes i en del bioaktive molekyler, for eksempel lægemidlet Vesicare til behandling af

overaktiv blæresyndrom (OAB). Kendetegnet for disse guld-katalyserede reaktioner er, at simple og let tilgængelige udgangsstoffer kan bruges og samles ved tilstedeværelse af kun 5% katalysator. I det specifikke eksempel kan ringsystemet, som findes i Vesicare, fremstilles i kun ét trin.



Foto: Shutterstock.

Forskere laver organiske ringe til lægemiddelindustrien

Nu kommer vi så frem til Troels Skrydstrups egen forskning. Når forskerne fra Aarhus Universitet forsøger at finde nye overgangsmetalkatalysatorer, gør de det for at forfine kemiske processer, så de foregår hurtigere og med mindre spild. Nogle forbedringer er minimale, men alligevel gavnlige for de virksomheder, som benytter sig af overgangsmetalkatalysatorerne, mens andre kan være monumentale og måske tillade helt nye kemiske forbindelser. Det kan også være katalysatorer, der på helt nye måder danner givne molekyler, eller katalysatorer, som gør det samme som andre, men er billigere at lave. Generelt målretter forskerne fra Aarhus dog ikke deres forskning mod at løse specifikke problemstillinger omkring enkelte kemiske processer, men kigger i stedet på, hvad ændringer i overgangsmetalkatalysatorer kan gøre for specifikt medicinalindustrien og landbrugsindustrien.

I det omtalte forskningsprojekt har forskerne arbejdet med at udvikle guld-katalysatorer til at skabe heterocykliske ringe. Heterocykliske ringe er typisk molekyllære ringe

med mellem fire og syv kulstofatomer, hvor det ene kulstofatom typisk er byttet ud med noget andet. Det kan være kvælstof, ilt eller svovl. Derudover har de heterocykliske ringe påmonteret flere funktionelle kemiske grupper, som giver ringene deres egenskaber.

»Heterocykliske ringe er interessante, fordi de indgår i rigtig mange lægemidler. Man finder dem blandt andet i kræftlægemidler, lægemidler mod hjertekarsygdomme, kolesterolsænkende medicin, antibiotika og Viagra. Her giver de heterocykliske ringe lægemidlerne egenskaber, så de blandt andet binder til proteiner på bestemte måder, der øger effekten af dem,« forklarer Troels Skrydstrup.

Skaber værktøjerne til lægemiddelindustrien

Typisk, når forskerne fra Aarhus Universitet skal udvikle en overgangskatalysator og dertilhørende kemisk reaktion, benytter de som udgangspunkt et simpelt substrat eller simple reagenser uden meget funktionalitet. Derefter justerer de strukturen af guld-katalysatoren og ser, hvordan ændringerne modificerer funktionaliteten af katalysa-

toren og ændrer på de kemiske reaktioner mellem ingredienserne. På den måde er Troels Skrydstrup og hans kollegaer kommet frem til forskellige katalysatorer, som afstedkommer forskellige kemiske reaktioner med nogle interessante udgangsstoffer i form af heterocykliske ringe.

Man kan ikke sige, at forskerne designer molekyler, som man kan bruge til at lave det ene eller det andet specifikke lægemiddel. I stedet kan man se det på den måde, at de ved at beskrive overgangsmetalkatalysatorerne og deres funktioner får udviklet nogle værktøjer til at lave forskellige heterocykliske ringe. Det betyder, at kemikere i medicinalindustrien får nogle redskaber til at lave disse heterocykliske ringe, hvis de på et tidspunkt kommer til at skulle bruge dem i forskellige lægemidler.

»Står en lægemiddelvirksomhed en dag og skal bruge en bestemt heterocyklisk ring, som vi har arbejdet med, kan de se, hvordan de kan lave den med forskellige guld-katalysatorer,« fortæller Troels Skrydstrup.

Foruden at udvikle forskellige guld-katalysatorer har forskerne også

Overgangsmetalkatalysatorer har udløst tre Nobelpriser

Hele 3 gange inden for 10 år (2001 til 2010) har forskning i overgangsmetalkatalysatorer udløst en Nobelpris i kemi. Det understreger forskningsområdet betydning for samfundet, da nobelprisen ofte uddes til forskning, der har haft en indvirkning på verden. Grundforskning fra den akademiske verden har været en af de vigtigste drivkræfter bag de gennembrud, som den nobelprisvindende forskning er mundet ud i. Syv ud af ni modtagere af Nobelpriserne for forskning i overgangskatalyser er tilknyttet universiteter og ikke industrien.

2001: Asymmetriske metalkatalyserende reaktioner

Modtagere: William Knowles, Ryoji Noyori og Barry Sharpless.

Asymmetriske metalkatalyserede reaktioner er reaktioner inden for den organiske kemi, hvor slutproduktet kan bestemmes til at have én af to former. Organiske molekyler kan ofte eksistere i to former, der er hinandens spejlbilleder, og under normale omstændigheder er det ikke til at sige, hvilken af de to molekyler man får ud af en kemisk reaktion. Man kalder det for kiralitet. De to mulige produkter af en organisk syntese kan have

forskellige kemiske egenskaber, og derfor er kun den ene af dem ofte den eftertragtede, mens den anden er et spildprodukt. Nobelprisen i kemi i 2001 blev givet til forskere, som fandt ud af, hvordan de med metalkatalysatorer kunne skubbe den kemiske proces i retning af det ene eller det andet slutprodukt. Assymetrisk metalkatalyserende reaktioner har stor betydning inden for masseproduktion af organiske molekyler, eksempelvis i lægemiddelindustrien.

2005: Udvikling af metalkatalyserende metatase-reaktioner

Modtagere: Yves Chauvin, Robert Grubbs og Richard Schrock.

Metatase-reaktioner er en type af reaktioner inden for den organiske kemi, hvor forskellige kemiske grupper bytter plads. Reaktionerne og de dertilhørende metalkatalysatorer blev opdaget allerede i 1950'erne, men først i 1970'erne blev de beskrevet af Yves Chauvin. I 1990'erne lykkedes det at lave robuste ruthenium-baserede katalysatorer til metatase-reaktioner, der i dag er kommercielt tilgængelige. Metatase fører til dannelse af kulstof-kulstof-bindinger, hvilket er den vigtigste reaktion til opbygning af

organiske molekyler. Metatase-reaktioner har især vist sit værd ved syntese af ringformede forbindelser ud fra lineære molekyler. Metatase er stort inden for syntese af lægemidler og avancerede plastmateriale, fordi deres ofte kortere synteseruter med færre biprodukter end traditionelle processer fører til mere miljøvenlige produktionsmetoder.

2010: Opdagelsen af palladium-katalyserende kulstof-kulstof bindingsdannende reaktioner

Modtagere: Richard F. Heck, Ei-ichi Negishi og Akira Suzuki.

Bindingsdannende kulstof-kulstof-reaktioner er grundlaget for alt liv på Jorden. Gennem reaktionerne kan kulstofatomer bliver samlet til stadigt længere kulstofkæder og ringe, der udgør skelettet i alle organiske molekyler uanset længde, størrelse og form. Forskning i kulstof-kulstof-reaktioner er af allerhøjeste betydning og har tidligere udløst fire nobelpriser (1912, 1950, 1979 og 2005). Nobelprisen i 2010 gik til tre forskere, der havde pioneret forskningen i palladiumkatalyserede kulstof-kulstof-reaktioner, som i dag er en af hjørnestenene i den organiske syntese-kemi.

fundet ud af, at de i flere processer omkring konstruktionen af forskellige heterocykliske ringe faktisk slet ikke har brug for guldkomponenten i katalysatoren.

»Desuden har det været en del af projektet at lave reaktioner, som er økonomiske, altså uden noget spildprodukt. Det gælder alle de reaktioner, som vi har beskrevet i projektet,« siger Troels Skrydstrup.

Vil løse globale problemer med overgangsmetalkatalysatorer

Forskerne fra Aarhus Universitet fortsætter deres jagt på at udvikle overgangsmetalkatalysatorer til

ikke bare medicinalindustrien, men til en hel masse industrier. Blandt andet arbejder de lige nu på at udvikle katalysatorer, der kan udnytte CO₂ til at lave en masse af de kemikalier, som vi benytter i forskellige industrier i dag, eksempelvis plastindustrien. Plast bliver i dag fremstillet af fossile brændstoffer, men dem løber vi tør for på et tidspunkt, og så skal vi finde en råstofkilde et andet sted. Det sted kan muligvis være i CO₂. Men før det kan lade sig gøre, skal der udvikles katalysatorer, som kan få CO₂ til at blive til udgangsstoffer for plastik, og de katalysatorer arbejder Troels

Skrydstrup og hans kollegaer på at udvikle.

Omvendt arbejder forskerne også på at udvikle katalysatorer, som kan omdanne plastik til dets udgangsstoffer igen, så plastikaffald bliver meget mere genanvendeligt.

»Det er nogle store samfundsudfordringer, som vi prøver at løse med overgangsmetalkatalysatorer og andre katalysatorer. Indtil videre er vi kun på et grundvidenskabeligt plan, men det har store og spændende perspektiver,« siger Troels Skrydstrup. ■



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

SKAL DU SNART VÆLGE UDDANNELSE?



***Så er du måske i tvivl om, hvad der er det rigtige for dig.
På Københavns Universitet kan du bl.a. besøge de natur-
videnskabelige uddannelser, inden du vælger – du kan fx:***

- » Komme til Åbent Hus 27. februar – 1. marts
- » Blive "Studerende for en dag"
- » Besøge os med din klasse

Indtil vi ses, kan du også prøve et online **uddannelsestjek** på
11 af de naturvidenskabelige bacheloruddannelser. Læs mere om
uddannelsestjekket og besøgsmulighederne på science.ku.dk/ba

HPV-VACCINEN: EN BLANDING AF FAKTA OG FØLELSE

*Vi tror alle, at vi træffer rationelle beslutninger,
men følelser spiller måske en større rolle end
som så. Forfatterne har kigget på sagen omkring
HPV-vaccinen...*

Sundhedsstyrelsen, Kræftens Bekæmpelse og Lægeforeningen lancerede sidste år informationsindsatsen Stop HPV. Formålet er at levere viden om forebyggelse af livmoderhalskræft og HPV-vaccination til borgere og sundhedsprofessionelle.

Baggrunden for indsatsen var den stærkt faldende tilslutning til HPV-vaccinen i det danske børnevaccinationsprogram i 2015-16. 2015 var det år, hvor 2003-årgangen skulle have vaccinen, og i november 2015 var kun halvt så mange 2003-piger blevet vaccineret i forhold til 2002-årgangen året før. Statens Serum Institut (SSI) kædede umiddelbart faldet sammen med de mange historier bragt på fjernsyn, aviser og sociale medier om HPV-vaccinerede piger, der var blevet syge.

"Det er meget forståeligt, at det kan have ført til bekymring i de danske børnefamilier, som måske har udsendt beslutningen om HPV-vaccination eller besluttet ikke at tage imod tilbuddet", udtalte afdelingsleder Palle Valentiner-Branth, Afdeling for Infektionsepidemiologi, SSI.

Viden virker

Nu er udviklingen vendt. Omkring 31.000 piger modtog i 2017 de-

res første dosis af HPV-vaccinen, hvilket svarer til en fordobling af tilslutningen i 2016. SSI kalder det "årets helt store positive nyhed på vaccinationsområdet", og børnefamilierne er tilsyneladende enige. I en meningsmåling foretaget af Epinion i marts 2018 svarede knap fire ud af fem af de adspurgte 1000 forældre til piger i alderen 10-14 år, at de havde tillid til vaccinen.

Hvad er der sket? Set fra myndighedernes synspunkt har informationsindsatsen i hvert fald virket. En høj tilslutning til børnevaccinationsprogrammet kræver, at forældre er trygge ved de vacciner, der tilbydes. Trygheden smuldrer, når der opstår usikkerhed vedrørende den information om fordele og ulemper ved vaccinerne, som læger og andre fagfolk kan tilbyde.

Følelsen af tryghed bygger ikke udelukkende på rationel stillingtagen. En tur igennem det alsidige landskab i HPV-vaccinedebatten viser, hvordan fakta og ekspertudsagn lever side om side med eksperter og lægfolks bekymringer, når diskussioner om ny teknologi foregår i offentligheden.

Positiv modtagelse

Siden sin lancering i 2006 har HPV-vaccinen været genstand for mediernes og offentlighedens be-

vågenhed. Vaccinen vakte i første omgang opsigt som "den første vaccine mod kræft". Tilnavnet kom af, at vaccinen beskytter mod kræftfremkaldende typer af HPV (Human Papilloma Virus), som er en fællesbetegnelse for over 100 forskellige virustyper, der overføres seksuelt.

I starten af 1980'erne påviste den tyske virolog Harald zur Hausen sammen med sin forskerstab en sammenhæng mellem HPV og livmoderhalskræft, hvilket motiverede til udviklingen af en vaccine mod HPV. Den første HPV-vaccine på det danske marked var Gardasil®, der ifølge sundhedsmyndighederne og producenten Merck forebygger imod 70% af de HPV-infektioner, der kan medføre livmoderhalskræft.

Modtagelsen i Danmark var overvejende positiv. Et tværfagligt panel af bl.a. sundhedsfaglige og økonomiske eksperter udgav i 2007 en medicinsk teknologivurdering af vaccinen. De vurderede her, at det var en god ide at sætte penge af til at tilbyde vaccinen gratis til piger.

Baggrunden for vurderingen var, at vaccinen med stor sandsynlighed ville kunne hindre nogle af de 175 dødsfald, der hvert år skyldtes livmoderhalskræft. Herudover mente de sundhedsfaglige eksperter ikke,

Om forfatterne



Torben Esbo Agergaard er kandidatstuderende ved Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet
torben.esbo.agergaard@post.au.dk



Kristian Hvidtfelt Nielsen er lektor ved Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet
khn@css.au.dk



Illustration fra informationsindsatsen Stop HPV, lavet af Sundhedsstyrelsen, Kræftens Bekæmpelse og Lægeforeningen i samarbejde med en lang række faglige organisationer og sundhedsmyndigheder. Som kvinden til højre vil mange gerne træffe et valg efter at have sat sig "grundigt ind i fakta". Det danske HPV-debat er et godt eksempel på, at fakta ofte bliver blandet sammen med følelser i et åbent demokrati.

at der var tegn på, at vaccinen skulle være forbundet med alvorlige bivirkninger. Anbefalingen blev givet videre til Folketinget, der herefter besluttede, at vaccinen fra 2009 skulle tilbydes til piger igennem børnevaccinationsprogrammet.

Fra optimisme til usikkerhed

Forældre og børn bakkede i første omgang op om beslutningen. I 2012 havde 80% af pigerne født imellem 1996 og 1999 modtaget vaccinen. Men usikkerheden var allerede begyndt at spire, og en række fagpersoner delte deres tvivl og bekymringer med offentligheden. Der var tvivl om, hvorvidt de kortvarige kliniske forsøg op til vaccins godkendelse rent faktisk viste, at den var i stand til at forebygge livmoderhalskræft på længere sigt.

Desuden var der bekymring på vegne af en række piger, der havde indrapporteret alvorlige symptomer umiddelbart efter at have fået vaccinen. Det drejede sig specielt om aktive piger, hvis elitesportsdrømme var brast på grund af symptomer som ekstrem træthed, muskelsmerter og besvimelsesanfald, og historierne spredte sig fra lægeklinikkerne til de sociale og traditionelle medier.

I løbet af 2013 og 2014 blev pigerne historier bragt i *Politiken*, *BT* og

Ude og Hjemme, og i marts 2015 så omkring en halv million danskere med, da TV2 bragte dokumentaren "De vaccinerede piger - syge og svigtede". Seerne mødte her nogle af de piger med alvorlige symptomer, der var opstået kort tid efter, at de havde modtaget HPV-vaccination. Pigerne, deres pårørende og en række læger gav i udsendelsen udtryk for, at de mistænkte vaccinen for at være årsag til symptomerne.

Den inkarnerede kritik

TV2-dokumentaren var med til at gøre problemstillingen nærværende og relevant for offentligheden. Nu var det ikke længere blot forbeholdt sundhedsfaglige eksperter at diskutere vaccinen. Mens de danske sundhedsmyndigheder fastholdt deres anbefaling af vaccinen, opstod der i denne periode en række fællesskaber, der var langt mere kritiske.

Grupper som *Landsforeningen HPV-Bivirkningsramte* og *HPV-update* sluttede kreds om de ramte piger. De kritiserede det danske sundhedsvæsen for manglende anerkendelse af de bivirkninger ved vaccinen, som flere af gruppernes medlemmer mente at have erfaret på egen krop. Enkelte så problemerne omkring HPV-vaccination og især det forhold, at sundhedsmyndighederne ikke ville anerkende sympto-

merne som reelle bivirkninger ved vaccinen, som udtryk for en grådig alliance mellem myndigheder, medicinalvirksomheder, læger og andre fagfolk. Konspirationsteorierne vandt særligt frem på de sociale medier og nåede altså ikke frem til de traditionelle medier.

Den ene af denne artikels forfattere (TEA) har undersøgt nogle af HPV-gruppernes åbne Facebook-sider og fundet, at HPV-vaccinen i nogle tilfælde blot er en af flere mærkesager hos de personer, der ventilerer, hvad vi vil kalde "den inkarnerede kritik". I nogle tilfælde er denne kritik ikke kun baseret på en utilfredshed med sundhedsvæsnets håndtering af HPV-sagen. Kritikerne har her ofte flere mærkesager, som de ikke mener, at det traditionelle sundhedssystem er i stand til at rumme. Eksempelvis er flere fortalere for naturmedicin gået ind i debatten med et budskab om at finde alternative forebyggelsesmetoder til vacciner, der i deres optik er "uorganiske".

HPV-grupper på Facebook

Dog skal HPV-grupperne på Facebook ikke kun tolkes som et talerør for en række mennesker, der bruger debatten til at fremme egne synspunkter om eksempelvis alternativ medicin. I bund og grund er flere af grupperne oprettet med henblik på at håndtere den usikkerhed, som har været et grundvilkår i HPV-sagen. Grupperne kan derfor også ses som udtryk for et basalt menneskeligt behov for at omgås ligesindede og i fællesskab skabe en fortælling, der gør det nemmere at agere i en usikker verden.

Specielt for de symptomramte piger og deres pårørende har sygdomsforløbene været forbundet med en enorm usikkerhed. For selv om forskningen i HPV-vaccinen ikke systematisk har påvist en sammenhæng mellem vaccinen og specifikke lidelser, har det stadig været svært for læger og forskere at udrede, hvad der i de enkelte tilfælde er galt med pigerne. Uden HPV-grupperne vil pigerne være

overladt til selv at håndtere den usikkerhed, der er forbundet med et langt og opslidende diagnosticerings- og behandlingsforløb.

Følelser eller fakta?

Som det er beskrevet ovenfor, er tvivl om - og modstand mod HPV-vaccinen tæt forbundet med en række anskuelser og bekymringer, der rækker ud over faktuelle spørgsmål om vaccinen i sig selv. Fortalere for vaccinen hævder derfor, at kritikken er et symptom på, at vi er på vej mod et såkaldt post-faktuelt samfund, hvor følelser og holdninger har udkonkurreret fakta, når vi tager beslutninger.

En sådan udmelding undervurderer imidlertid det forhold, at også tilvalget af HPV-vaccinen kan være drevet af stærke fællesskabsfølelser og mere overordnede bekymringer. Mange forældre, der tilvælger HPV-vaccinen og andre vacciner til deres børn, gør det ikke alene efter at have sat sig grundigt ind i fakta omkring den konkrete sag, men også fordi de generelt har tillid til de ekspertsystemer, der er grund-

laget for et moderne, teknologisk samfund.

Tillid til eksperterne

Hver dag og hele tiden udviser vi alle tillid til ekspertsystemer. Det sker, når vi træder ind under bruseren om morgen i fuld tillid til, at det er rent vand og ikke noget væmmeligt noget, der strømmer ud af hanen fra vandforsyningen. Og det sker, når vi træder ind i bussen på vej til studiet eller arbejdet i tillid til, at den med stor sikkerhed kan bringe os uskadte frem.

Tillid til ekspertsystemer er med andre ord et grundelement i vores hverdag. Tilliden er langt fra rationel, for der er ingen af os, der har tid til eller vil være i stand til at sætte os grundigt ind i fakta om vandledninger, busfabrikation mm. Tilliden bygger på følelser og fornemmelsen af at høre til i et større fællesskab, som spejler ens egen identitet.

Det stærke kræftfællesskab

For nogle er et tilvalg af en vaccine dermed også en selvbekræftelse i, at man ser sig selv som en del af

et fællesskab, hvor der er støtte og tillid til faglige ekspertvurderinger.

For andre er støtten til HPV-vaccinen forbundet med stærke følelser omkring forebyggelse og behandling af kræft. Herhjemme dør hver tredje person af kræft, og derfor har de fleste danskere sygdommen inde på livet. Derfor har vi skabt et sundhedssystem, hvor kræftbehandling- og forebyggelse har høj prioritet.

Som eksempel har Folketinget igen de seneste ti år udskrevet store beløb til de såkaldte kræftpakker, der sikrer kræftpatienter hurtig diagnosticering og behandling i sundhedssystemet. Når tilslutningen til HPV-vaccinen er dalet, er der hos mange eksperter og lægfolk opstået en bekymring om, hvorvidt det skal tolkes som et udtryk for, at denne stærke behandlings- og forebyggelseskultur er ved at smuldre. Valget om at bakke op omkring HPV-vaccinen er for mange dermed også en måde at tage del i et fællesskab, hvor kræftforskning og -behandling bliver prioriteret højt. ■

Yderligere læsning og besøg

Agergaard, T.E. og K.H. Nielsen (2018). Ansigt på usikkerheden. I *Videnskab er lidenskab*, red. M.A. Skydsgaard og K.H. Nielsen (Aarhus: Aarhus Universitetsforlag), s. 67-83.

Agergaard, T.E. (2018). *En vaccine mod tillid? En undersøgelse af tre danske HPV-vaccine-kritiske fællesskaber og deres offentlige Facebook-sider*. Speciale. Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet.

Nielsen, S.H. (2017). *Injected Uncertainty: Exploring the Danish HPV Vaccine Controversy*. Speciale. Institut for Kultur og Samfund, Aarhus Universitet.

Udstillingen *Videnskab er lidenskab – om forskerliv og kogte krabber*, Steno Museet, Science Museerne, Aarhus Universitet.

Bliv STUDERENDE FOR EN DAG på SDU

Tilmeld dig Anvendt matematik, Biokemi og molekylær biologi, Biologi, Biomedicin, Datalogi, Farmaci, Fysik, Kemi, Matematik eller Matematik-Økonomi på sdu.dk/studerendeforendag

VIDENSKABELIG USIKKERHED I KEMI:

Hvad er farligt?

Kemiske forbindelser, som findes i fødevarer eller produkter, vi bruger til daglig kan indebære risici for sundhed og miljø. Men hvordan afgør man, hvad der er farligt og bør forbydes og reguleres? Kan dette afgøres rent videnskabeligt, eller afhænger spørgsmålet også af værdimæssige overvejelser?

Om forfatterne:



Sara Green er adjunkt ved Institut for Naturfagernes Didaktik, Sektion for Videnskabsteori og Videnskabshistorie, Københavns Universitet. sara.green@ind.ku.dk



Claus Emmeche er lektor ved Institut for Naturfagernes Didaktik, Sektion for Videnskabsteori og Videnskabshistorie, Københavns Universitet. emmeche@ind.ku.dk



Knud J. Jensen er professor ved Kemisk Institut, Sektion for Kemisk Biologi, Københavns Universitet. kjj@chem.ku.dk

Det er vanskeligt at forestille sig vores moderne samfund uden de ting, vi har fået via kemisk videnskab. Gennem kemi er det ikke blot muligt at lære om naturens molekulære sammensætning og egenskaber, men også at syntetisere nye forbindelser. Kemien har muliggjort computere, biler, funktionelt tøj, forarbejdede fødevarer, lægemidler osv. Men samtidig med, at kemien skaber nye produkter, skabes der også nye risici. Dette rejser en række vigtige videnskabsteoretiske og etiske spørgsmål.

Kemien, og videnskaben generelt, spiller en dobbelt rolle i produktionen og afdækning af risici. På den ene side har videnskabelige frembringelser resulteret i både miljømæssige og sundhedsmæssige katastrofer. Eksempler er udslip af radioaktiv stråling, brug af kemiske våben eller utilsigtede skader på økosystemer efter sprøjtning med insektmidler. På den anden side er videnskaben et nødvendigt redskab til at forstå, forebygge og minimere risici, fordi de nye risici (som den tyske sociolog Ulrich Beck sagde)

»findes i de fysiske og kemiske formlers sfære« og derfor kræver videnskabelige undersøgelser for at blive afdækket.

Hvor vi tidligere var udsat for farer, vi kunne sanse direkte, er risici i det moderne samfund ofte "usynlige", og skadelige virkninger opdages først på lang sigt. Det gør den type risici sværere at forholde sig til. Samtidig er det svært at forudsige stoffers virkninger uden grundige undersøgelser. En ofte udtalt overbevisning er, at naturlige stoffer er uskadelige, mens kunstige, menneskeskabte stoffer er skadelige. Men mange naturlige stoffer er meget skadelige. For eksempel kan nogle bakterier producere et protein, botulinumtoksin, som er et af verdens giftigste stoffer og kan give pølseforgiftning. Ligeledes kan skimmelsvampe producere aflatoksin, som er kræftfremkaldende. Det er derfor vigtigt at undersøge effekten af både naturlige og kunstige stoffer i fødevarer. Derudover er det helt centralt at undersøge, om bestemte stoffer er giftige i den koncentration, vi med sandsynlighed vil udsættes for stofferne.

I håndteringen af risici skal videnskabelige vurderinger og deres usikkerheder også tolkes i lyset af samfundsmæssige værdier såsom sundhed og nytte af kemiske produkter. Komplexiteten i dette tvinger os til at forholde os til spørgsmålet om, hvad det er muligt for videnskaben at vide og forudsige, og i hvor høj grad spørgsmål om risici kan afgøres af videnskaben alene.

Risiko og videnskabelig usikkerhed

En videnskabelig risikovurdering er en analyse af sandsynligheden for skadelige virkninger baseret på dokumenterede sammenhænge mellem eksponering og mulige skader. Fordi risici handler om sandsynligheder for, at en (uønsket) hændelse vil optræde, vil der altid være et element af usikkerhed om, hvad effekten bliver af de forskellige handlemuligheder. Desuden er der ofte principielle vanskeligheder ved at give et klart svar på, om noget er farligt. Så hvordan skal man tage beslutninger om regulering på baggrund af ufuldstændig viden, videnskabelig usikkerhed og praktiske begrænsninger?



Foto: Colourbox.

Kosmetik, tandpasta og deodoranter kan stadigvæk indeholde mindre mængder af stoffet triclosan, men er det farligt?

I videnskabsteorien skelner man ofte mellem empirisk og teoretisk usikkerhed. *Empirisk usikkerhed* bundes i mangel på præcise måleresultater eller andre begrænsninger, eksempelvis for få, ikke-repræsentative eller usikre data. Det handler således om viden, som ikke principielt er utilgængelig, men som man ikke nødvendigvis kan fremskaffe af praktiske grunde. For eksempel er det ikke alle nye kemiske stoffer, som man tester lige grundigt – dels på grund af begrænsede ressourcer, dels på grund af overvejelser om, hvor mange dyreforsøg, der er nødvendige eller forsvarelige. *Teoretisk usikkerhed* opstår, når der er tvivl om selve den teoretiske forståelsesramme og de antagelser, videnskabens modeller bygger på. For at forstå denne type usikkerhed ser vi nærmere på diskussioner om antagelserne bag de modeller, som bruges, når man skal vurdere kemiske stoffers potentielle skadelige effekter i fødevarer.

TTC-metoden og dens begrænsninger

Avancerede kemiske analysemetoder gør det muligt at opdage og undersøge potentielt skadelige stoffer

af biologisk eller kemisk herkomst. Mange af disse er utilsigtede, eksempelvis stoffer, som transporteres fra emballagen til fødevarerne, og disse udgør en stor udfordring for lovgivende instanser som Den Europæiske Fødevarsikkerhedsautoritet (EFSA).

I risikovurderingen af utilsigtede stoffer, som forekommer i lav dosis, bruges ofte en metode kaldet Threshold of Toxicological Concern (TTC). TTC er effektiv til hurtigt at sætte en grænseværdi for kemiske forbindelser, under hvilken sundhedsskadelige effekter vurderes som relativt usandsynlige. Baggrunden for brugen af TTC er, at det ikke er muligt at teste det stigende antal ukendte forbindelser lige grundigt, da eksempelvis dyreforsøg har høje omkostninger og tager lang tid.

Rationalet bag TTC er, at viden om allerede veltestede kemiske forbindelser kan bruges til at sætte grænseværdier for strukturelt beslægtede kemiske forbindelser, som man endnu ikke har testet, og som ofte findes i meget lave koncentrationer. De nye stoffers grænseværdier vur-

deres i forhold til grænseværdierne for strukturelt beslægtede klasser (via sammenligning af de funktionelle grupper) samt estimering af den daglige eksponering for stoffet.

I fastlæggelsen af grænseværdier tages der hensyn til empiriske usikkerheder i forbindelse med ekstrapolering fra forsøg med dyr (typisk rotter) til mennesker samt for variation mellem individer. Dette gøres ved at dividere grænseværdien for den kendte type forbindelse med 100.

Der har imidlertid været debat om de teoretiske forudsætninger bag TTC-metoden. Det forudsættes, at mange kemiske forbindelser med lignende struktur har lignende biologiske effekter. Men der er mange eksempler på, at denne antagelse ikke altid holder. Eksempelvis er benzen kræftfremkaldende, mens det nært beslægtede toluen (methylbenzen) er meget mindre skadeligt.

Der er desuden teoretisk usikkerhed angående antagelsen om, at der er et simpelt og lineært forhold mellem dosis og respons. Under-

Debatten om triclosan

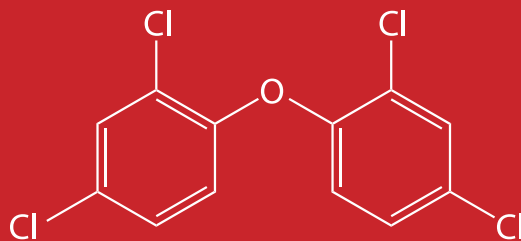
Triclosan er en polychlor-forbindelse, som virker hæmmende på bakterie- og svampevækst. Disse egenskaber gør stoffet til et effektivt konserveringsmiddel, som har været brugt i eksempelvis tandpasta, make-up og rengøringsmidler. Stoffet mistænkes for at være hormonforstyrrende og for at kunne lede til resistens hos bakterier. Triclosan er derfor blevet udfaset i en lang række produkter. Imidlertid fandt man i 2016 stoffet i kroppen på 8 ud af 10 gravide kvinder, som deltager i forskningsprojektet *Odense Børnekohorte*. I projektet følges 2538 børn, født mellem 2010-2013, til de er 18 år. Drengenebørn født af kvinder med høje niveauer af triclosan havde gennemsnitligt 7 mm mindre hovedomkreds samt en kortere anogenital afstand (AGD; afstanden mellem anus og kønsorganerne). Disse to mål bruges som markører for henholdsvis hjerneudvikling og feminisering af det mandlige foster.

Umiddelbart kan disse tal lyde alarmerende, og det kan virke indly-

sende, at triclosan burde forbydes. Men eksemplet viser, at tolkning af videnskabelige resultater i forbindelse med vurdering og håndtering af risici langt fra er ligetil. I den konkrete sag henviste Miljøstyrelsen til, at man ikke kan udlede viden om kausale sammenhænge ud fra kohortestudier. Det er muligt, at den statistiske sammenhæng kan forklares ud fra en sammenhæng mellem triclosan og et andet stof, som triclosan ofte optræder sammen med – og som er den egentlige årsag til de observerede forskelle. Jævnfør forsigtighedsprincippet krav kan det desuden diskuteres, om mindre hovedomfang og AGD kan betegnes som "risici af en vis betydelighed", fordi det er usikkert, om og hvordan det vil påvirke

børnenes sundhed og udvikling på længere sigt. Miljøstyrelsen henviste også til, at et forbud kan resultere i, at triclosan erstattes af andre konserveringsmidler, som vi ved mindre om. Triclosan findes i dag stadig i enkelte kosmetiske produkter og tandpasta, men er kun tilladt i meget lave koncentrationer og er helt udfaset af rengøringsmidler i Danmark. Miljøstyrelsen vurderer fortsat, at triclosan ikke skal forbydes, men anbefaler forbrugerne at undgå stoffet.

Vi håber, at eksemplet – og referencerne sidst i artiklen – kan stimulere til diskussion af argumenterne fra begge sider i forhold til afvejning af kendsgerninger, usikkerheder og værdier.



Triclosan

søgelse af hormonforstyrrende stoffer, eksempelvis bisphenol A (BPA), som bruges i plastmaterialer til føde- og drikkevarer, peger på, at eksponering af disse stoffer i lav dosis i nogle tilfælde overraskende nok kan medføre mere skadelige effekter end ved høje doser. Dette gælder særligt ved eksponering i kritiske udviklingsfaser hos fostre. Derudover henviser den såkaldte *cocktail-effekt* til, at nogle stoffer har en ikke-additiv, eller synergistisk, effekt, når de optræder sammen. For eksempel kan et givent stof påvirke, hvor gennemtrængelig en cellemembran er, hvilket kan nedsætte den koncentration ved hvilken et andet stof kan optages i cellen og eventuelt forårsage skade.

Nogle mener derfor ikke, at TTC-tilgangen er tilstrækkelig forsigtig til at kunne tage hensyn til den type

effekter. Men hvor forsigtig bør man være, og kan videnskaben afgøre det spørgsmål?

Forsigtighedsprincippet

I diskussioner om regulering af kemikalier appelleres der ofte til det såkaldte forsigtighedsprincip. Forsigtighedsprincippet bruges ofte i daglig tale om holdningen "better safe than sorry". Som retligt princip indenfor lovgivning indebærer princippet, at forbud mod potentielt skadelige stoffer ikke må hindres eller udsættes alene på grund af videnskabelig usikkerhed. Princippet bruges altså som juridisk begrundelse for, at der kan tages en beslutning om regulering, selvom de mulige risici ikke er helt klarlagte. Princippet kan dog kun bruges, hvis der er *videnskabelige indikationer for risici*, og hvis det drejer sig om *risici af en vis betydelighed*.

Selvom kravene til forsigtighedsprincippet kan se klare ud, opstår der i praksis ofte uenighed om, hvorvidt princippet kan bruges. På den ene side vil man ikke udsætte befolkningen for unødigt fare. På den anden side kan der være store tab for både producenter og forbrugere ved for stram regulering af kemiske stoffer med gavnlige effekter.

Debatterne handler ofte om spørgsmålet om, hvorvidt kravene til forsigtighedsprincippet er opfyldt. Disse afgørelser handler ikke kun om videnskabelige fakta, men også om, hvad der overhovedet *tæller som videnskabelig evidens*, og *hvornår en risiko anses som alvorlig*. Debatten om regulering af konserveringsmidlet triclosan i Danmark illustrerer vanskeligheden ved at opnå enighed om disse ting (se boks).

Kendsgerninger og værdier

Det lyder enkelt, at videnskaben skal vurdere risici, og beslutningstagere herefter må håndtere risici. Men vurdering af risici handler i høj grad om, hvordan vi tolker videnskabelige resultater. Ud fra et ideal om en værdifri videnskab bør en risikovurdering være så objektiv som muligt. Det er for eksempel problematisk, hvis økonomiske forhold som støtte fra producenter får en forsker til at designe forsøg på en bestemt måde eller til at nedtone videnskabelige indikationer for risici. Omvendt kan man diskutere, om en helt værdifri risikovurdering overhovedet er mulig – eller ønskelig. Nogle mener, at der allerede ligger normative værdier i de modeller, vi vurderer risici ud fra, og at forsigtighedsprincippet burde spille en rolle også i udviklingen af modeller til samfundsmæssige formål.

Videnskabsfilosoffen Karim Bschr har eksempelvis kritiseret TTC-tilgangen for ikke at være tilstrækkeligt forsigtig. I TTC-tilgangen er definitionen af modellens værdier for acceptabel risiko *kvantitativt* bestemt ud fra et statistisk mål for sandsynligheden for

Cases til videnskabsteori

I en serie af artikler præsenterer undervisere i Faget Videnskabsteori læserne for videnskabsteoretiske aspekter af alle de naturvidenskabelige gymnasiefag. Vi tager udgangspunkt i cases, som vi på Institut for Naturfagernes Didaktik bruger i vores undervisning i videnskabsteori på bacheloruddannelser ved SCIENCE på Københavns Universitet.

skadelige effekter under grænseværdierne. TTC-tilgangen tager dermed ikke højde for *kvalitative* forskelle i de observerede effekter. Eksempelvis vil de fleste se meget forskelligt på en effekt efter eksponering hos 10 ud af en million eksponerede individer, afhængigt af om påvirkningen dækker over forbigående hovedpine, kræft eller misdannelser hos fostre. Alle disse vil i TTC-tilgangen ligge indenfor "det acceptable", men mon de individer, der rammes, mener det samme? Bschr appellerer derfor til en debat blandt både forskere og befolkning om, hvordan vi bør forholde os til spørgsmålet om, hvad der kan betragtes som en acceptabel risiko, og hvordan man kan sikre sig, at risikovurderingen bliver mere robust. Sidstnævnte kan eksempelvis gøres ved at udvikle og sammenligne flere

forskellige modeller, som man gør i klimaforskningen.

Et andet vigtigt spørgsmål er, hvilke krav vi kan stille til videnskabens evne til at producere sikker viden. Kemikere, der vurderer giftigheden af farlige stoffer, forventes ofte at kunne give sikre svar. Men opdagelsen af lavdosis-effekter og cocktail-effekten er eksempler på, at videnskabelig viden ofte ledsages af indsigt i en kompleksitet, som vanskeliggør simple svar. Ligeledes giver debatter om brugen af forsigtighedsprincippet indsigt i forskellige syn på, hvad der gælder som tilstrækkelig videnskabelig evidens. At forholde sig til videnskabelig usikkerhed er derfor vigtigt for at kunne forholde os til de risici, som det moderne samfund medfører. ■

Vil du læse mere?

Gregersen, P. & Nørretranders, T. (1980): Små doser – stor diskussion. *Naturkampen* 17, s. 23-29.

Om TTC

Bschr, K. (2017). Risk, Uncertainty and Precaution in Science: The Threshold of the Toxicological Concern Approach in Food Toxicology. *Science & Engineering Ethics*, 23: 489-508.

Om triclosan

Lassen, T.H., et al. (2016). Prenatal Triclosan Exposure and Anthropometric Measures Including Anogenital Distance in Danish Infants. *Environmental Health Perspectives*, 124(8): 1261-8.

Miljøstyrelsen om triclosan: <https://mst.dk/kemi/kemikalier/fokus-paa-saerlige-stoffer/triclosan/> (tilgået 12. november 2018)

DR Sundhedsmagasinet: Hormonforstyrrende stoffer, 8. marts 2016 (tilgængelig via biblioteksarkiver).



Helt nye workshops fra Ingeniøruddannelserne

Lad os supplere din undervisning med spændende oplæg og workshops fra Ingeniøruddannelserne på SDU – enten hos os eller hos jer.

I starten af 2019 introducerer vi tre helt nye workshops.

Lær Scrum med Lego

Eleverne får i denne workshop kendskab til den anerkendte agile metode Scrum, som er en arbejdsform, der ofte anvendes til styring af teknologiske projekter.

Fra matematiske formler til fysiske robotbevægelser

I denne workshop vil eleverne med anvendelse af matematik og geometriske dynamikker få en tegnerobot til at tegne efter et datasæt med koordinater, som de selv har udledt.

Anvendelse af statistik ved programmering

Eleverne vil i denne workshop opnå en introducerende forståelse for implementering af kode, programkørsel og opsætning af datasæt. De vil ligeledes få en systematisk forståelse for den statistiske metode.

Se Ingeniøruddannelsernes store udvalg af tilbud til gymnasieklasser på:

www.sdu.dk/tek/brobygning

135 uddannelser 3 dage 1 overblik

Kom til tre dages åbent hus på
Aarhus Universitet

28. februar, 1. og 2. marts 2019

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.

Nye undervisningsmaterialer

På hjemmesiden aktuelnaturvidenskab.dk finder du også undervisningsmaterialer.

Bioteknologi

Med udgangspunkt i artiklen, *Bakterier kan frigøre os fra olie*, er der udarbejdet undervisningsmateriale og det overordnede emne er bioteknologi.

Det er en fordel at eleverne kender til basal genteknologi, grundlæggende organisk kemi, syre-base-kemi, biokemiske processer samt nervesystemets funktion. Artiklen med tilhørende arbejdsopgaver er velegnet i 3.g, hvor eleverne kan få anledning til at anvende deres viden på tværs af mange fagområder. De trænes derved frem mod såvel de mundtlige som skriftlige eksaminer.

Fag: Bioteknologi A og biologi A/kemi B. Udarbejdet af Lone Als Egebo, Hassers Gymnasium

Datering og placering med naturvidenskab

Hvordan man med naturvidenskabelige metoder kan bestemme alder og sted på forhistoriske artefakter. Materialet bygger på disse tre artikler (med de relevante fag/niveau i parentes):

- *Mørteldatering og kirkearkæologi* (keC, maC, FyB)
- *Strontium afslører levesteder* (maC, FyB)
- *Når man rækker genetiker en lillefinger...* (Bi B)

Undervisningsmaterialet er udarbejdet af "Projektgruppen på Viborg Gymnasium og HF".

Undervisningsmateriale Kan man måle hvad dyr tænker og føler?

Artiklen, *Kan man måle hvad dyr tænker og føler?*, fra Aktuel Naturvidenskab nr. 2/2018 kan give debatten om dyrevelfærd et mere videnskabeligt input. Materialet er tænkt at dække to moduler af 70 minutter i et længere forløb om dansk landbrug. De umiddelbare koblinger til denne time er; økologi eller landbrugets bytteforhold.

Fag: Naturgeografi C-niveau.

Materialet er udarbejdet af Poul Lindskov, Viborg Katedralskole.

Prøv quizzerne!

Test din viden i Aktuel Naturvidenskab quizzer, der bygger på artikler fra bladet.

Find dem via aktuelnaturvidenskab.dk

Materialet 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, 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: 6.100

Redaktionsgruppe

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

To marsvin fra Fjord og Bælt centeret i Kerteminde.
Foto: Peter Verhoog.



Alt henvendelse til:
Aktuel Naturvidenskab,
Ny Munkegade 126, 8000 Aarhus C
E: abo@aktuelnaturvidenskab.dk
T: 87152094

Kloakrobotterne kommer

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Kloaksystemet er sjældent den del af vores infrastruktur, der nyder den største bevågenhed. Medmindre det ikke fungerer, som det skal, så rotter eller ildlugtende kloakvand stiger op i vores boliger. Så skal det nok komme allerøverst på lystavlen!

Faktisk er kloaksystemet et af de dyreste infrastruktur-systemer, vi har, hvilket ikke mindst skyldes omkostningerne til vedligehold. Da rørsystemerne altovervejene befinder sig under jorden, kan man ikke bare vurdere deres tilstand med det blotte øje – nej, her må der specialiseret teknologi til hjælp. I dag foregår det ved, at man skyder et langt kabel med et kamera ind i rørene, så man direkte på en skærm kan se, om der for eksempel er utætte sammenføjninger, knækkede rør eller måske en rotte, hvor den ikke burde kunne komme. En sådan TV-inspektion tager imidlertid lang tid, og derfor kan man kun overvåge en lille brøkdelen af kloaknettet på denne måde årligt. Konsekvensen er, at fejl typisk ikke opdages, før et rør svigter og skal skiftes ud – men også, at nogle rør udskiftes, før det er nødvendigt. Hvis man ud fra et bedre overblik over kloaknettets tilstand kan forlænge levetiden blot en lille smule, vil det betyde besparelser i multimillion-klassen.

En robothær i kloakken

Svaret på den teknologiske udfordring er en hær af små mobile robotter, der vil kunne patruljere rørene 24/7 og opsamle data, som kan analyseres med intelligente computeralgoritmer og på den måde give et løbende sundhedstjek af kloakrørene. Det er i hvert fald visionen i et nyt projekt, som Innovationsfonden støtter og som tæller partnere fra universiteter, robotvirksomheder og vandforsyningsselskaber.



Robotterne kan støde på lidt af hvert i kloakrørene. Fotos: Aarhus Vand.

Der er mange tekniske udfordringer i projektet, og en af dem er at udstyre robotterne med de rette sensorer til at samle data ind. »Man kan for eksempel bruge konventionelle kameraer, infrarøde kameraer, LiDAR-scannere eller ultralydsscannere, men kravet er, at de skal bruge meget lidt strøm, og at de ikke bliver »blinde« af at blive dækket til med skidt og møg – for sådan er vilkårene jo i en kloak«, fortæller Joakim Bruslund Haurum og Chris Holmberg Bahnsen fra Visual Analysis of People Laboratory på Aalborg Universitet.

I projektet skal de som henholdsvis ph.d.-studerende og postdoc arbejde med at træne computeralgoritmer til at genkende fejl i kloaksystemet, og til det formål skal de bruge tonsvis af data. Heldigvis findes de data til dels allerede, idet forsyningsselskaberne har store databaser med videooptagelser, hvor det er markeret, hvilke fejl, man kan se – data er annoteret, som man siger.

At skelne skidt fra fejl

»Selvom en kloak kan tænkes at være et simpelt miljø, er der overraskende mange måder et kloakrør kan se ud på set indefra,« fortæller Joakim og Chris. »Derfor kræver det rigtig meget data at lære algoritmerne at genkende de samme fejl, uanset om kloakken er delvist dækket til af skidt, eller om den er helt ren. Omvendt kan flere af de mulige typer af fejl ligne hinanden. For eksempel kan noget, der for computeren ligner et brud på røret, være en påboring – altså hvor man har koblet et andet rør på ved at bore et hul igennem. Det skal algoritmerne gerne kunne se forskel på.« Typisk vil man selvfølgelig især kigge efter kritiske fejl som store brud og revner i røret, kraftig overfladebeskadigelse eller voldsomme forskydninger, som fortæller, at et rør snart skal skiftes ud. Hvis projektet kan gøre os bedre til at skelne skidt fra fejl for at sige det populært, ligger et dansk kloakrobot-eksporteventyr måske og venter. For mange lande har nøjagtig de samme udfordringer. ■