

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur*VIDENSKAB

INSEKTER SOM BÆREDYGTIG FØDEKILDE

Mysteriet om bolsjer og andre glasmaterialer
Kunstig intelligens og kunsten at give en god forklaring
Vi forurener grundvand og drikkevand

NR.1 - 2025 MARTS 50 KR.

Inspirerende tisseri

At tisse er for de fleste mennesker noget, der holdes i det strengt private. Men ikke altid: I Japan findes der ligefrem et ord for at tisse i fællesskab, nemlig "tsureshon". Japanske forskere har nu opdaget, at chimpanser tilsyneladende også lader sig inspirere af andre chimpansers tisseri. Forskerne observerede over mere end 600 timer 20 chimpanser, der bliver holdt i Kumamoto Sanctuary, som er ejet af Kyoto Universitet. Det viste sig, at chimpansernes tisseri var mere synkroniseret end forventet, hvis det havde været tilfældigt fordelt. Yderligere viste det sig, at det var den chimpanse, som var tættest på "den første tisser", som var mest tilbøjelig til at give efter for tissetrangen som den næste i rækken. Ifølge forskerne er resultatet med til at belyse såvel den sociale som fysiologiske rolle af uriner.



Foto: Shutterstock

Kilde: S. Curr. Biol. 35 / Nature

Genmutation øger risiko for diabetes 2 for grønlandere

Fire procent af Grønlands inuitbefolkning bærer en mutation i genet TBC1D4, der tidobler deres risiko for type 2-diabetes. Forskere fra Københavns Universitet har opdaget, at denne genmutation medfører insulinresistens specifikt i muskelvævet, hvilket gør det vanskeligt for kroppen at optage sukker fra blodet. Det betyder, at den eksisterende medicin mod diabetes sandsynligvis ikke kan hjælpe de pågældende. I nogle tilfælde kan det endda forværre tilstanden. Til gengæld viser studiet, at en times fysisk aktivitet om dagen øger insulinfølsomheden i musklerne hos bærerne af genvarianten. Insulinresistensen hos bærerne af genvarianten findes kun i muskulaturen – ikke i leveren eller andre organer og celler, hvilket gør det svært for lægen at opdage, om en patient har forstadier til diabetes 2.

Kilde: Science.KU / Nature.com

Quizzen

Hvad er karakteristisk for et fast stof, der optræder i en såkaldt glasfase?

1. Molekylerne er fikserede som i en krystal, men uordnede som i en væske
2. Det er i termodynamisk ligevægt
3. Det er gennemsigtigt

Se svaret i artiklen om glasser side 22.

En bagside ved grøn omstilling

Et nyt australsk studium sætter fokus på en bagside ved behovet for mineraler til brug for den grønne omstilling, nemlig at der ryddes skov for at kunne komme til den attraktive malm. Dermed frigives den carbon, som er lagret i vegetationen og



Foto: KAISARMLDA/Shutterstock

jorden, hvilket jo virker stik modsat af hensigten om at reducere CO₂-udledningen. I deres studium har forskerne konkret studeret data om 481 nikkel-miner og endnu uudnyttede nikkel-forekomster over hele verden. De har beregnet, hvor meget landareal, der er blevet transformeret per ton produceret ton nikkel og har brugt dette til at estimere, hvor meget vegetation, der er blevet ryddet. De når frem til, at nikkel-minernes carbon-fodaftryk, afhængig af minernes placering, kan være mellem 400 og 500 gange større end hidtil rapporteret.

Kilde: Nat. Comm. Vol. 16, Art. No: 481 (2025)

Biokul – en mulighed for at lagre CO₂

En ny international undersøgelse ledet af professor Hamed Sanei fra Aarhus Universitet afslører, at biokul er langt mere effektivt til permanent CO₂-lagring end hidtil antaget.

Biokul, som fremstilles ved pyrolyse af organisk materiale, binder



Foto: GEUS

kulstof og forhindrer det i at frigive CO₂ til atmosfæren. De modeller, som blandt andet FN's Klimapanel (IPCC) bruger, undervurderer biokuls stabilitet og dermed dets potentiale som klimaløsning. Undersøgelsen, der er offentliggjort i tidsskriftet *Biochar*, påpeger væsentlige mangler i disse modeller og fremhæver biokul som en pålidelig og skalerbar teknologi til CO₂-fjernelse.

Biochar. Vol. 7, art. No. 9, (2025)

Naturvidenskab til folket

Forårets program i foredragsserien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab, der live-streames til hundredvis af lokationer over hele landet, er skudt i gang:

25/2: DNA'en omkring os

11/3: Udforskningen af

Grønland før og nu

25/3: Den meningsfulde hjerne

8/4: På tur i Mælkevejen gennem rum og tid

29/4: Dybhavet – nyt fra en ukendt verden

6/5: Vil resistente bakterier slå os ihjel?

Se mere på www.ofn.au.dk



indhold



Gør smartwatches os sundere?

Den udbredte brug af smartwatches og sundhedsapps har en potentiel bagside i form af unødigt bekymring samt en risiko for overbehandling.

8



Vi forstår ikke termodynamikken af bolsjer

På trods af årtiers forskning har forskere stadig meget svært ved at forstå materialer, der optræder i den såkaldte glasfase.

22



Skal vi leve af larver?

Insekter kan bruges som føde til både dyr og mennesker, og det er potentielt muligt at producere dem med et lavere ressourceforbrug og miljøaftryk end traditionelle husdyr.

12



Vi forurener grundvand og drikkevand

"Rent" grundvand er snart fortid, hvis ikke vi opretter grundvands-parker og begrænser landbrugets nitrat- og pesticidforurening.

28

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 8 Gør smartwatches os sundere?
- 12 Skal vi leve af larver?
Insekter som en bæredygtig kilde til føde
- 18 Store vandmængder kræver nye løsninger
- 22 Forskere undrer sig: Vi forstår ikke termodynamikken af bolsjer
- 28 Vi forurener grundvand og drikkevand
- 34 Kunstig intelligens og kunsten at give en god forklaring
- 38 Jeg gik efter en blød start på arbejdslivet
- 40 BAGSIDEN:
Da fisken fik Carstenicrinus galt i halsen

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Ansvarshavende

Poul Nissen, prodekan, Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet.

Redaktion

Carsten Rabæk Kjaer og Jørgen Dahlgaard
Tlf.: 3036 0660 / 3036 0662 / 8715 2094
E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Redaktionsgruppe

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

Eftertryk kun efter aftale. Citat kun med tydelig kildeangivelse. Synspunkter, der fremføres i bladet, kan ikke generelt tages som udtryk for redaktionens holdning.

Udgiver

Aarhus Universitet, Faculty of Natural Sciences og Faculty of Technical Sciences, i samarbejde med Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet og Roskilde Universitet

Abonnementservice:

Tlf.: 3036 0662 eller abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Postadresse:

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

Layout: Jørgen Dahlgaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

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

Oplag: 3.800

Omslagsfoto: Shutterstock, larver af soldaterfluer.



DET NATURVIDENSKABELIGE
FAKULTET



Roskilde Universitet

SPONSOR-
ABONNENT



Kan gulerødder bruges til behandling af diabetes?

Kan en helt almindelig gulerod være med til at forbedre behandlingen af type 2-diabetes? Det tyder et nyt studie af forskere fra Syddansk Universitet, Odense Universitetshospital og Københavns Universitet på. Forskerne bag har fundet, at gulerødder kan forbedre kroppens regulering af blodsukker og sammensætningen af bakterier i tarmen.

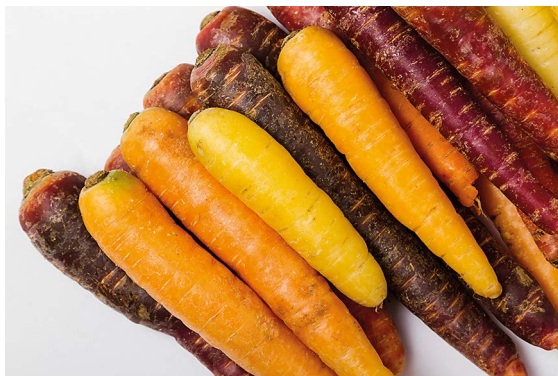


Foto: Colourbox

Forskerne undersøgte gulerøddernes effekt over en periode på 16 uger på mus, der havde fået fremkaldt type 2-diabetes. Her blev musene sat på en fedtholdig kost, der efterligner menneskers ofte usunde livsstil. Musene blev opdelt i to grupper, hvor den ene fik tilsat ti procent frysetørret gulerodspulver til kosten, mens den anden gruppe fik deres kost uden gulerod. Kosten til de to grupper var kaloriemæssigt afstemt, så de var ens, og det kun var de bioaktive stoffer fra gulerødderne, som var forskellen. Resultaterne viste, at musene, der fik gulerodspulver, havde bedre blodsukkerregule-

ring, målt via glukosetolerancetests.

»Vores studie viste, at gulerødder påvirkede sammensætningen af tarmens mikrobiom – de milliarder af mikroorganismer, der lever i tarmen og spiller en vigtig rolle i fordøjelse og sundhed. Hos musene, der spiste gulerødder, blev der observeret en sundere balance mellem tarmbakterierne,« forklarer projektkoordinator Morten Kobæk Larsen, lektor ved Klinisk Institut, SDU.

Desuden havde musene flere bakterier, der producerer kortkædede fedtsyrer (SCFA'er). Disse fedtsyrer er små molekyler, som dannes, når bakterier nedbryder kostfibre, og de bidrager til reguleringen af energiomsætning og blodsukker samt understøtter en sund tarmfunktion.

Forskerne er forsigtige med at overføre resultaterne direkte til mennesker.

»Vores studie er udført i en dyremodel, og det næste skridt er at gennemføre kliniske studier, forklarer de. »Sådanne studier er dog dyre, og vi arbejder på at skaffe eksterne midler til i første omgang at kunne udføre et mindre studie med de oprensede bioaktive stoffer, der kan bane vejen for større undersøgelser og dokumentation for en forebyggende effekt,« fortæller Lars Porskjær Christensen, der er institutleder og professor ved Institut for Fysik, Kemi og Farmaci ved SDU.

Marianne Lie Becker, Syddansk Universitet

Stenalderbonden var på vand og grød

For 5.500 år siden lavede de fynske stenalderbønder ikke brød – men grød. Det viser nye analyser af fund fra en boplads på Strandby Mark sydøst for Haarby, hvor arkæologer har udgravet kværnsten og tusindvis af forkullede kornkerner. Fundene har hidtil ført til antagelsen om, at bønderne malede korn til mel for at bage brød. Men det gjorde de ikke, viser ny forskning.



En af de 14 kværnsten, som arkæologer fandt under udgravning af en 5.500 år gammel boplads på Fyn.

Foto: Niels H. Andersen.

Et internationalt forskerhold fra Danmark, Tyskland og Spanien har analyseret mikroskopiske, mineralske plantedele (fytolitter) og stivelseskorn i små hulrum på kværnstenenes overflade. Resultatet viser, at de ikke stammer fra de kornsorter, arkæologerne fandt på bopladsen, men fra vilde planter. Det betyder, at kværnstenene ikke har været brugt til at male korn til mel.

Desuden mangler stenene slidspor fra de skubbende bevægelser, der typisk bruges til

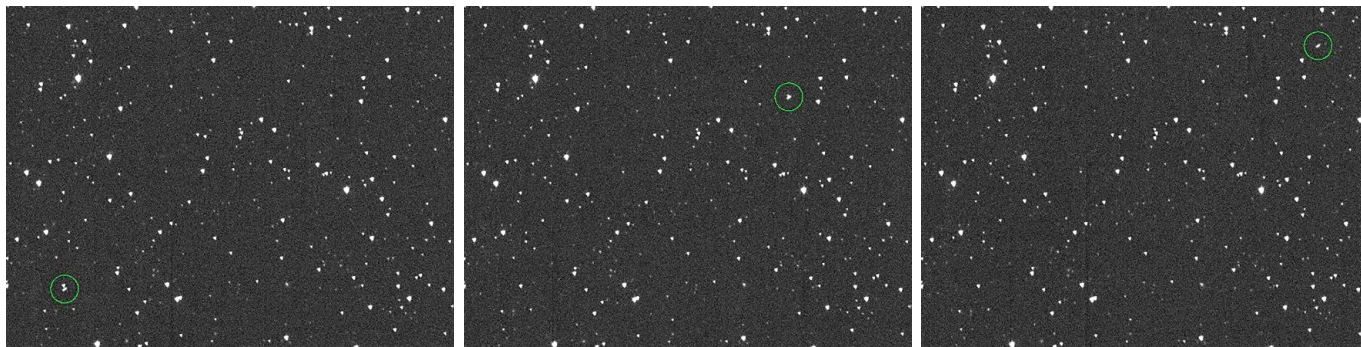
at male korn. I stedet er de formentlig blevet hamret på med stødere af sten, ligesom når man knuser noget i en morter. Sådanne stødere, der ligner afrundede, tykke stenpølser, blev nemlig også fundet på stedet. Dette tyder på, at stenalderbønderne brugte kornet til at lave grød eller vælling i stedet for brød.

Opdagelsen er udgivet i det videnskabelige tidsskrift *Vegetation History and Archaeo-*

botany. Og den støtter en hypotese, som arkæologer andre steder i Nordeuropa er nået frem til efter fund af rester af korn, der er kogt til grød og vælling: De første bønder levede ikke af vand og brød, men af vand og grød, suppleret med bær, nødder, rødder og kød. Og ja, de drak sandsynligvis vand til. Ifølge seniorforsker Niels H. Andersen fra Moesgaard Museum har man ikke fundet sikre spor efter ølbrygning i Danmark før bronzealderen.

Han stod i spidsen for studiet sammen med arkæobotaniker Welmoed Out, også fra Moesgaard. Forskerne understreger dog, at dette studie kun omfatter én boplads. Selvom det understøtter andre fund fra Tragtbægerkulturen, kan man ikke udelukke, at andre resultater vil fremkomme, når denne metode anvendes på fund fra andre udgravninger.

Peter Gammelby og Gry Hoffmann Barfod, Aarhus Universitet



Opdagelsen af asteroiden 2024 YR4. Foto: ATLAS

James Webb opdager masser af små asteroider

For at der ikke skulle være nok at bekymre sig om i denne tid, hvor trusler om handelskrige og "fjendtlig" overtagelse af Grønland flyger gennem luften, har der også i pressen været et pip om, at asteroiden 2024 YR4 muligvis vil kollider med Jorden i år 2032. Godt nok er sandsynligheden ikke stor – den er vurderet til mellem 1 og 2 % – men da asteroiden er mellem 40 og 90 meter i diameter, vil en kollision med Jorden kunne forårsage ødelæggelser, der – i hvert fald lokalt – kan overgå selv de højeste toldsætter.

Nyheden har igen sat fokus på det faktum, at mens det er relativt nemt at opdage og monitorere store objekter, dvs. dem, der er mindst en kilometer i diameter, så er det en anden sag med små asteroider ned til godt 10 meter i diameter. Og da sådanne små asteroider potentielt langt hyppigere vil komme på kollisionkurs med Jorden, vil man selvfølgelig også meget gerne kunne overvåge dem.

Nu viser ny forskning, at James Webb-Rumteleskopet formentlig vil kunne hjælpe os med netop det. Et internationalt forskerhold be-

retter således i tidsskriftet *Nature*, hvordan de ved hjælp af observationer med James Webb-teleskopet har opdaget 138 små og hidtil ukendte asteroider i det såkaldte asteroidebælte i Solsystemet. Disse 138 asteroider er så små, at de ikke kan opdages med traditionelle teknikker. Forskerne mener, at James Webb-teleskopet derfor kan blive en vigtig del af vores fremtidige beredskab mod truslen fra potentielt farlige asteroider som 2024 YR4.

CRK, Kilde: *Nature* vol. 638, pages 74-78 (2025)

Abonnements-service

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

Kontakt os på telefon:
3036 0662 / 8715 2094

E-mail:
abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

Husk at melde flytning til ny adresse.
Vi modtager desværre ikke automatisk besked om din nye adresse.

Til nye abonnenter:

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

Nye undervisningsmaterialer

Undervisningsmateriale om bæredygtig plastikkultur

Materialet tager udgangspunkt i artiklen *Hvordan opnår vi en bæredygtig plastikkultur?* fra *Aktuel Naturvidenskab* nr. 1/2024. Den ene del af materialet er et arbejdsark med spørgsmål til artiklen, som også inddrager en quiz på hjemmesiden. Varighed: ca. 60 min. Læser man artiklen hjemmefra, kan der spares en del tid på klassen.

Målgruppe: Kemi B/A-niveau.

Den anden del er en vejledning til et miniprojekt om plastiktper. Dette projekt har en varighed på cirka 4-70 min, hvor artiklen *Hvordan opnår vi en bæredygtig plastikkultur?* indgår som lektie til første modul. Projektet omfatter 3 moduler til research og forberedelse af præsentation + 1 modul til gruppepræsentationer på klassen.

Hver gruppe tager udgangspunkt i en plastiktype/plastikgruppe: 1) Konventionel Plastik, 2) Ikke-Bionedbrydeligt bioplastik, 3) Bionedbrydeligt olie-/naturgasbaseret plastik, 4) Bionedbrydeligt bioplast.

Målgruppe: Bioteknologi/Kemi A/B-niveau.

Både arbejdsark og miniprojektet kræver kendskab til alkaner. Materialet kan anvendes i forbindelse med et forløb omkring organisk kemi.

Materialet er udarbejdet af projektgruppen på Viborg Katedralskole for Aktuel Naturvidenskab

Forsyningssikkerhed med vedvarende energi

Hyppe strømafbrydelser og skyhøje elpriser kan være fremtiden for det europæiske energisystem, som i stigende grad integrerer vedvarende energi og lukker konventionelle kraftværker.

Men det er faktisk muligt at sikre en robust energiforsyning, baseret på 95% vedvarende energi, uden en uoverkommelig merpris – og som endda samtidig tager højde for grønne klimaambitioner og en netto-nul CO₂-udledning. Det viser ny forskning fra Aarhus Universitet, publiceret i tidsskriftet *Nature Communications*.

»Merprisen for at sikre et energisystem, som er robust over for 60 års historiske vejrdata, er cirka 10%. Vores model giver en 99,9% effekttilstrækkelighed og desuden en lille netto-negativ CO₂-udledning i forhold til 1990-niveauer. Det vigtige er, at vi holder igen med at udfase alle vores termiske kraft-



Foto: Colourbox

værker, fordi de kan hjælpe os frem mod et mere sikkert energisystem,« siger Ebbe Kyhl Gøtske, ph.d. ved Institut for Mekanik og Produktion ved Aarhus Universitet.

Østdanmark oplevede i 2024 det største elforbrug nogensinde. Og med stigende elektrificering af både opvarmning og transport samt nødvendige power-to-X-teknologier vil

elforbruget kun stige fremadrettet.

Og fordi vi i Danmark lukker flere og flere af de gamle kraftværker, bliver vi mere og mere afhængige af import af udenlandsk strøm. Det er særligt problematisk i perioder, hvor der både er vindstille og overskyet og den vedvarende energiproduktion er i bund, ikke kun for Danmark, men også vores nabolande, hvor man ligeledes udfaser kraftværker.

»Risikoen for effekt-utilstrækkelighed stiger med udfasningen af de gamle kraftværker, så vi bør være strategiske med, hvilke kraftværker vi bør beholde, som kan agere reservelast,« siger Ebbe Kyhl Gøtske.

Forskningen er udarbejdet af forskere fra Aarhus Universitet, DTU og Berlins Tekniske Universitet.

Jesper Bruun, Aarhus Universitet. *Nat Commun* 15, 10680 (2024).

Forskere forvises fra ældgamle klipper

Iden canadiske provins Quebec findes nogle af de ældste klipper på Jorden – ja, måske endda de allerældste. Klipperne findes på Inukjuak lands nær Hudsonbugten og er en del af det såkaldte Nuvvuagittuq-grønstensbælte. De er vurderet til at være 3,8 milliarder år gamle, hvilket dog ikke er en rekord – den har for nuværende den såkaldte Acasta-gneis i det nordvestlige Canada med en alder på 4,03 milliarder år. Men nogle forskere mener, at Nuvvuagittuq-klipperne i virkeligheden kan være endnu ældre baseret på en usædvanlig isotopsignatur i de zircon-mineraler, der bruges til state-of-the-art datering af de ældste bjergarter. Interessen for at studere Nuvvuagittuq-klipperne er derfor stor, og gennem de seneste tiår er de flittigt blevet besøgt af forskere, der har studeret dem og samlet prøver.

Men det er der sat en stopper for, fremgår det af en artikel i tidsskriftet *Science*. Området forvaltes af lokale inuit, og derfor har de forskere, der har indsamlet prøver i området, været af-



Ældgamle klipper i det såkaldte Nuvvuagittuq-grønstensbælte. Foto: Jonathan O'Neil.

hængig af de lokales støtte for at kunne arbejde i området. Men efter at have oplevet flere episoder med alt for hårdhændet fremfærd i området, har lokalbefolkningen lukket helt for, at der kan indsamles prøver i området.

Ifølge de lokale er problemet, at nogle geologer har taget store mængder klippe fra området og dermed skadet landskabet. Desuden har de angiveligt set bjergarter indsamlet i området til salg på internettet for op imod 10.000 dollars, hvilket har vakt stor forargelse.

Ifølge *Science* er en af de forskere, der bliver hårdt ramt af beslutningen geologen Jonathan O'Neil fra University of Ottawa, som i to årtier har studeret klipper i området. Men han kan godt forstå den lokale beslutning, da han også selv har set tegn på "uetisk" indsamling af prøver i området. For eksempel var en traditionel stenstruktur, som inuitterne har brugt som navigationsmærke, blevet ødelagt.

Mange geologer kommer helt sikkert til at begræde, at man nu ikke længere må hente prøver i området. Tilgængelige bjergarter fra Jordens tidligste barndom er nemlig notorisk sjældne. Og analyser af sådanne ældgamle bjergarter er vigtige for blandt andet at kunne afgøre, hvornår livet opstod på Jorden. De lokale myndigheder samarbejder dog nu med forskere om at etablere en naturpark, der beskytter klipperne i området. Så vil man stadig kunne komme og studere klipperne – dog uden mulighed for at tage prøver med hjem.

CRK, Kilde: *Scien*. vol. 387, iss. 6734, pp 566-567

TIP DINE ELEVER OM STUDERENDE FOR EN DAG

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

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



Fotografer: Anders Trærup og Lars Kruse, AU Foto

Læs mere og se tilmeldingen på

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

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

Forfatterne



Sara Green er lektor i videnskabsteori og leder af forskningsprojektet COPE (Consumer Medicine: Philosophical and Ethical Implications), som undersøger forventninger til og brugen af wellness-teknologier til optimering af sundhed og sygdomsforebyggelse. sara.green@ind.ku.dk



Olivia Spalletta er post.doc. i COPE-projektet og har baggrund i medicinsk antropologi. Olivia forsker i forholdet mellem sundhedsinfrastruktur, menneskesyn, og hverdagsliv. olivia.spalletta@ind.ku.dk



Lukas Deviletti Skov er ph.d.-studerende i COPE-projektet og har baggrund i tekno-antropologi. Lukas forsker i forbrugerrettet sundhedsteknologi, og dets rolle i forebyggelse og behandling af metaboliske sygdomme. lds@ind.ku.dk

Alle ved Sektion for Videnskabshistorie og Videnskabsteori, Institut for Naturfagenes Didaktik, Københavns Universitet.



Christoffer Bjerre Haase er læge under specialisering i almen medicin samt ph.d. og forsker på Københavns Universitet. Christoffer forsker i data, diagnostik og magt med særlig interesse i, hvordan forskellige sundhedsaktører forstår og bruger data til at påvirke moderne diagnostik.

COPE-projektet er støttet af Carlsberg Fondet



Illustration: Shutterstock

GØR SMARTWATCHES OS SUNDERE?

Smartwatches og sundhedsapps, der overvåger din tilstand, er populære. Det er dog ikke let at afgøre, om det reelt gør os sundere, og der er også en potentiel bagside af medaljen i form af unødigt bekymring og risiko for overbehandling.

BIP. BIP. BIP. Alarmen tvinger dig ud af søvnen, og du famler på bordet for at slukke den. Det er mørkt udenfor. Du føler dig træt, selvom du gik tidligt i seng.

Du tjekker søvnappen på dit smartwatch: Du vågner for mange gange om natten, baseret på din puls og vejtrækning. Ifølge appen kan afbrudt søvn på sigt føre til en række alvorlige sygdomme. Bør du gå til læge?

Har du et smartwatch på dit håndled eller sundhedsapps på din mobiltelefon? I så fald er du ikke alene. Et stigende antal danskere bruger dagligt sundhedsteknologier til at indsamle data om kroppens tilstand. Nogle bruger teknologierne til at få overblik over deres træning eller holde fast i deres vægttab. Andre holder øje med deres puls, blodtryk, eller søvn. Producenterne reklamerer med, at sundhedsteknologierne gør det muligt at opdage sundhedsproblemer tidligere. Men

hjælper teknologierne os med at leve sundere, eller kan de skabe unødvendig bekymring og overbehandling? Som vi skal se i det følgende, er der ikke et simpelt svar på dette.

Wellnessindustrien i hastig vækst

Ifølge en bog med titlen *The Age of Scientific Wellness* fra 2023 har sundhedsteknologier potentialet til fundamentalt at forandre lægevidenskaben og mulighederne

for sygdomsforebyggelse. Bogen er skrevet af to amerikanske forskere, Leroy Hood og Nathan Price, som mener at fremtidens sygdomsforebyggelse er "personalized, predictive, data-rich and *in your hands*". Hood og Price refererer her til brugen af såkaldte *wellnessteknologier*, dvs. bærbare enheder og selvtests som indsamler data, der kan bruges til at rådgive brugeren om, hvordan man kan optimere sin sundhed og leve længere.

Wellnessteknologier henvender sig både til personer med diagnosticerede sygdomme og til raske individer, som ønsker at leve sundere og forebygge fremtidige sygdomme. Den brede målgruppe betyder, at markedet for wellnessindustrien er enormt. Verdens største teknologivirksomheder har identificeret sundhedssektoren som et nyt vækstområde med stort potentiale. Der er allerede over 350.000 sundhedsapps på markedet, og salget af smartwatches forventes at stige årligt med 16% i Danmark. Sundhedsteknologierne giver både virksomheder og brugere adgang til sundhedsdata og informationer, som tidligere primært var beholdt sundhedsprofessionelle og biomedicinske forskere.

Er løfterne videnskabeligt dokumenterede?

Selvom der findes mange sundhedsapps og smartwatches, mangler de fleste videnskabelig dokumentation for, at de kan forebygge sygdomme eller forbedre sundheden. Wellnessteknologier klassificeres ikke som medicinsk udstyr og skal derfor ikke leve op til de høje dokumentationskrav, som kræves for at teknologier kan diagnosticere sygdom eller sygdomsrisiko. Nogle teknologier, såsom visse apps tilknyttet Apple Watch, reklamerer med at de er "FDA-cleared". Det betyder, at de overfor det amerikanske Food and Drug Administration er dokumenteret til at have samme funktion som et tidligere godkendt produkt. For eksempel kan en app tilknyttet Apple Watches måle uregelmæssig hjerterytme med høj

Hvad er forskellen på falske positive svar og overdiagnostik?

Falsk positivt svar

Et falsk positivt svar opstår, når en test fejlagtigt indikerer, at en person har en sygdom eller tilstand, som de faktisk ikke har. Falsk positive test kan føre til unødvendig bekymring og overbehandling. Falsk positive tests skyldes ofte fejl i testens design eller lav præcision af målingen.

Eksempel: En blodprøve indikerer, at en 70-årig mand har prostatakræft. Efterfølgende undersøgelse på hospitalet viser, at testen tog fejl, og manden alligevel ikke har kræft.

Overdiagnostik

Overdiagnostik er, når man giver en korrekt diagnose af risikofaktor eller en sygdom, men hvor afdigelsen ikke ville have udviklet sig til at påvirke personens sundhed. Personen vil derfor ikke have gavn af diagnose og behandling. Overdiagnostik kan føre til unødvendig bekymring, undersøgelser og overbehandling. Årsager til overdiagnostik kan være *overdefinition* (for brede definitioner af sygdom eller risikokategorier) eller *overdetektion*, hvor man måler på flere og flere eller ved hjælp af mere følsomme teknologier, som fanger flere tilfælde.

Eksempel: Mange mænd udvikler i løbet af livet celleforandringer i prostata, som opfylder kriteriet for prostatakræft, men som ikke ville udvikle sig hurtigt nok til at give symptomer i deres livstid. Aggressiv screening kan derfor føre til overdiagnostik og overbehandling, hvor raske mænd bliver til patienter, som bliver syge (eller sygeliggjorte) af undersøgelser og bivirkninger af behandlingen.

præcision og advare om unormalt høj eller lav puls, lidt ligesom teknologier man kender fra hospitalet. Selvom den typiske bruger ikke er syg, kan uret fungere som en slags sundhedsalarm ved konstant at overvåge hjerterytmen.

Hvorfor bør man ifølge Apple holde øje med sin hjerterytme? Ifølge firmaets hjemmeside kan en uregelmæssig hjerterytme være tegn på hjerteflimmer, som i værste fald kan føre til blodpropper eller hjertestop, hvis det ikke behandles. Brugere opfordres derfor til at søge læge, hvis appen giver en advarsel. Alligevel understreger Apple, at deres teknologi »ikke er beregnet til medicinsk brug«. En egentlig godkendelse til medicinsk brug (FDA approval) ville kræve dokumentation fra kliniske forsøg, som validerer, at overvågning af hjerterytme og forebyggende behandling reelt reducerer risikoen for hjertesygdom.

Her bliver sagen mere kompliceret på grund af problemet med overdiagnostik, som vi introducerer nedenfor. Derfor er det for mange producenter mindre risikabelt at holde sig til wellnessteknologier i stedet for at udvikle teknologier til egentlig medicinsk (selv)diagnostik.

Problemet med overdiagnostik

Det virker logisk, at det er bedre at forebygge sygdomme tidligt fremfor at vente på symptomer. Med nye teknologier kan man opdage skjulte sundhedsproblemer hos personer, som ellers føler sig raske. Men når man antager, at tidligere forebyggelse altid er bedre, forudsættes det, at risikofaktorer såsom uregelmæssig hjerterytme typisk udvikler sig til symptomatisk sygdom. Det er langt fra altid tilfældet, som vi forklarer senere i artiklen.

Problemet med overdiagnostik opstår, fordi nogle afdigelser, for ek-



Illustration: Shutterstock

sempel uregelmæssig hjerterytme eller celleforandringer, kan gå over af sig selv eller udvikler sig så langsomt, at de ikke giver problemer i form af hjertesygdom eller kræft. Overdiagnostik er ikke det samme som falsk positive resultater, hvor testen tager fejl. I tilfælde med overdiagnostik finder testen eller måleapparatet reelle risikofaktorer eller tidlige tegn på sygdom (se boks). Men prisen for at forebygge sygdom hos nogle er ofte, at man hos andre diagnosticerer ting, som aldrig udvikler sig til et problem. Derfor er problemet med overdiagnostik også et etisk problem: Hvor mange er man villige til at overdiagnosticere og overbehandle for at forebygge et tilfælde af alvorlig sygdom?

Paradoksalt nok kan forsøget på at gøre sygdomsforebyggelse mere præcis via mere følsom selvmålingsteknologi lede til mere overdiagnostik, fordi man måler flere ting og med højere præcision. Risikoen for overdiagnostik er desuden størst, når man leder efter afvigelser i en befolkningsgruppe, som har relativt lav risiko for at udvikle en given sygdom. Begge dele er tilfældet for wellnesssteknologier. Derfor er det vigtigt at foretage videnskabelige undersøgelser af, om teknologierne faktisk gør en positiv forskel for vores sundhed og samfund.

For at undersøge forholdet mellem gavn og skade, herunder risikoen for overdiagnostik, kræves en statistisk analyse af forskellen på en

gruppe, som er blevet monitoreret (eller screenet) og en gruppe, som ikke er. Et eksempel på dette er et dansk studie kaldet LOOP (se faktaboks). LOOP-studiet undersøgte effekten af en teknologi til opdagelse af asymptomatisk hjerteflimmer, der fungerer lidt som et avanceret smartwatch. Studiets resultat er, at selv avanceret teknologi skal vurderes kritisk – mere data og flere diagnoser fører ikke altid til bedre sundhed.

Igangværende forskning undersøger, hvor mange personer med asymptomatisk hjerteflimmer, der kan forventes at udvikle hjertesygdom i fremtiden, hvis tilstanden ikke behandles. Fremtidig forskning, herunder Apples egne studier, kan også give vigtig viden om, hvor mange personer med forskellige demografiske profiler, der har uregelmæssig hjerterytme (ofte kaldet den "naturlige variation" af en tilstand). På sigt kan den viden hjælpe med til at gøre forebyggelsesindsatser mere præcise. Men indtil da kan vi altså risikere at (over) reagere på tegn fra smartwatches uden et lægefagligt evidensgrundlag.

Når kroppen "larmer"

Forfatterne til denne artikel har tilsammen interviewet 43 danske læger om, hvordan de oplever brugen af data i deres praksis. Lægerne synes ofte, at det er svært at omsætte patienters egne data til konkrete anbefalinger. Mange oplever, at selvmonitorering er mest nyttigt for patienter med kendte

sygdomme som type 2-diabetes eller en hjertesygdom. Til gengæld er det langt sværere at tolke data fra raske personer med små afvigelser, fordi de ikke nødvendigvis hænger sammen med en specifik sygdom. Data, som er nyttige i én situation – for eksempel til at overvåge syge patienter – kan være svære at tolke for raske personer, der måske bare i en periode oplever små udsving i hjerterytmen.

Et godt eksempel er søvn. Når en søvnapp eller en læge vurderer, om et søvnmønster er "unormalt", sker det altid ud fra nogle fastsatte normalværdier. Men grænsen for, hvad der er normalt, er ikke altid baseret på solid viden fra forskning, og "normalværdier" kan variere alt efter personen og konteksten. Mange læger genkender udfordringen: Alle oplever perioder med dårlig søvn eller træthed, uden at der nødvendigvis er noget galt. Som en læge, vi interviewede, sagde, så "larmer" vores krop nogle gange, og kunsten er at navigere i de mange tegn og symptomer, hvor kun nogle kræver medicinsk opmærksomhed.

Teknologier kan give et bedre overblik over tendenser, og hvad der for den enkelte er normalt. Nogle har højere blodtryk end andre, og hos nogle svinger det mere end andre i løbet af dagen. Men ifølge mange læger kan de mange data også "øge støjen" fra kroppens udsving, fordi vi pludselig måler ting, vi tidligere ikke bekymrede os om. Derfor er der behov for mere forskning i, hvordan vi bedst kan udnytte teknologiernes muligheder og håndtere de nye kilder til information om kroppen.

Hvordan påvirker teknologierne os?

Sundhedsteknologier måler ikke bare kroppen. De er også designet til at ændre vores adfærd. Formålet med de mange apps er jo blandt andet at motivere os til at bevæge os mere eller sove mere. Dermed kan de aktivt ændre vores krop – og måske også vores opfattelse af os selv, og hvad et sundt liv inde-

Yderligere læsning

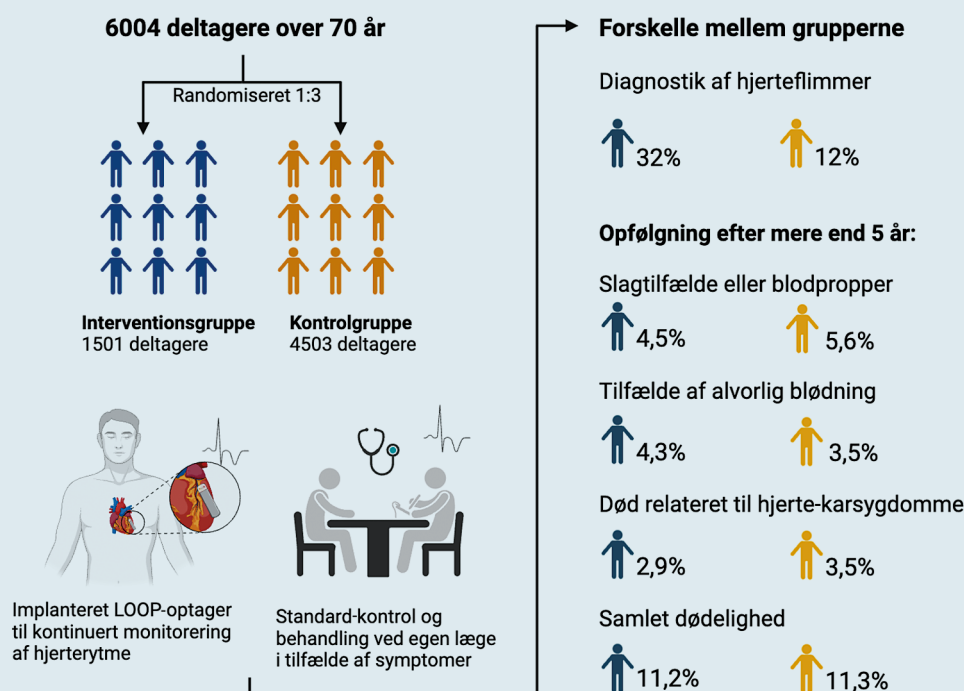
Duus, R. & Cooray, M. How we discovered the dark side of wearable fitness trackers. *The Conversation*, June 19, 2015.

Green S, Vogt H, Brodersen JB. De raske patienter i personlig medicin. I: Klausen SH, Christiansen K, red. *Personlig medicin: filosofiske og tværvideenskabelige perspektiver*. Munksgaard, 2020:181-212.

Haase, C. B. (2024). Du kan måle din sundhed selv. Men pas på! Det er ikke sikkert, at det er rigtigt. *Jyllands-Posten* 02/1-2024.

Svensden JH, Diederichsen SZ, Højberg S et al. Implantable loop recorder detection of atrial fibrillation to prevent stroke (The LOOP Study): a randomised controlled trial. *The Lancet*. 2021;398:1507-16.

Loop-studiet: Hjerterflimmer og risiko for slagtilfælde



LOOP-studiet var et stort dansk forsøg med 6004 forsøgsdeltagere. I studiet brugte forskere en implanteret enhed, kaldet en loop-optager (ILR), til at opdage hjerterflimmer hos en gruppe forsøgsdeltagere (interventionsgruppen). De sammenlignede denne metode med en kontrolgruppe, hvor hjerterflimmer blev diagnosticeret via normale procedurer. Hjerterflimmer bliver typisk først diagnosticeret, når en person oplever ubehag eller går til lægen i anden sammenhæng for at få undersøgt hjertet. Alle deltagere i forsøget var ældre personer (70-90 år), som ud fra andre risikofaktorer blev vurderet til at have øget risiko for at få en blodprop i hjernen (også kaldet slagtilfælde). Forsøgsdeltagere blev tilfældigt fordelt i forholdet 1:3 i henholdsvis interventionsgruppen og kontrolgruppen (se figur). Hos interventionsgruppen, som fik en ILR og blev overvåget konstant,

fandt forskerne, at 32% havde hjerterflimmer, selvom de ikke havde symptomer. I kontrolgruppen, som ikke blev overvåget kontinuerligt, fandt man kun hjerterflimmer hos cirka 12 %. Når hjerterflimmer blev opdaget hos en deltager, startede vedkommende på en forebyggende standardbehandling med blodfortyndende medicin. Umiddelbart kunne man måske forvente, at interventionsgruppen dermed havde reduceret risiko for slagtilfælde. Men selvom den nye teknologi gjorde det muligt at opdage dobbelt så mange tilfælde af hjerterflimmer, påviste undersøgelsen ikke nogen forskel i slagtilfælde mellem de to grupper. Interventionsgruppen havde altså ikke påviselig gavn af diagnosen og medicinen. Diagnosen kan tværtimod skade patienterne gennem unødvendige bekymringer om fremtidig sygdom og bivirkninger ved den blodfortyndende medicin.

bærer. Teknologierne vil have os til at gøre bestemte ting og leve op til bestemte normer for at "få kontrol" over vores sundhed.

Men grænsen mellem at opnå kontrol og føle sig kontrolleret kan være hårfin. For eksempel viste en undersøgelse blandt FitBit-brugere, at de fleste oplevede at få mere kontrol over deres sundhed. Men mange følte også et pres for at leve op til urets aktivitetskrav, hvilket kunne resultere i skyldfølelse eller meningsløse aktiviteter. En af de

interviewede læger fortalte for eksempel, hvordan hun flere gange havde gået rundt i sin have om aftenen for at opnå de 10.000 daglige skridt, selvom hun godt vidste, at der ikke var lægefaglig begrundelse for det specifikke mål.

Mange oplever sundhedsteknologier som nyttige, men de rejser også vigtige spørgsmål: Bør det være tilladt at markedsføre produkter, som advarer mod risiko for alvorlige sygdomme, hvis de ikke er lægefagligt undersøgt? Hvilke konsekvenser

kan det have, hvis flere kontakter lægen med bekymringer baseret på selvmåling? Hjælper smartwatches og sundhedsapps os med at holde en sundere livsstil og mærke os selv? Eller bliver hverdagen unødvendigt medikaliseret, når selv en gåtur eller søvn ses som en sundhedspræstation?

Vi håber, at vores korte artikel kan facilitere diskussioner af disse spørgsmål, samt hvordan sundhed mere generelt måles og opleves i vores digitaliserede samfund. ■

Soldaterfluelarver (*Hermetia illucens*) er næringsrige og protein fra disse kan produceres mere bæredygtigt end fra traditionelle husdyr som kvæg og svin. I et fælles forskningsprojekt mellem forskere fra Aalborg Universitet og Aarhus Universitet undersøger vi måder, hvorpå vi kan optimere produktionen af insekter. Foto: Stine Frey Laursen.

Forfatterne



Stine Frey Laursen er ph.d., postdoc ved Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet. sfl@bio.aau.dk



Laura Skrubbeltrang Hansen er ph.d., postdoc ved Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, Aarhus Universitet. ish@qgg.au.dk



Jesper Givskov Sørensen er professor ved Biologisk Institut, Aarhus Universitet jesper.soerensen@bio.au.dk



Torsten Nygård Kristensen er professor ved Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet. tnk@bio.aau.dk



SKAL VI LEVE AF LARVER?

Insekter som en bæredygtig kilde til føde

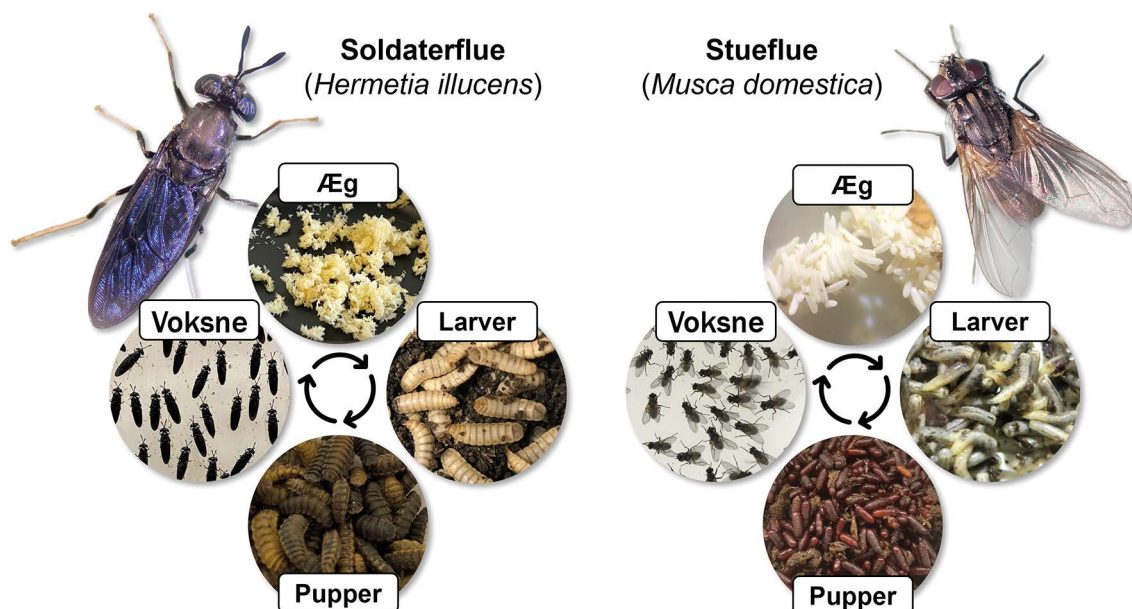
Insekter kan bruges som føde til både dyr og mennesker, og det er potentielt muligt at producere dem med et lavere ressourceforbrug og miljøaftryk end traditionelle husdyr.

Forskning viser nu, hvordan man kan tilpasse metoder fra traditionel husdyrproduktion til at "forbedre" insekter rent genetisk.

Vi er flere mennesker på jorden end nogensinde før: Nu 8 milliarder – og vi står overfor en kæmpe udfordring i forhold til at imødekøbe en stigende fødevarerforspørgsel og samtidig minimere fødevarerproduktionens belastning af miljøet. Insektavl er et lovende redskab i værktøjsskassen, fordi insekter har mange egenskaber, der gør dem egnede til brug som både

dyrefoder og mad til mennesker. De har højt proteinindhold og er gode kilder til vitaminer og mineraler. I modsætning til traditionelle husdyr er insekter vekselvarme, så de skal ikke bruge energi på at opretholde en konstant kropstemperatur. Det betyder, at en større andel af energien fra deres føde kan bruges til at vokse – og derfor er de enormt effektive til at omsætte deres foder til biomasse. Sammenlignet med

produktionen af traditionelle husdyr forbruger insekter færre ressourcer i form af land og vand, og der udledes også færre drivhusgasser per enhed protein produceret. Derudover kan insekter leve af en lang række rest- og biprodukter, såsom madaffald og gødning. Insekter kan derved indgå i en cirkulær fødevarerproduktion og omdanne affaldsprodukter af lav kvalitet til biomasse af høj kvalitet.



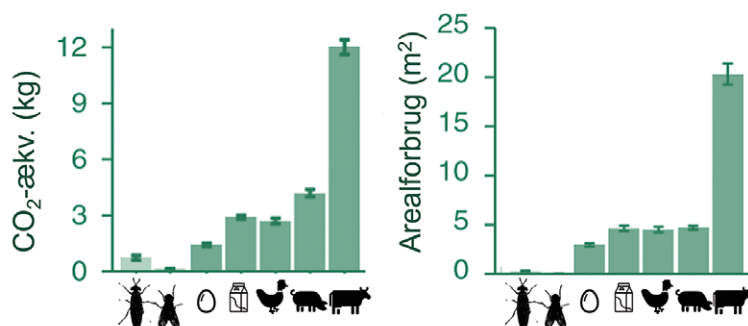
Livscyklus for soldaterfluen (*Hermetia illucens*) og stuefluen (*Musca domestica*). En hunflue af begge arter lægger typisk cirka 500-1000 æg i sit liv. For soldaterfluen tager udviklingen omkring seks uger fra æg til æg, mens denne proces tager cirka fire uger for stuefluen (udviklingstiden afhænger dog af miljøforhold som temperaturen, de holdes ved). Til sammenligning er generationsintervaller typisk 2 til 3 år i svin og kvæg. Fotos: Stine Frey Laursen.

For at gøre produktionen af denne nye proteinkilde endnu mere bæredygtig, har vi sat os for at undersøge forskellige måder at optimere produktionen af insekter. Det har vi gjort gennem et forskningsprojekt finansieret med midler fra Danmarks Frie Forskningsfond med involverede fra Aarhus Universitet og Aalborg Universitet.

Overordnet er der to måder at optimere produktionen af insekter på: Enten kan man forbedre miljøforholdene – det vil sige optimere på temperatur, foder eller andre miljøfaktorer, der har betydning for insekternes vækst og produktivitet. Eller også kan man “forbedre” insekterne rent genetisk. Det sidste indebærer, at man tilpasser og anvender de principper og værktøjer, som man i årtier har brugt på afgrøder og husdyr – nu blot på insekter. Det involverer blandt andet selektiv avl, hvor insektpopulationerne forbedres ved at udvælge insekter med ønskværdige egenskaber.

Fluer kan omdanne affald til mad

Nogle insekter har en naturlig evne til at udnytte affaldsprodukter af lav kvalitet, som ikke kan bruges som foder til traditionelle husdyr.



Udledningen af drivhusgasser (målt i CO₂-ækvivalenter) og arealforbrug forbundet med produktionen af insektprotein (fra venstre: soldaterflue og stueflue) sammenlignet med æg, mælk, kylling, svinekød og oksekød. Figuren er modificeret fra Parodi et al. (2018) *Nature Sustainability*.

Dermed har de potentialet til at producere værdi ud fra ressourcer, der typisk vil havne på lossepladser, blive brugt som gødning på marker eller blive brændt på forbrændingsanlæg. I vores projekt arbejder vi primært med to insektarter; soldaterfluen (*Hermetia illucens*) og stuefluen (*Musca domestica*), som netop er eminente til at omsætte affaldsprodukter. Men da der findes flere end en million beskrevne arter af insekter – og mange endnu ubeskrevne arter – kan der sagtens være arter, som kan gøre det endnu bedre.

I modsætning til traditionelle husdyr, der er blevet opdrættet af landmænd i tusinder af år, så er stor-

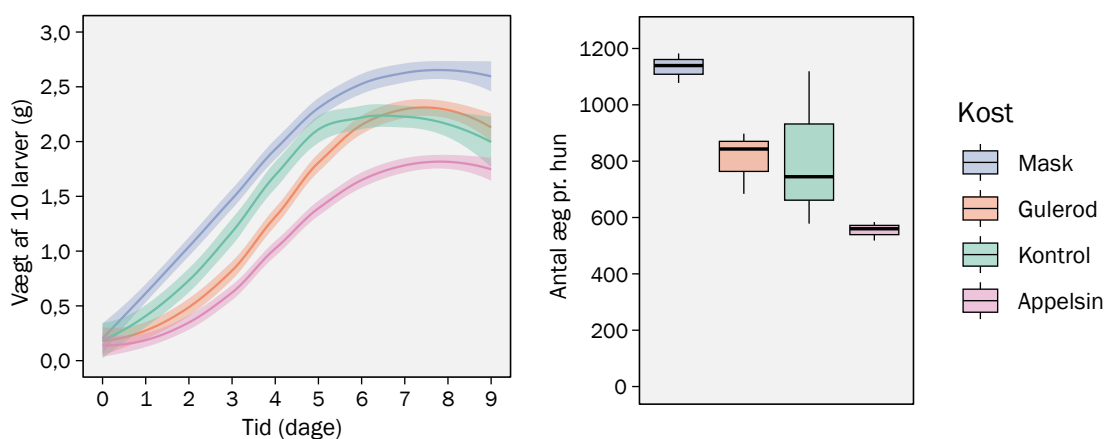
skala-insektopdræt stadig et relativt nyt område. Det betyder, at vi har begrænset viden om den grundlæggende biologi for de arter, der arbejdes med. Der er mange faktorer, der har betydning for insekters vækst og produktivitet. Det miljø, insekterne lever i, har stor indflydelse på vigtige egenskaber, såsom hvor hurtigt de vokser, hvor store de bliver, og hvor mange æg de producerer. Når insekterne fodres med næringsfattige fodertyper som husdyrgødning kan det påvirke deres produktivitet. Vi har i vores forskning for eksempel vist, at fodertype kan påvirke væksthastighed og størrelse af soldaterfluelarver samt antal æg, de kan producere som voksne fluer. En vigtig pointe fra forsøget er, at

Et insekt er ikke bare et insekt

Der findes mere end en million beskrevne arter af insekter – og mange flere, som endnu ikke er beskrevet. Insekter inkluderer både fluer, biller, sommerfugle, bier, myrer, bladlus, græshopper og mange flere vidt forskellige organismer. Faktisk er de genetiske forskelle mellem forskellige insektarter meget større end mellem traditionelle husdyr såsom kvæg og grise. Den seneste fælles stamform for alle insekter levede for cirka 400 millioner år siden, mens den seneste fælles stamform for koen og grisen levede for cirka 50 millioner år siden. Forskellige insektarter kan have meget forskellige præferencer i forhold til eksempelvis temperatur og føde. Ved at undersøge disse forskelle kan produktionen af insekter måske gøres endnu mere bæredygtig, for eksempel ved at opdage nye kombinationer af insekter og affaldsprodukter.



Foto: Line Holm Andersen



Figurerne viser vækst af soldaterflue-larver og gennemsnitligt antal æg produceret af voksne fluer i forsøg, hvor de blev fodret med fire forskellige fodertyper: Mask (et restprodukt fra brygningen af øl), gulerødder, appelsin og en kontrol (balanceret fødesammensætning optimal for vækst). Data efter Laursen et al. (2024) *Waste Management*.

selvom produktiviteten er lavere på mere næringsfattige fodertyper, kan det stadig være meget bæredygtigt at anvende affaldsprodukter som larvefoder.

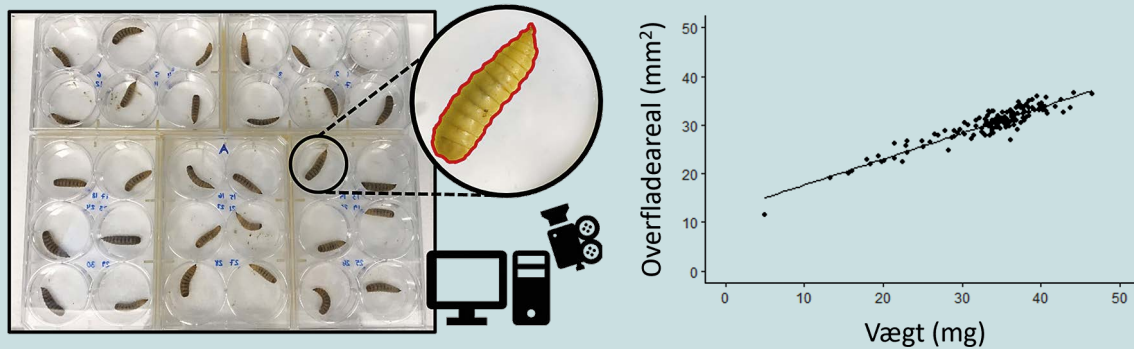
Udover at kende insekternes krav til næring er viden om optimale temperaturer og luftfugtigheder, sygdomme, og reproduktionsbiologi også vigtig for en effektiv og bæredygtig produktion. Desuden kan nogle af de rest- og biprodukter, som vi gerne vil fodre til insekter, potentielt indeholde sygdomsfremkaldende mikroorganismer eller sundhedsskadelige stoffer. Det og meget andet skal undersøges som en del af udrulningen af insektproduktion. Læg dertil hele lovgivningsområdet, hvor regelsæt skal tilpasses til at rumme en helt ny klasse af husdyr.

Udfordringer ved insektavl

I vores forskning har vi fokuseret på at bidrage med værktøjer til at forbedre insekters genetik gennem selektiv avl. Det har vi primært gjort ved at bruge avlsværktøjer, som allerede er vidt anvendt i husdyr- og planteavl – men endnu ikke hos insekter. Vores mål er at forbedre vigtige egenskaber i insekterne, såsom væksthastighed og kropsstørrelse, uden at det bliver på bekostning af deres sundhed og reproduktion. I den traditionelle husdyrproduktion har man med sådanne metoder for eksempel kunnet mere end fordoble mælkeproduktionen hos malkekøer og vægten af slagtekyllinger i løbet af de seneste cirka 50 år. Selektiv avl er således en væsentlig årsag til, at vi kan købe høj kvalitetsfødevarer til lave priser i supermarkedet.

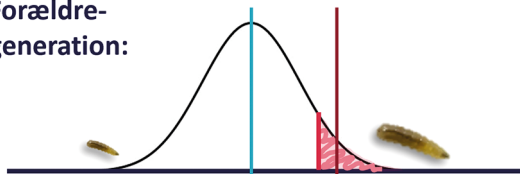
Selvom ideen med selektiv avl er enkel – nemlig at udvælge de individer, der har fordelagtige gener i forhold til de egenskaber, vi gerne vil fremme – er avl i insekter ikke uden udfordringer. Insekter har typisk meget korte generationsintervaller, og det tager kun få uger at gennemgå de forskellige livsstadier. På den ene side er det en fordel, når vi snakker avl, da vi kan opnå store genetiske ændringer på kort tid. Men den korte generationstid betyder også, at vi skal kunne måle de ønskede egenskaber meget hurtigt for at identificere de bedste individer – og ofte skal vi måle disse egenskaber i tusindvis af individer, hvilket kan være en stor udfordring. En anden udfordring er, at i modsætning til traditionelle husdyr, hvor enkelte dyr kan mærkes, for eksempel med øremærker, så er det vanskeligt at

Hvordan finder vi de største blandt hundredvis af larver?

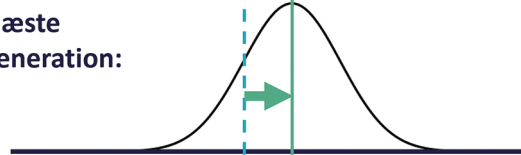


En udfordring ved at arbejde med insekter er, at man ofte skal bestemme egenskaberne for mange individer på kort tid. Et eksempel er larvestørrelse, hvor man typisk vejer larverne for at bestemme deres størrelse, men det kan tage lang tid at veje flere tusinde larver. Vi har udviklet en metode til hurtigt at bestemme størrelsen på op til 30 individuelle larver ad gangen ved at måle overfladearealet ved hjælp af et kamera og et computerprogram. Vi fandt en god sammenhæng mellem larvernes vægt og overfladeareal (se graf), og med den nye metode kunne vi måle fem gange så mange larver på samme tid som ved at veje dem.

Forældre-generation:



Næste generation:



Figuren viser princippet i selektiv avl, hvor formålet for eksempel kan være at opnå større larver. Her udvælges de største larver i populationen (lyserød skravering), og kun de får lov at bidrage med afkom til næste generation. Afkommet i næste generation vil så i gennemsnit blive større end i forældrenes generation (grøn vs. lyseblå linje). Ændringerne sker fra generation til generation og er baseret på, at størrelsen af de udvalgte forældre skyldes deres gener – og at disse gener gives videre til deres afkom, der derfor også bliver store.

mærke et insekt. Det skyldes, at et insekt gennemgår en fuldstændig forvandling og smider sit exoskelet (et stivgørende strukturelement, der sidder uden på insektet), når det går fra et livsstadie til et andet.

Vi har fundet gode løsninger på disse udfordringer. Blandt andet har vi udviklet metoder til effektivt at få præcis information om størrelse og stresstolerance på mange individer på kort tid, hvilket gør udvælgelsesprocessen hurtigere og mere pålidelig. Derudover benytter vi forsøgsdesign, hvor vi har styr på slægtskabet mellem individer.

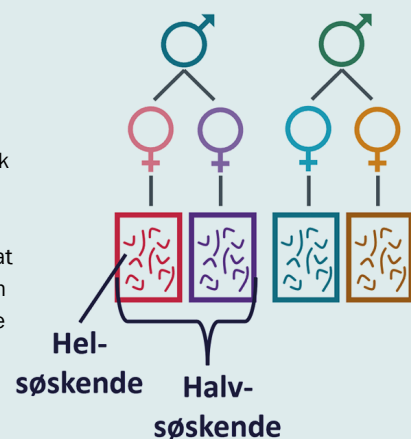
Hvorfor vil vi kende fluernes stamtræ?

Avl kan foregå på mange måder, og den kan være kompleks, men også mere effektiv tilgang, som vi arbejder

Principper bag selektiv avl

For at selektiv avl skal fungere, er det nødvendigt, at der er genetisk variation – det vil sige genetiske forskelle mellem individerne. Der er større risiko for at miste genetisk variation i små populationer og i populationer med høj grad af indavl. Derfor er det vigtigt for avlere at holde øje med slægtskabet mellem individer, blandt andet for at kunne kontrollere indavl.

Dette kan gøres med et særligt forsøgsdesign, der netop giver os mulighed for at kende slægtskabet mellem alle individer. I praksis laver man en række familier med forskelligt slægtskab: En han parres med flere hunner, og på den måde genereres både helsøskende (afkom med samme far og samme mor) og halvsøskende (samme far men forskellige mødre). Dette design har flere fordele. Ved at undersøge i hvor høj grad helsøskende, halvsøskende og ikke-beslægtede individer ligner hinanden, kan vi bestemme, hvor arvelige forskellige egenskaber er og dermed forudsige, hvor "nemme" de vil være at ændre gennem avl.



Forbedring af larvestørrelse gennem selektiv avl i stuefluer



Vi har udført selektiv avl i en population af stuefluer med målet at øge størrelsen på larver. I hver generation udvalgte vi de bedste 60 hanner og 120 hunner, kontrollerede hvem der parrede sig, indsamlede æg og fordelte dem i rør med vækstmedie, målte størrelsen på larverne, og lod dem udvikle sig til voksne fluer, før vi igen udvalgte de bedste hanner og hunner. I hver eneste generation talte vi 3400 æg og fordelte dem i rør, målte størrelse på 1250 larver og talte og kønssorterede 850 fluer. Efter fem generationer med selektiv avl sammenlignede vi de selektede fluer med en kontrolpopulation. Det gjorde vi ved at opfostre larverne på både deres standard-kost og på en næringsfattig kost, og så målte vi størrelsen på larverne. Resultaterne viste, at larverne fra selektionslinjen var blevet større end kontrollarverne – især når de blev fodret med en næringsfattig kost.

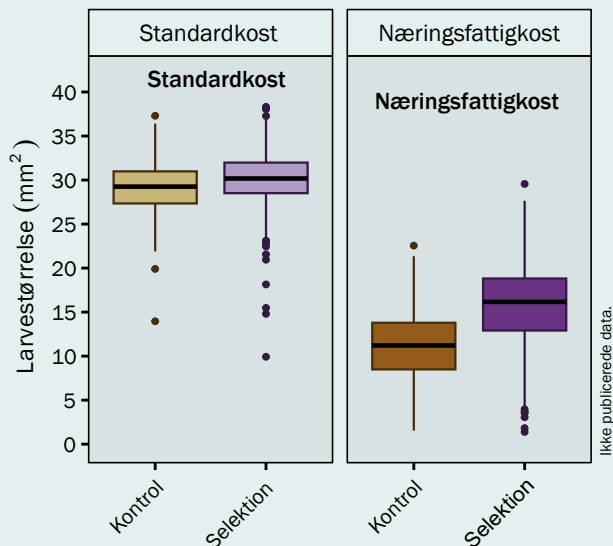


Foto: Stine Frey Laursen

med i vores forskning, er afhængig af viden om slægtskab mellem individer. Et simpelt alternativ er det, vi kalder fænotypisk selektion eller masseselektion. Princippet er her, at man i en population af insekter måler egenskaber (fænotyper), som ønskes ændret, og benytter indivi-

der med ønskede egenskaber som forældre til den næste generation. Her holder man ikke styr på slægtskabet mellem individer, og det har to negative konsekvenser:

1) Der er stor risiko for indavl. Det er der, fordi forældrene jo netop

udvælges, fordi de ligner hinanden, og derfor vil de i gennemsnit også være tættere beslægtet end tilfældigt udvalgte individer. Det kaldes assortativ parring og er noget skidt i avlssammenhæng, fordi det fører til indavl og såkaldt indavlsdepression, som kan udmønte sig i form af

blandt andet reduceret reproduktion, levealder og vækst.

2) Det er vanskeligt at selektere for flere egenskaber på samme tid. Et eksempel kan være, at man gerne vil øge væksthastigheden, men samtidig ønsker larver med et særligt proteinindhold. Måling af en larves proteinindhold kræver, at den moses, og derfor kan den ikke bidrage som forælder til næste generation.

Disse problemstillinger knyttet til fænotypisk selektion kan vi styre udenom i vores tilgang, da den netop er baseret på viden om slægtskab. Herved kan vi minimere indavl, og når en larve ofres til proteinmålinger, kan vi blot i stedet vælge individer, som er tæt beslægtet med den, til det videre avlsarbejde.

Vi skal lære at spise insekter
Insekter har været spist af mennesker og brugt som foder til husdyr i mange kulturer i århundreder. Men det er nyt i vores del af

verden, og som beskrevet i denne artikel er der meget at lære i forhold til at udvikle og optimere produktionen.

Vores forskning er et skridt på vejen og viser, at der er mange muligheder for, at insekter kan udgøre en af mange nye måder at producere foder og fødevarer på. Vi har blandt andet vist, at vigtige egenskaber kan ændres gennem selektiv avl, og dermed at der er et stort potentiale for, at vi i fremtiden kan udvikle mere effektive og højtydende insektpopulationer, der kan bidrage til en fødevareproduktion med et lavere miljø- og klimaaftryk.

I fremtiden vil vi sandsynligvis se, at insekter i stigende omfang vil finde anvendelse som foder til kæledyr og som erstatning for eksempelvis importeret soja til vores husdyr. Men vi skal samtidig vænne os til, at insekter også kan være menneskeføde og ikke bare en sjov gimmick, vi finder frem i festlige sammenhænge. Vi skal med andre ord lære at spise insekter. ■

Forslag til yderligere læsning:

Hansen et al. (2024): The unpaved road towards efficient selective breeding in insects for food and feed—A review. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 00, 1-24.

Laursen et al. (2024): Genotype-by-environment interactions for mean performance and trait variation in house fly larvae reared on two diets. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 00, 1-15.

Hansen et al. (2024): Estimation of genetic parameters for the implementation of selective breeding in commercial insect production. *Genetics Selection Evolution*, 56, 21.

Laursen et al. (2024): Reproductive output and other adult life-history traits of black soldier flies grown on different organic waste and by-products. *Waste Management*, 181, 136-144.

Laursen et al. (2021): Contrasting manual and automated assessment of thermal stress responses and larval body size in black soldier flies and houseflies. *Insects*, 12, 380.

Udover forfatterne er følgende samarbejdspartnere involverede i projektet:
Fra Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet: Simon Bahndorff
Fra Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, Aarhus Universitet: Hanne Marie Nielsen og Goutam Sahana

Kom til Science Camp

på Syddansk Universitet i Odense

Science Camp 8.-9. marts 2025 består af to dage, hvor du møder undervisere og studerende. Gennem oplæg, øvelser og forsøg kommer du tættere på dit studievalg og får indblik i, hvad det vil sige at være studerende.

Vælg mellem fem workshops:

Astro- og rumfysik

For dig der er interesseret i Fysik

Fra idé til virkelighed

For dig der er interesseret i Farmaci, Kemi og Medicinalkemi

Ai og cybersikkerhed - matematikken bag kryptering

For dig der er interesseret i Datalogi, Matematik og Kunstig intelligens

Bedt af havet

For dig der er interesseret i Biologi

CRISPR-genredigering i personlig medicin

For dig der er interesseret i Biomedicin og Biokemi og molekylær biologi

Alle camps er særligt tilrettelagt for 2. og 3. gymnasieår og dig, der holder sabbatår. Se program og tilmeld dig på sdu.dk/sciencecamp

Vi sørger for overnatning og forplejning - og selvfølgelig hygge og sjov!

Højvandsmuren
– LeMur – blev bygget
i 2014 og sikrer
mod højvande op til
210 cm over daglig
vande.

Foto: Michael Holm
Christensen.

Forfatterne



Kurt Nielsen er bestyrelsesmedlem i Klimatorium og fhv. prodekan ved Aarhus Universitet indenfor teknologi og naturvidenskab med fokus på rådgivning og forskning til myndigheder og virksomheder – primært i relation til vandmiljø, natur, klimaændringer, fødevarer og landbrug.
kni@au.dk



Sebastian Mernild er bestyrelsesmedlem i Klimatorium, professor og leder af SDU Climate Cluster. Hovedforfatter ved FN's Klimapanel (IPCC), 6. hovedrapport. Fhv. prorektor SDU.



Lars Nørgaard Holmegaard er direktør for Klimatorium og direktør for Lemvig Vand. Medlem af bestyrelserne for DANVA, Det Nationale Netværk for Klimatilpasning (DNNK), Danish Water Forum (DWF), styregruppen for Erhvervsfyrtårn for Vandteknologi, og formand for styregruppen for det nyetablerede Forsynings LCA.



STORE VANDMÆNGDER KRÆVER NYE LØSNINGER

Klimaforandringerne medfører stadig større udfordringer, ikke mindst i form af store og intense mængder nedbør og risiko for stormfloder.

Innovationscentret Klimatorium i Lemvig er blevet centrum for udvikling og afprøvning af nye bæredygtige metoder til at håndtere de store vandmængder og dermed undgå oversvømmelser.

Lemvig, med sin ikoniske højvandsmur, der blev færdiggjort i 2014 og sikrer mod højvande op til 210 cm over daglig vande, er et levende eksempel på nødvendigheden af at tilpasse sig stigende vandstande og stormfloder. Men Lemvig har ikke kun fokuseret på at sikre sig mod de eksisterende klimaudfordringer. Byen huser også *Klimatorium*, der siden åbningen i 2020 har været en katalysator for

udviklingen af innovative løsninger på klimatilpasning og bæredygtig vandhåndtering.

Klimatorium er et unikt innovationscenter, der samler forskere, virksomheder og myndigheder om at udvikle og afprøve løsninger på de vand- og klimaudfordringer, vi står overfor. Her udvikles og testes løsninger til håndtering af oversvømmelser, regnvand og højt grundvand, samtidig med at

naturbaserede løsninger udnyttes for at fremme biodiversitet og styrke samfundets modstandsdygtighed overfor klimaforandringer.

Klimatorium arbejder tæt sammen med universiteter, fonde, kommuner og virksomheder for at udvikle løsninger, der kan implementeres i virkeligheden, og Klimatorium fungerer samtidigt som en formidlingsplatform for viden om klimatilpasning.



Om Klimatorium

Klimatorium blev bygget som opfølgning på det 6-årige EU-projektet Coast2Coast og er efterfølgende videreudviklet via dels projekter i regi af Erhvervsfyrtårnet for vandteknologi med udgangspunkt i Midtjyllands Erhvervshus, dels gennem eksterne EU-projekter.

Formålet med Klimatorium er at understøtte udviklingen af bæredygtige klimaløsninger, og fundamentet for dette arbejde er et tæt samarbejde mellem forskning, erhvervsliv, myndigheder og borgere – vi kalder det Quadruple Helix-modellen.

Klimatorium har hurtigt etableret stærke partnerskaber både nationalt og internationalt. I Danmark samarbejder vi med Aalborg Universitet, Danmarks Tekniske Universitet, Syddansk Universitet, Aarhus Universitet og

VIA University College. Og med over 110 samarbejdende små og mellemstore virksomheder fungerer Klimatorium i dag som en platform for test og videreudvikling af nye teknologier, samtidig med at vi samarbejder med større aktører som Grundfos om at teste og demonstrere ny teknologi.

Klimatorium deltager desuden i en lang række EU-projekter og har fået en ny status som såkaldt EU Climate Pact-institution, hvor både direktøren og bæredygtighedschefen fungerer som EU Climate Pact-ambassadører. Denne anerkendelse og vores brede netværk gør Klimatorium til en global aktør indenfor innovative klimaløsninger – og faktisk også til en inspirationskilde i udlandet, hvor særligt institutioner i New Zealand og Holland ønsker at etablere et "Klimatorium" i deres lande.

Klimatorium blev bygget i 2020 og har vundet internationale arkitekturpriser. Arkitekterne er 3xN. Foto: Adam Mørk

Verdens største Living Lab i Lemvig

Med stigende vandstande, intensiveret nedbør og ændrede vejrforhold er behovet for udvikling af effektive og bæredygtige klimatilpasningsløsninger blevet mere presserende end nogensinde. Klimatorium spiller en central rolle i denne udvikling og har etableret sig som et fyrtårn for bæredygtige løsninger, der kan imødekomme de stigende krav til klimatilpasning. For at understøtte den teknologiske udvikling på vand- og klimaområdet er det afgørende at kunne teste og demonstrere løsninger i realistiske omgivelser.

I Lemvig-området har Klimatorium skabt et af verdens største Living Labs for klimatilpasning, et test-

område fordelt på 508 km², hvor virksomheder, forskere og innovatører kan afprøve og finjustere nye teknologier og metoder. Dette unikke testmiljø giver mulighed for at udvikle løsninger, der ikke blot er teoretisk effektive, men som også fungerer i den virkelige verden. Det handler om viden til forandring.

Fra problemvand til ressource

I Klimatorium bliver der eksperimenteret med innovative løsninger til effektiv vandhåndtering, herunder forskellige løsninger til at håndtere regnvand lokalt – såkaldte LAR-løsninger (Lokal Afledning af Regnvand). Vand skal fremover i højere grad kunne opmagasineres i landskabet, så vi tager toppen af de største afstrømninger. Vi kan også etablere flere vandløb, som kan

aflede vand ved ekstrem nedbør, og vi etablerer sandfiltre og plantelaguner, der kan rense vandet, inden det ledes til vandløb. Dette adskiller sig markant fra de traditionelle kloaksystemer, som hurtigt kan blive overbelastet ved kraftig regn.

Klimatorium tager dog ikke kun højde for regnvand. Vi arbejder også på at tackle en af de største udfordringer, mange byer og landområder står overfor: Terrænnært grundvand, som kan medføre oversvømmelser i kældre og på marker. I stedet for at betragte dette som "problemvand", undersøger Klimatorium, hvordan det kan anvendes som ressource til industrielle formål, for eksempel i Power-to-X-anlæg, der spiller en central rolle i den grønne omstilling.

Klimatorium

Verdens største Living Lab på 508 km²

Klimatorium Living Lab er opbygget som en del af Erhvervsfyrntårn for Vandteknologi, med fokus på vand uden for hegnet. Her bliver udfordringer kortlagt, vandteknologiske indsatser udviklet og nye vandteknologier testet og demonstreret.



Fjernelse af makroplast

Test af løsninger, som fjerner makroplast fra vandvejene inden det bliver til mikroplast og når havet



Rør af genanvendt plast

Udvikling og test af produkter med genanvendt plast til vandsektoren



Sekundavand til PTX

Alternative vand-ressourcer til Power-to-X anlæg



Naturbaserede løsninger

Rensning af regn og spildevand med naturbaserede løsninger



Terrænnært grundvand

Kortlægning af terrænnært grundvand via grundvandsloggere



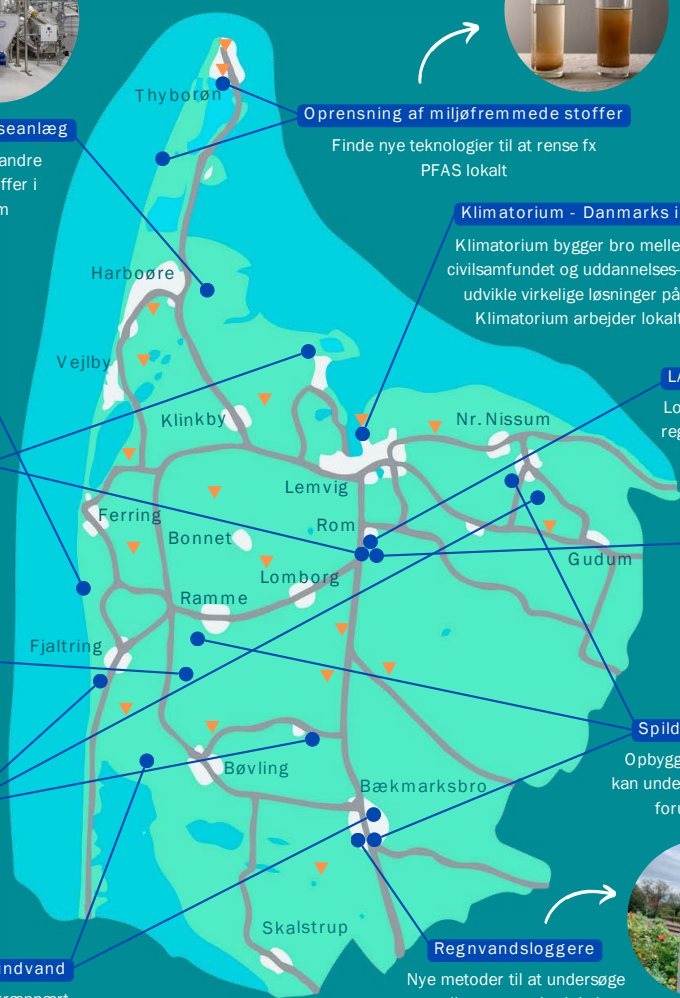
Etablering af Pyrolyseanlæg

Reducere PFAS og andre miljøfremmede stoffer i spildevandsslam



Oprensning af miljøfremmede stoffer

Finde nye teknologier til at rense fx PFAS lokalt



Klimatorium - Danmarks internationale

Klimatorium bygger bro mellem myndigheder, civilsamfundet og uddannelses- og forskningsinstitutioner for at udvikle virkelige løsninger på klimarelaterede udfordringer. Klimatorium arbejder lokalt, nationalt og internationalt.

LAR Living Lab

Lokal afledning af regnvand - test af løsninger

Brønde

Placering af brønde

Spildevandsmåling

Opbygge teknologier til at undersøge spildevandsforurening lokalt



Regnvandsloggere

Nye metoder til at undersøge nedbørsmængder lokalt

Kort over "Living lab". Kortet angiver en række anlæg inden for et område på 508 km². Grafik: Klimatorium

En datadreven tilgang er afgørende for at optimere vandhåndteringen. I Klimatorium indsamler vi derfor realtidsdata om vandkredsløbet ved hjælp af avanceret teknologi som satellitdata og sensorer. Danmarks tætteste net af dataloggere (80 styk), som løbende registrerer grundvandsstanden, er således opsat i Living Lab sammen med 80 regnmålere. Data herfra giver mulighed for at forudse problemer som oversvømmelser samt pludselige hændelser som brud på vandværk. Der er et tæt samarbejde med private lodsejere om dette, hvor halvdelen af brønde med dataloggere efter aftale er placeret i private arealer, så de bedste data bliver indsamlet.

Data er også grundlaget for at udvikle realistiske modeller for hånd-

tering af regnvand og spildevand. Overblikket sikres via en GIS-plattform (GIS = Geografisk Informations System), hvor data om ledningsnet og andre relevante forsyningsoplysninger offentliggøres. Platformen bliver løbende opdateret med de nyeste satellitdata for at sikre præcise x, y, z-koordinater, som afspejler faktiske ændringer i terrænet. Det unikke er integrationen af z-dimensionen (højde over Dansk Normal Nul), hvilket gør ledningsdatabasen tredimensionel. I øjeblikket arbejdes der på at samle et omfattende datasæt, der præcist kortlægger forsyningsnettets tredimensionelle placering (x, y, z) således, at der etableres sammenhænge mellem de løbende opdaterede højdedata for overfladen og rørens dybde under overfladen.

Den løbende opdatering af højdedata gør det muligt at bygge Digitale Tvillinger (computermodeller), som kan bruges til at optimere service-, vedligeholdelses- og renoveringsprojekter. Derved undgår man ofte betydelige, uventede omkostninger for forsyningsselskaberne, som i sidste ende rammer forbrugerne. Denne datadrevne tilgang vil skabe et solidt fundament for optimering af vandforvaltningen, hvilket er afgørende for fremtidens management i forsyningsselskaberne.

Regulatoriske sandkasser

For at fremme innovation blandt virksomheder arbejder Klimatorium i Living Lab'et på at etablere "regulatoriske sandkasser", der giver mulighed for i forsøgsøjemed at af-

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Socialfond

DEN EUROPÆISKE UNION
Den Europæiske Fond for Regionaludvikling

Finansieret som et led i EU's reaktion på COVID-19-pandemien

Vi investerer i din fremtid

ERHVERVSFYRTÅRN
VANDTEKNOLOGI

le klimacenter
der, virksomheder,
gsinstitutioner for at
ede udfordringer.
g internationalt.

ab
t af
felt

nd af genanvendt plast
stgranulat i højeste kvalitet

ing
r, der
vand og
t.

Satellitreflektorer
18 radarreflektor registrerer
i lokale landbevægelser

prøve banebrydende løsninger, der ikke overholder gældende regler og lovgivning. Eksempelvis er der nogle steder behov for en midlertidig udledningstilladelse for at kunne teste effekten af nye rensemetoder som plantelaguner eller rensning af spildevand med biokul.

En af de største hindringer for implementeringen af nye teknologier er ofte eksisterende regler og regulativer, der blev vedtaget før klimatilpasning og grøn omstilling blev en prioritet. Derfor er der et stort behov for udvikling på dette område.

Udviklingen af klimaomstillinger og vandteknologier kræver et tæt samarbejde på tværs af sektorer. Derfor inviterer Klimatorium virksomhe-

der, forskere og offentlige aktører til at deltage aktivt i arbejdet med at udvikle løsninger, der ikke kun skaber værdi for samfundet, men også fremmer vækst og effektivt adresserer de klimaudfordringer, vi står overfor.

Bæredygtighed som drivkraft for effektiv klimatilpasning

Bæredygtighed er en central drivkraft i arbejdet med klimatilpasning. I Klimatorium kombinerer vi avanceret teknologi med bæredygtige materialer for at udvikle løsninger, der både adresserer klimaudfordringerne og reducerer CO₂-aftrykket. Et konkret eksempel er samarbejdet med Plastix og andre plastvirksomheder om at udvikle regnvands- og spildevandsrør og andre produkter til vandsektoren af genbrugsplastik. En sådan løsning er både miljøvenlig og lever op til de nødvendige kvalitetsstandarder, samtidig med at den understøtter et mere effektivt og ressourcebesparende vandinfrastrukturnet.

Når vi arbejder med at integrere naturbaserede metoder som etablering af vådområder og nye vandløb samt decentral rensning af vand via plantelaguner i vandhåndteringen, er det også ud fra en bæredygtighedstankegang. Ved at inddrage naturen i vandhåndteringen hjælper dette nemlig ikke bare samfundet med at tilpasse sig de igangværende klimaændringer, det øger også biodiversiteten. Før vi kan implementere sådanne naturbaserede løsninger i større skala, er der imidlertid behov for at teste dem, og her spiller Klimatorium en vigtig rolle.

Formidling og vidensdeling

Klimatorium er ikke kun et sted for innovation, men også en vigtig formidlingsplatform, hvor viden om klimatilpasning og bæredygtige løsninger deles med både den brede befolkning og professionelle aktører. Hvert år besøger omkring 35.000 mennesker Klimatorium, hvor de får mulighed for at opleve de nyeste klimaløsninger i praksis.

Nationale og internationale delegationer kommer til Klimatorium for at få indblik i de løsninger, der bliver udviklet og afprøvet.

Formidling af viden om klimaudfordringer og løsninger er essentiel for at skabe samfundsforandringer. Klimatorium afholder årligt et klimatopmøde med deltagelse af centrale aktører fra både ind- og udland og arrangerer i forlængelse heraf et populært klimamøde for børn, som også streames til skoler i hele Danmark. Her får børn mulighed for at dele deres ideer om bæredygtighed og klima. Gennem initiativer som Global Youth Climate Summit engageres unge på tværs af landegrænser i arbejdet med løsninger på de globale klimaudfordringer.

Historisk erfaring og fremtidens løsninger

Lemvig har en lang tradition for praktisk orienterede løsninger på vandhåndtering. Allerede i 1970'erne blev der som det første sted i verden etableret separatkløakering, hvor man adskilte regnvand og spildevand. Denne visionære plan har ikke kun givet økonomiske besparelser for husstandene. Separatkløakeringen reducerer også risikoen for oversvømmelser på lavtliggende områder under kraftig regn og giver samtidigt en bedre rensning af spildevandet, da der ikke sker en opblanding med store mængder regnvand.

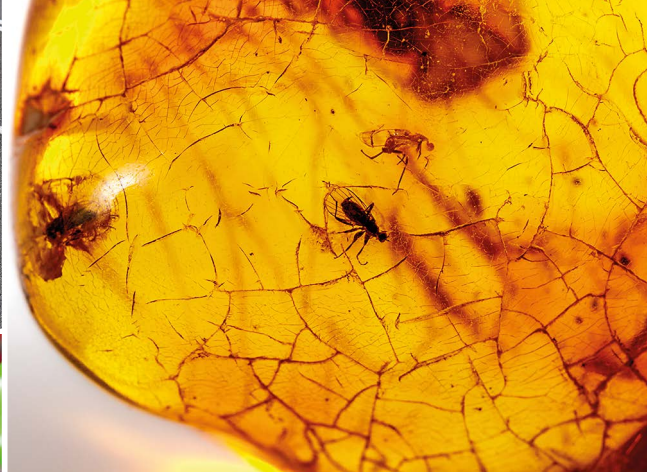
Det kan derfor siges at være i naturlig forlængelse af Lemvigs stolte traditioner, at Klimatorium i dag fortsat arbejder på at udvikle stabile og bæredygtige løsninger, der integrerer spildevand, regnvand og problemvand – også i fremtiden, hvor udfordringerne på grund af klimaændringer bliver større.

Klimaløsninger er dog komplekse, og det er derfor vigtigt, at vi tænker helhedsorienteret og arbejder tættere sammen – virksomheder, offentlige institutioner, universiteter og borgere. I Klimatorium kalder vi denne tilgang Quadruple Helix. ■

Videre læsning.
Få mere at vide på
Klimatoriums hjemmeside:
klimatorium.dk

Mange af de materialer, vi støder på i hverdagen, optræder i virkeligheden i en glastilstand. Det gælder for eksempel asfalt, rav, bolsjer og mange plastikprodukter. Der findes også såkaldt metalglas – altså metaller, der er på glasform – og det er i dag et stort forskningsområde. For nogle år siden forsøgte firmaet RS Alloys sig med at lave golfkøller af metallisk glas.

Fotos: Colourbox



Forskere undrer sig: **VI FORSTÅR IKKE TERMODYNAMIKKEN AF BOLSJER**

Om forfatteren

Kristian Sjøgren,
videnskabsjournalist.
ksjoegren@gmail.com



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

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

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er lektor ved DTU, Kirstine Berg-Sørensen. Se mere på www.dff.dk

På trods af årtiers forskning har forskere stadig meget svært ved at forstå materialer, der optræder i den såkaldte glasfase. Den slags materialer er der mange af, for eksempel bolsjer, vinduesglas og mange typer plastik.

Ienhver fysikbog i danske folkeskoler og gymnasier bliver eleverne præsenteret for det faktum, at stoffer kan eksistere i tre former; fast, flydende og som gas. Så er der et billede af et isbjerg, et glas med vand og en sky.

Når et stof kan eksistere i de tre former, skyldes det, at atomer eller

molekyler arrangerer sig forskelligt i strukturer afhængigt af temperatur. Ved fast form sidder molekylerne i faste, krystallinske strukturer med veldefinerede afstande mellem sig, og de bevæger sig ikke. Når et fast stof bliver flydende, ligger molekylerne stadig tæt pakket, men den krystallinske struktur bliver ophævet, og molekylerne kan nu bevæge

sig ind og ud mellem hinanden. I gasfasen er alting i uorden, og der er langt mellem molekylerne.

Et andet kendetegn ved denne tredelte opdeling af de forskellige faser, som et stof kan være i, er, at temperatur og tryk bestemmer, hvornår de er i den ene eller anden fase. Varmer man en isterning op,

bliver den til vand ved over 0 grader og et tryk på 1 atmosfæres tryk, og ved 100 grader bliver vand til damp.

Alt det ovenstående er skolelærdom for de fleste, men herefter går tingene galt. Hvis man kigger sig omkring i verden, finder man hurtigt ud af, at faktisk kun ganske få ting opfører sig som vand og indtager tre så veldefinerede former. Er kød som eksempel et fast stof, eller er det en væske? Og hvad med en celledmembran?

»I naturen består materialer for det meste af mikroskopiske blandinger af faste stoffer, væsker og gas. Når vi tænker på vand som enten is, væske eller gas, er det under idealiserede ligevægtsbetingelser, og hvordan stoffer opfører sig i termodynamisk ligevægt. Men der findes også stoffer, der er langt uden for ligevægt, og dem har vi i dag meget svært ved at forstå,« forklarer Professor Kristine Niss fra Institut for Naturvidenskab og Miljø på Roskilde Universitet (RUC).

Kristine Niss bedriver grundvidenskabelig materialeforskning og forsøger blandt andet på at skabe en grundlæggende forståelse af det fysiske fænomen, der hedder glasovergangen. Det kommer vi tilbage til lige om lidt.

Vinduer og bolsjer er hverken flydende eller faste

Når det kommer til de stoffer, der opfører sig anderledes, så gælder det som eksempel faste stoffer, der har den mikroskopiske struktur som en væske. Her er selve materialet fast som en sten, men når forskere nærstuderer de mikroskopiske strukturer inde i materialet, mangler den krystal-linske struktur. I stedet ligger molekylerne helt uordnet som i en væske.

»Hvis man bare kigger på strukturen, vil man sige, at det er en væske, selv om det faktisk er et fast materiale. I fysikken kalder vi dem for amorfe faste stoffer,« forklarer Kristine Niss.

Og nu er det så om at holde tungen lige i munden.

De amorfe faste stoffer kaldes også for glasser, men selvom det måske

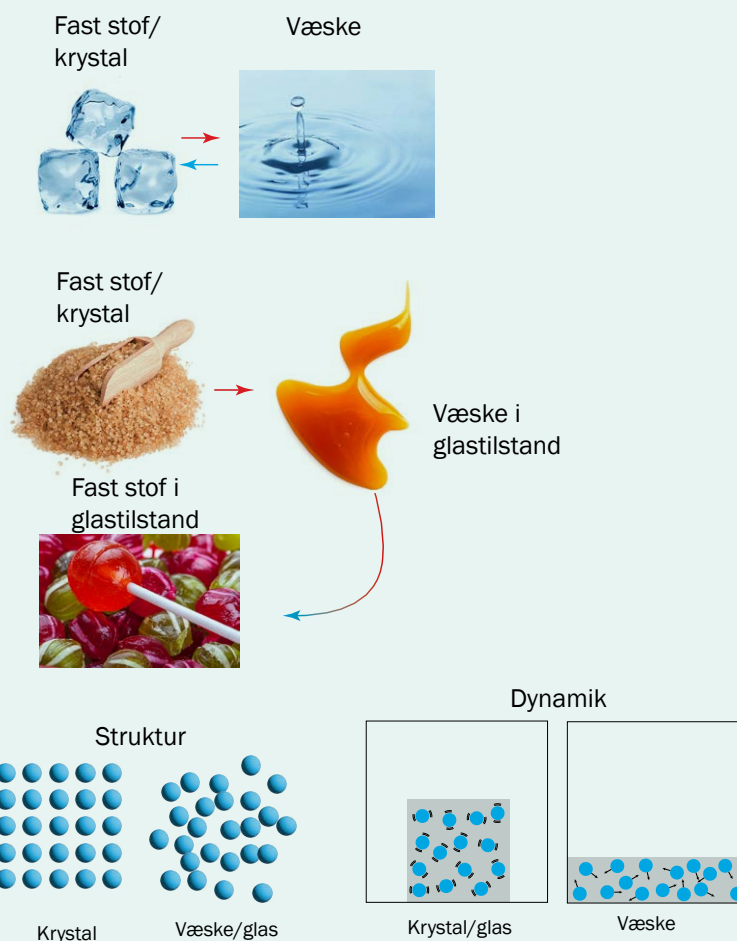
Om Kristine Niss

Kristine Niss er professor i materialefysik ved Roskilde Universitet (RUC). Hun er uddannet fra RUC og skrev sin ph.d. inden for fysisk kemi ved Université Paris Sud. I 2007 blev hun ansat som adjunkt, og senere lektor og professor ved Institut for Natur og Miljø på RUC. Hendes primære forskningsinteresse er dynamik i væsker og glasser.



Foto: Jakob Klust

Faser for stof



Fotos: Colourbox.

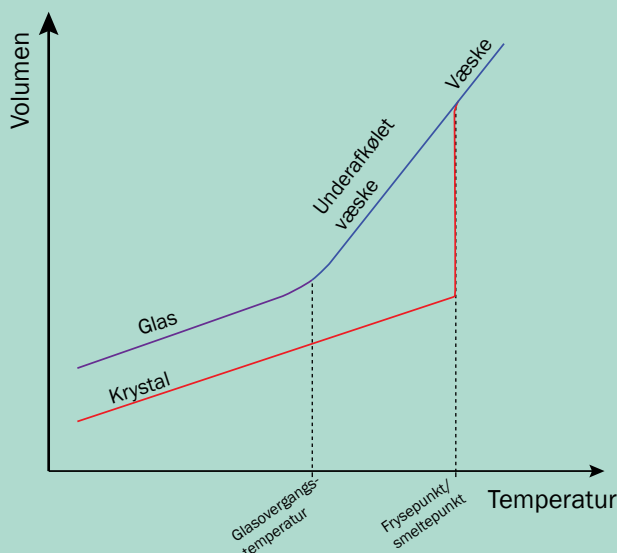
Vand er det velkendte eksempel på, hvordan stoffer kan optræde i en fast, krystallinsk fase og en flydende væskefase, og at de skifter mellem disse faser ved en veldefineret temperatur (fryse/smelte-punktet). Når stoffer danner en glasfase (for eksempel sukker), opfører det sig anderledes. For her kan materialet godt starte som et fast, krystallinsk stof, men når det smelter ved opvarmning, dannes en amorf glasfase, som bibeholdes, når materialet størkner igen ved afkøling. Nederst er det illustreret, hvordan man principielt skal forstå forskellen på strukturen og dynamikken af materialet i de forskellige faser. Mens en krystal er meget velordnet, er væske og glasfaser uordnede. Og mens molekylerne i en væskefase kan bevæge sig frit omkring, er de i krystal- og glasfaser fikseret i en bestemt position.



DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

Temperatur og glasovergangen

For langt de fleste væsker vil deres volumen blive mindre, når de afkøles, og når de krystalliserer, bliver volumen abrupt meget mindre. Hvis de i stedet bliver i væsketilstanden under frysepunktet, fortsætter væskens opførsel, indtil den når glasovergangen. Ved glasovergangen ses et knæk på linjen, fordi glas har mindre temperaturafhængig volumen end væske. Bemærk, at når det gælder materialer, der danner en krystallinsk struktur, skiller vand sig ud fra den generelle sammenhæng, der fremgår af figuren. Vand udvider sig nemlig, når det fryser, og det er der meget få andre stoffer, der gør.



leder tankerne hen på drikkeglas og karafler, er glasser faktisk mange andre ting. Glasser er også nogle former for plastik, vinduer og sågar bolsjer og karamel. Fælles for vinduer og bolsjer er, at de begge stammer fra et fast materiale med en krystallinsk struktur, som er blevet varmet nok op, til at de krystallinske strukturer er blevet smeltet, og materialet er blevet til en væske. For glas gælder det, at det faste materiale er sand, der er blevet varmet op til flere tusinde grader for at lave glas, mens sukker er udgangspunktet for at lave bolsjer. I takt med at væsken af enten flydende sand eller sukker nedkøler igen, gendanner de ikke den krystallinske struktur mellem molekylerne, men i stedet bibeholdes den uordnede struktur fra væskefasen. Det gælder også, når selve materialet bliver hårdt igen.

»Men selvom det er glas og har mikroskopisk struktur som en væske, er det ikke en væske. Der er heller ikke en afgrænset overgang fra fast til flydende form eller omvendt. I stedet eksisterer der en glasovergang, hvor glasset, vinduet eller bolsjet bliver mere og mere fast, i takt med at det bliver kølet ned. De har struktur som noget flydende, men dynamik som noget fast,« fortæller Kristine Niss.

Glasovergangen er gradvis og undervejs, og der er et stadie, som er en mellemting mellem væske og den faste glas. Det samme gælder ikke for overgangen mellem is og vand. Her findes der ikke en mellemting.

Og her kommer problemet så:

»Mens vi har rigtig godt styr på faseovergangene mellem de forskellige faser i den ene type stoffer, har vi ingen god teori for, hvad der sker termodynamisk i glasovergangen, og det er det, som vi prøver at skabe på det grundvidenskabelige niveau i min forskningsgruppe,« siger Kristine Niss.

Glasovergangen er afhængig af temperatur

I sin forskning forsøger Kristine Niss med sine kollegaer at blive klogere på, hvad der er bestemmende for forskelle i glasovergangen mellem forskellige stoffer. Betragter man et vindue, har det indre struktur som en væske, men det er bestemt ikke flydende ved stuetemperatur. Det er et bolsje heller ikke. Der er dog forskel på de to, og det vil man opdage, hvis man begynder at varme vinduer og bolsjer op. Hurtigt vil bolsjerne begynde at blive gradvist mere og mere flydende, men det vil først

ske ved meget højere temperaturer, når det gælder vinduesglas. Årsagen er, at vinduesglas ved stuetemperatur er meget langt fra deres termodynamiske ligevægt. Jo tættere temperaturen kommer på ligevægten, des mere flydende bliver vinduet. Bolsjer er ved stuetemperatur heller ikke tæt på sit termodynamiske ligevægtspunkt, men trods alt tættere på end vinduesglas. Derfor bliver bolsjer også flydende før vinduer. Karameller er ved stuetemperatur endnu tættere på deres termodynamiske ligevægtspunkt, og derfor kan en karamel også være hård som en sten, hvis man har haft den i tasken på en kold dag. Tager man en karamel i en varm hånd, bliver den helt blød.

Et andet eksempel på glasser, der opfører sig forskelligt ved forskellige temperaturer, er plastik. Plastik er i overvejende grad en kombination af krystaller og glas. Forholdet mellem de to former er afgørende for plastiks egenskaber, og hvor let det er at forme. For eksempel består en halvliter sodavandsflaske næsten udelukkende af plastik på glasform, og derfor kan man også smelte sodavandsflasker for at lave dem om til noget andet. Denne egenskab er meget vigtig indenfor den cirkulære økonomi. Det bety-

der også, at plastik også ændrer egenskaber over tid, fordi det ikke er i termodynamisk ligevægt.

»Det mystiske er, at vi endnu ikke ved, hvad der styrer, hvornår en væske bliver til glas. Vi ved, at det har noget med temperatur at gøre, for det kan vi måle. Vi ved, at vinduesglas smelter ved 1.000 grader, og at plastik smelter ved omkring 200 grader. Vi kan måle det, men vi kender ikke teorien bag. Omvendt har vi veletablerede teorier for overgangen fra væske til krystalform, men vi mangler den fysiske og kemiske forståelse for glasovergangen,« forklarer Kristine Niss.

Hun uddyber, at typisk bliver en væske til glas, når den bliver underafkølet. Man køler så at sige på en væske, indtil den bliver mere og mere sej gennem glasovergangen. På et tidspunkt er væsken så sej, at man ikke længere kan skelne den fra et fast stof, og så kalder man strukturen for glasstruktur.

»Det gør vi, når det ikke længere giver mening at kalde materialet for flydende, men der er ingen decideret overgang fra én fase til en anden, og det har vi ingen teoretisk forståelse af,« siger Kristine Niss.

Forskningen er 30 år forsinket

I 1990'erne sagde den berømte fysiker Philip W. Anderson, at forskere indenfor 10 år ville have en færdig teori for glasovergangen, og at det ville komme til at have stor betydning for materialefysikken. Det er ved at være 30 år siden, og selvom forskere inden for feltet har håbet på, at gennembruddet snart ville være der, er de endnu ikke kommet frem til den hellige gral.

I Kristine Niss' forskningsarbejde måler hun på alle mulige væsker og glasser under forskellige betingelser, herunder varierende tryk, temperatur og elektrisk spænding, for at gøre sig selv og alle sine materiale-forsker-kolleger klogere. Formålet er at finde ud af, hvor generel en teori for glasovergan-

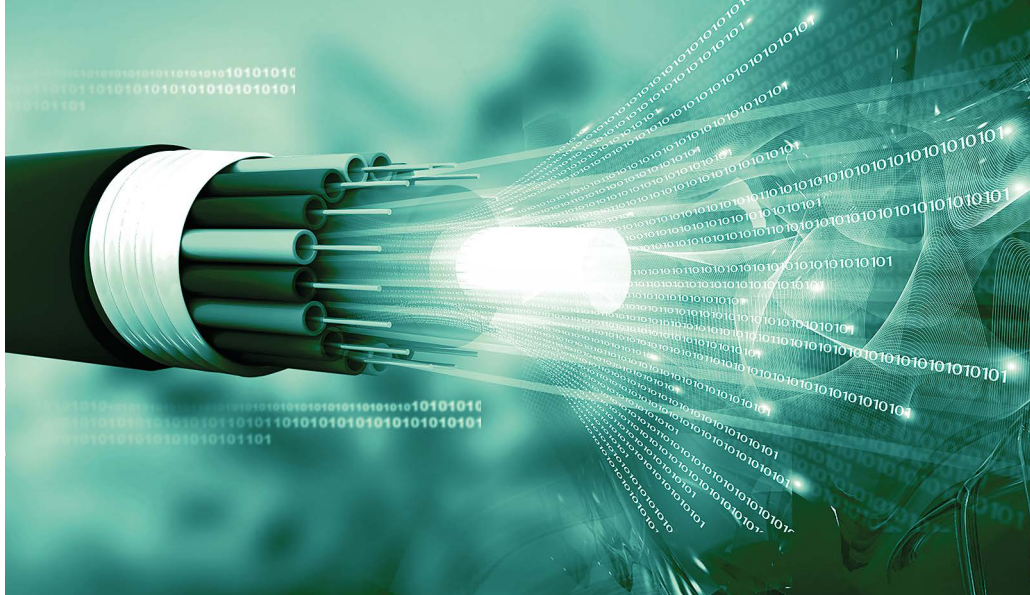


Illustration: Shutterstock

50 år med glasfasen og amorge materialer

De seneste 50 års forskning i glasfasen har haft en betydelig indflydelse på en bred vifte af teknologiske og videnskabelige felter. I 1970'erne begyndte forskere at undersøge de grundlæggende egenskaber ved amorge materialer, som mangler den regelmæssige atomare struktur, der kendetegner krystaller. Denne forskningsindsats førte til en dybere forståelse af glasovergangstemperaturen, en kritisk parameter, der definerer overgangen fra en fast, glasagtig tilstand til en mere flydende eller gummiagtig tilstand. Dette arbejde lagde grundlaget for mange af de senere anvendelser af glasfaser i teknologi og industri.

I 1980'erne og 1990'erne blev glasfaser en central del af udviklingen indenfor optisk kommunikation. Udviklingen af optiske fibre, der er lavet af højrenhedsglas, revolutionerede telekommunikationsindustrien ved at muliggøre hurtig og effektiv dataoverførsel over lange afstande. Glasfaser i optiske fibre giver lavt tab og høj båndbredde, hvilket gør dem ideelle til brug i globale kommunikationsnetværk. Denne teknologi blev hurtigt udbredt og er i dag en uundværlig del af internettets infrastruktur.

Samtidig begyndte forskningen at fokusere på glasfaser indenfor optoelektronik og fotonik. Forskere udforskede glasfasers evne til at interagere med lys, hvilket førte til udviklingen af en række optiske komponenter som lasere, sensorer og lysledere. Glasmaterialer som borosilikatglas og silica (siliciumdioxid) blev brugt i fremstillingen af disse komponenter, der er centrale i moderne medicinsk teknologi, herunder endoskoper og kirurgiske lasere.

I de senere årtier har bioaktive glasfaser også vundet plads indenfor medicinsk forskning. Disse materialer kan interagere med biologisk væv, fremme knoglevækst og bruges i implantater og regenerativ medicin. Bioaktive glas har vist sig særligt effektive i tandpleje, hvor de anvendes til at reparere og styrke knogle- og tandvæv.

Desuden har glasfaser fundet anvendelse indenfor områder som kemisk procesindustri, hvor deres modstandsdygtighed over for korrosion og høje temperaturer gør dem ideelle til brug i kemiske reaktorer og laboratorieudstyr. I de seneste årtier har forskningen også udvidet sig til at omfatte glasfaser i avancerede arkitektoniske anvendelser, såsom smarte vinduer, der kan ændre deres lysgennemtrængelighed.

Samlet set har forskning i glasfasen over de seneste 50 år skabt fundamentet for mange teknologiske fremskridt og fortsætter med at spille en afgørende rolle i udviklingen af innovative løsninger indenfor både industrielle og medicinske felter.

Til faktaboksen er der brugt andre kilder end Kristine Niss



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK



Kristine Niss i færd med at lave neutronspreddningseksperimenter ved forsøgsreaktoren ILL. Med neutroner kan man måle både dynamik og struktur af stoffer.
Foto: Bo Jakobsen

gen det overhovedet er muligt at lave. Ligner de forskellige væsker og glasser hinanden så meget, at der kan laves én samlet teori, eller opfører de sig så forskelligt, at det slet ikke giver mening?

Forskerne undersøger også forskellige former for glasser, blandt andet metalglasser, plastikglasser og ioniske væsker. Så udsætter de materialerne for en given temperatur og trækker i dem for at se, hvordan temperaturændringen påvirker materialets egenskaber i glasovergangen. Så hæver eller sænker de temperaturen med et par grader og trækker i materialet igen. Alt sammen er for at forstå de mekaniske egenskaber for de forskellige materialer under glasovergangen.

Forskerne samarbejder også med teoretiske materialefysikere om

at efterprøve de nyeste teorier i laboratoriet og dataloger, der laver computersimuleringer af glasovergangen. De benytter også røntgen til at se, hvad der sker inde i materialerne under glasovergangen, og så undersøger de, hvordan forskellige faktorer påvirker, om et glas enten brækker eller bøjer, når man trækker og skubber til det.

Endelig undersøger forskerne, hvad der sker med stofferne, når de først er blevet til glas. Det betyder blandt andet, at forskerne laver fysiske målinger af glasser over meget lange tidsrum, målinger der tager helt op til et år. I den periode skal materialerne have været holdt under de samme temperatur- og trykforhold, hvilket blandt andet betyder, at der i Kristine Niss' laboratorium er en nødgenerator, som overtager temperaturstyringen i forsøgene i tilfælde af et strømafbud.

»Vi kan ikke have, at vi har haft et forsøg kørende i et halvt år, og vi så må kassere det hele, fordi strømmen ryger en aften. Det er et meget tålmodighedskrævende stykke forskningsarbejde,« siger Kristine Niss.

Stor industriel interesse for glasfasen

Kristine Niss er dog ikke alene om at interessere sig for glasovergangen. Foruden lidt over 1.000 akademiske kollegaer verden over er glasovergangen også interessant for rigtig mange ingeniører, der arbejder indenfor forskellige industrier. Forståelsen af glasovergangen kan nemlig få betydning for helt ekstremt mange brancher. Det kan blandt andet dreje sig om udvikling af mobiltelefoner.

Skærmen på en mobiltelefon er lavet af glas, og forskellige egenskaber ved det glas bestemmer, om det går i stykker eller ej, når mobiltelefonen ryger på gulvet. Egenskaberne kan også gøre glasset på mobiltelefonen mere fleksibelt.

Et andet eksempel er indenfor plastikindustrien. Her har glasovergangen betydning for, om plastik kan genanvendes eller ej, og hvad det i det hele taget kan bruges til. Kristine Niss samarbejder selv med miljøbiologer om at forstå, hvad det har af betydning for dannelsen af mikroplastik, om plastik eksisterer som en glas eller i en krystalstruktur.

»Forståelse af glasovergangen kan få enormt stor betydning for alt indenfor materialefysikken. Hvis vi forstår, hvorfor forskellige materialer opfører sig, som de gør, og vi kan lave en teori for det, kan vi også bedre udvikle nye materialer med nye egenskaber. Disse materialer kan måske erstatte nogle af dem, som vi benytter i dag, men som vi gerne vil af med, for eksempel kompositmaterialer i vindmøller, der er umuligt at pille fra hinanden og genanvende,« siger Kristine Niss.

Hvordan er det at læse til ingeniør?

Dokumentaren Studierejsen følger ingeniørstuderende på Aarhus Universitet på deres studie, i privaten og i fritiden. Vil du have et helt unikt, ærligt og åbent indblik i livet som uni-studerende, så se med på studierejsen.au.dk

AU



Jens



Sanne



NY SÆSON MED SANNE
OG JENS STARTER MAJ 2025



AARHUS
UNIVERSITET
AU ENGINEERING



VI FORURENER GRUNDVAND OG DRIKKEVAND

Foto: Colourbox

I Danmark har vi altid kunnet anvende rent grundvand til drikkevand. Men tiderne med "rent" grundvand er en saga blot, hvis ikke vi opretter grundvandsparker og begrænser landbrugets nitrat- og pesticidforurening.

For 40 år siden var "alle" danskere enige om, at naturen skulle beskyttes mod forurening; og havet og grundvandet blev opfattet som hellige.

Men skiftende regeringer har siden ikke formået at gøre det nødvendige for at opnå god økologisk kvalitet i vandområderne og god kemisk kvalitet af grundvandet. Det har bragt os i en situation, hvor vandmiljøet er i en sørgelig forfatning, og grundvandet – og dermed drikkevandskvaliteten – er truet i en grad, så tiderne med rent, billigt grundvand direkte fra hanen meget snart er forbi.

Adgangen til rent dansk grundvand til brug for drikkevand har i Danmark været afgørende for fol-

kesundheden og samfundsøkonomien. Det skyldes, at grundvandet ikke kan renses for alle miljøfremmede stoffer, og vandbehandling er både dyr og efterlader uønskede stoffer.

Forureningskilder til grundvandet

Listen med kilderne og antal forurenende stoffer i grundvandet er alenlang. Gamle forurenede industrigrunde og lossepladser oprenser man løbende. Den værste er måske Grindstedsværkets forurening med cyanid, kviksølv og opløsningsmidler fra gamle depoter på sin grund i byen, hvorfra forurenede grundvand siver til Grindsted Å og til gamle og nye boligområder, hvor det frarådes at bruge egne borer til at vande køkkenhaven. Fabrikken dumpede fra 1956 til 1973 også spildevand

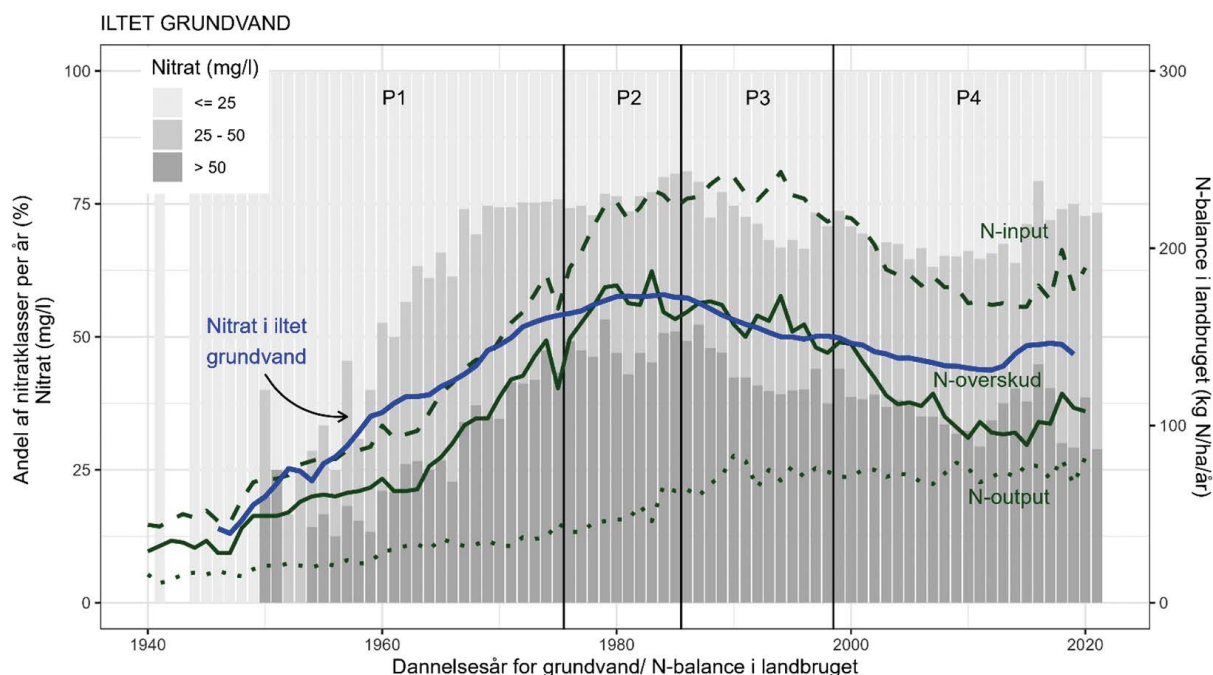
(300.000 ton) i sandet i Kærgaard Plantage, hvorfra det fortsat siver ud i Vesterhavet over en 1400-meter lang strækning med badeforbud. Grindstedborgerne er bekymrede for deres helbred, og det tidligere amt, regionen og staten har ofret kassen på at rense op.

Landbruget er den store kilde til fladeurening med både nitrat og pesticider i grundvandet. Da kvælstoftilførslen på markerne de seneste 80 år langt har oversteget fraførslen med afgrøderne, skabte dette overskud en tilsvarende stigning i nitratindholdet i nydannet grundvand fra i gennemsnit 12 mg/liter i 1945 til nær 50 mg/liter (figur 1). I 1980 blev den vejledende grænseværdi for nitrat i drikkevandet sat til 25 mg/liter og den højst tilladelige grænseværdi

Forfatteren



Kaj Sand-Jensen er professor i ferskvandsøkologi ved Biologisk Institut, Københavns Universitet. Forfatter til bøger om biodiversitet, Danmarks natur, planter evolution, almen økologi og ferskvandsøkologi.
ksandjensen@bio.ku.dk



Figur 1. Nitratkoncentrationen i det øvre iltede grundvand som funktion af dannelsesåret fra 1945 og frem vist som fem-årig glidende gennemsnit (blå kurve). For de samme år er vist overskuddet af landbrugets kvælstofgødskning (grøn kurve). Overskuddet er tilførslen af kvælstofgødning minus fraførslen af kvælstof med afgrøderne.

Bemærk, hvor tæt nitratkoncentrationen i nydannet grundvand følger overskuddet af landbrugets kvælstofgødskning.

De mørkeste baggrundssøjler angiver andelen med > 50 mg nitrat/liter, de mellemgrå angiver andele med nitrat mellem 1 og 25 mg/liter, og de lyse foroven angiver andele med < 1 mg nitrat/liter.

I periode P1 stiger nitratindholdet fortsat, i periode P2 er indholdet meget højt og konstant, i periode P3 falder indhold, og i periode P4 faldet indholdet først for siden at stige frem mod i dag. Kilde: Thorling et al. (2024, dec).

til 50 mg/liter, men den oprindelige vejledende grænseværdi på 25 mg/liter er siden gledet ud.

Efter et maksimum i 1983 over 50 mg/liter faldt nitratoverskuddet og nitratindholdet i nydannet grundvand en smule på grund af flere nationale indsatser, men denne udvikling blev atter vendt til en stigning efter den såkaldte Landbrugs-pakkes tilladelse til øget gødskning i 2016.

I perioden 2020-2022 varierede nitratindholdet i det unge iltede, terrænnære grundvand landet over med 41% under 1 mg/liter, 15% over 50 mg/liter og resten herimellem. Vandværkerne derimod pumper fra ældre, dybereliggende grundvand, som er mindre forurenet, fordi intensiv gødskning og pesticidan-

vendelse er et nyere fænomen, og fordi nitrat under vandets nedsivning til stor jorddybde til dels fjernes af bakterielle og kemiske processer (se faktaboks på næste side).

Problemet med nitrat

Langt det meste drikkevand (80 %) indeholdt i 2020-2022 mindre end 4 mg nitrat/liter, men 20 % indeholdt mere, 1 % endog over 50 mg/liter. Nitratrigt drikkevand udgør et sundhedsproblem, fordi det kan hæmme blodets iltoptagelse hos spædbørn, hvilket historisk begrundet grænseværdierne. En ny stor dansk undersøgelse viser imidlertid, at nitrat i drikkevandet øger risikoen for mave-tarmkræft allerede ved cirka 4 mg/liter. Den effekt alene vurderes at koste 2,2 milliarder kroner årligt i øgede udgifter til kræftbehandling. Kræft risikoen

ved højt nitratindhold i drikkevand og fødevarer skyldes dannelsen af nitrosaminer i mave og tarm.

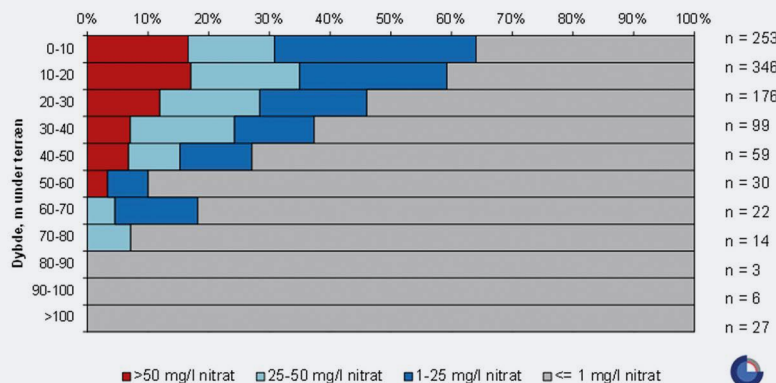
Grundvand og drikkevand er især nitratrigt på steder, der mangler det lerholdige dæklag, hvor nitraten under iltfrie forhold omdannes til nitrogengas ved bakterielle og

GRUMO

står for Grundvandsovervågning og er et landsdækkende program, der overvåger grundvandet. Programmet indsamler data om grundvandets kvalitet og mængde for at sikre, at der er tilstrækkeligt med rent drikkevand til befolkningen nu og i fremtiden. GRUMO er en del af Miljøstyrelsens Nationale Overvågningsprogram for Vandmiljø og Natur (NOVANA).

Nitratreduktion med jorddybden

Nitratindholdet i grundvandet reduceres med dybden i jorden af to grunde. For det første, fordi grundvandet bliver stadig ældre og derfor er dannet for flere årtier eller århundreder siden, hvor der enten slet ikke eller i ringe omfang blev anvendt organisk gødning og nitrat i handelsgødning. For det andet, fordi nitrat forbruges af bakterier og kemisk under iltfrie forhold i dybere vandmættede jordlag.



Figur 2. Dybdefordeling af den gennemsnitlige nitratkoncentration i grundvandet målt i 2023 og vist for fire intervaller: < 1 mg/liter (grå), 1-25 mg/liter (mørkblå), 25-50 mg/liter (lyseblå) og > 50 mg/liter (rød, grænseværdien for nitrat i drikkevand). Antal analyserede prøver (n) er angivet. Kilde: Thorling et al. (2024 dec).

Uden oxygen, anvender bakterier først nitrat (NO_3^-) og derefter oxideret ferri-jern (Fe^{3+}) og sulfat (SO_4^{2-}) som respirationsmiddel (= elektronacceptor) ved nedbrydning og udnyttelse af organisk carbon. Nitraten omdannes ved denitrifikation til dinitrogen N_2 (eventuelt lidt lattergas, N_2O) og CO_2 frigives (se 1). Visse bakterier benytter nitrat til at oxidere mineralet pyrit (FeS_2) og danner N_2 , sulfat og reduceret ferro-jern (Fe^{2+} , se 2). Bakterier kan med nitrat oxidere ferro-jern og danne N_2 og ferri-jern (se 3). Uden bakteriers medvirken kan nitrat reduceres kemisk af lermineraller med ferro-jern ved en proces, der ligner (3).

- $5 \text{ Org-C} + 4 \text{ NO}_3^- + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ N}_2 + 5 \text{ CO}_2 + 4 \text{ OH}^-$
- $5 \text{ FeS}_2 + 14 \text{ NO}_3^- + 4 \text{ H}^+ \rightarrow 7 \text{ N}_2 + 10 \text{ SO}_4^{2-} + 5 \text{ Fe}^{2+} + 2 \text{ H}_2\text{O}$
- $5 \text{ Fe}^{2+} + \text{NO}_3^- + 12 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 5 \text{ Fe(OH)}_3 + 0,5 \text{ N}_2 + 9 \text{ H}^+$

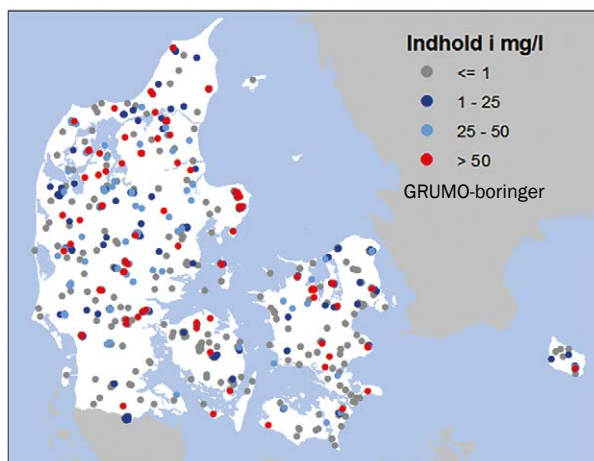
Nitratreduktionen er størst på lerjorde. En sammenligning mellem dyrkede oplande viser således gennemsnitlige nitratkoncentrationer i de øverste 11 meter af lerjorde på 36 mg/liter, mens indholdet er det dobbelte (72 mg/liter) i sandjorde.

kemiske processer. Det gælder i det såkaldte nitratbælte mellem Grenaa, Silkeborg, Nykøbing Mors og Aalborg, hvor sand- og grusaflejringer overlejrer sprækkekalcken, så nitraten fra markerne lettere trænger ned i grundvandsmagasinerne. Da det nye grundvand dannes med et nitratindhold omkring 50 mg/liter under konventionelt dyrkede marker, vil det udgøre et stigende problem i fremtiden med at skaffe nitratfattigt drikkevand, medmindre der etableres grundvandsparker uden dyrkning, gødskning og sprøjtning.

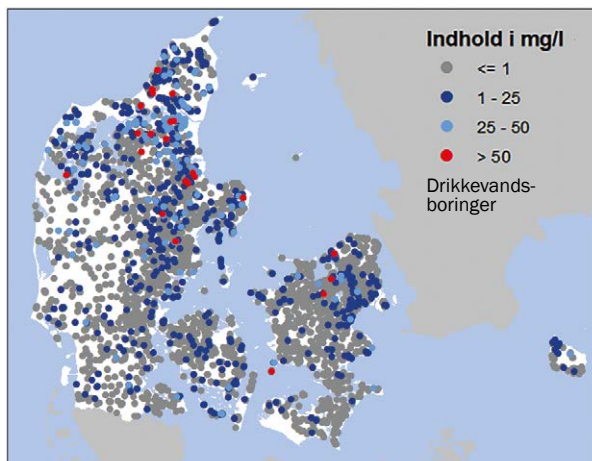
Udbredte grundvandsparker vil også være gavnlige for naturen. Som fagekspert i overfladevand og biodiversitet oplever jeg, at nitratrigt grundvand skaber omfattende forurening, hvor det bryder frem. Det sker i lysåbne potentielt artsrige kilder, der er blevet ændret til tæt opvækst af brændenælder og pilebuske. Nitratrigt grundvand fra dyrkningsjorde bryder også frem i skrænterne ved ådale og kysten, hvor den blomsterrige vegetation med mange insekter på tilsvarende måde kvæles af opvækst af næringskrævende høje urter og buske. Nitratrigt grundvand fremmer som bekendt også den ødelæggende algesuppe i søerne og fedtemøget i fjordene.

Pesticider i grundvandet

Oprindeligt skulle anvendelse af ethvert pesticid stoppe, hvis det blev konstateret i grundvandet. Men har



Nitratindholdet i grundvand i 2023 i 1.035 GRUMO-indtag. Nitratindholdet er opdelt på fire koncentrationsklasser. Kilde til begge kort: Thorling et al. 2024 dec. /Grafik efter GEUS



Nitratindholdet i grundvandet i 6.111 vandforsyningsboringer. Data viser gennemsnit pr. indtag i perioden 2019-2023. Vandværkerne undgår såvidt muligt at indvinde fra nitratholdige grundvandsmagasiner.



I mange år har vandværkerne investeret i dybere og dermed dyrere vandboringer for at undgå grundvand med nitrat og pesticider. For mange værker er den løsning ikke længere en mulighed, og nu er de henvist til at prøve at fortynde sig ud af problemerne. Mange mindre vandværker er blevet nedlagt på den baggrund.
Foto: Colourbox

man elementær indsigt i jordbundens struktur, ved man, at udtørring og frysning af jorden danner sprækker, ligesom der findes dybtliggende sprækker, der stammer helt tilbage fra gletsjernes tryk under istiden. Man ved også, at regnorme og andre større gravende dyr efterlader makroporer under pløjelaget til mere end 1 meters dybde. Ved intens nedbør kan vandopløselige pesticider eller deres nedbrydningsprodukter samt selv sværere opløselige stoffer hurtigt sive mod grundvandet via makroporer.

Selv om et pesticid i sin oprindelige form hænger fast i organiske stoffer i jorden, gælder det ikke nødvendigvis i meget permeable jorde af sand, grus og kalk, og slet ikke for vandopløselige nedbrydningsprodukter og for pesticidrester bundet til fine partikler af ler og organisk stof. Denne risiko for nedsivning af pesticider blev afvist af pesticideksperter tilknyttet landbrugssektoren i 1980'erne, men viste sig snart efter at være en kendsgerning. I 2025 er pesticiderne nærmest overalt i grundvandet.

Pesticider, som binder sig til organisk stof i dyrkningsjorden, kan på den anden side ved mange års

dosering akkumulere til biologisk skadelige niveauer for bakterier, smådyr og dermed omsætningen i rodzonen. Herfra kan moderstofferne og deres nedbrydningsprodukter tillige udvaskes gennem utallige år.

For at sikre, at man fortsat kan bruge grundvand som drikkevand, selvom det indeholder pesticider, indførte man i 1999 grænseværdier, som skulle overholdes. Da så grænseværdien alligevel blev overskredet, benyttede man en ny vurdering, som går ud på, om der er tale om en væsentlig overskridelse, og om man gennemsnitligt kan holde sig under grænseværdien ved at blande vand fra flere drikkevandsindtag. Det princip benyttes i dag hyppigt for drikkevandet, men udfordres i stigende grad af mangel på renere grundvand til fortynding.

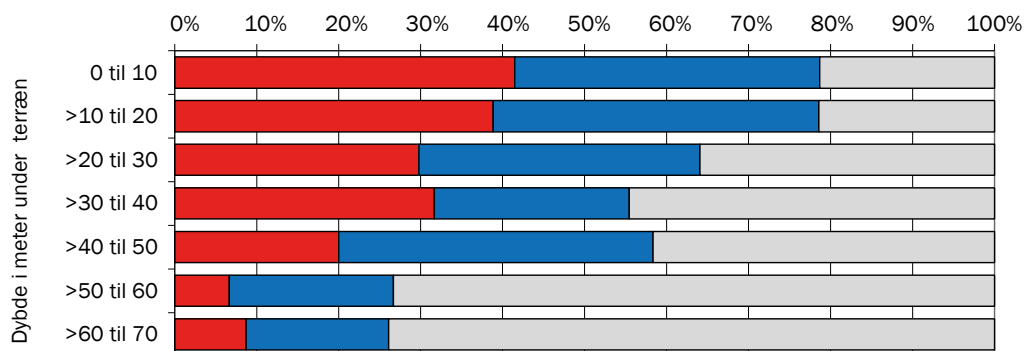
Med tiden har man erfaret, at pesticider, som blev forbudt for mange år siden, fortsat optræder i nydannet grundvand, fordi stoffet selv inklusive nedbrydningsprodukter langsomt frigøres fra ophobningen i jorden. Pesticider, som forbydes eller udfases, erstatter producenterne lynhurtigt med nye midler ledsaget af forsikringer om, at de ikke siver til grundvandet. Erfaringerne

viser imidlertid, at forsikringerne ikke holder i virkeligheden, da pesticidernes transport og nedbrydning i jorden afviger fra teori og standardiserede laboratorieforsøg, der ikke afspejler den heterogene dyrkningsjord og det foranderlige vejr.

Vi har fejlet stort

Myndighedernes godkendelse og kontrol kan slet ikke følge med i det tempo som tusindvis af nye pesticider produceres og markedsføres hvert år, selv om der anvendes mange millioner på måling, kortlægning og forskning. Vandforsyningerne er derfor voldsomt pressede af stigende udgifter til stadig flere kostbare analyser og vandbehandling, og små selskaber er tvunget til at indgå i større selskaber for at klare de økonomiske udfordringer.

Fra man stopper anvendelsen af pesticider på et landbrugsareal, vil det vare årtier, før de og deres nedbrydningsprodukter helt forsvinder fra nydannet grundvand og endnu længere tid vil det vare i dybe magasiner med gammelt grundvand, hvor pesticiderne måske slet ikke nedbrydes. Her falder deres koncentration kun meget langsomt, hvis det fortyndes af yngre, renere grundvand ovenfra.



Figur 3. Pesticider og deres nedbrydningsprodukter mod dybden i grundvandet i intervaller på 10 meter for perioden 2020-2022. Andelen af prøver med koncentrationer over grænseværdien ($0,1 \mu\text{g/L}$) er vist med rødt. Andelen med konstateret forekomst af pesticider er vist med blåt. Andelen uden konstaterede pesticider er vist med gråt, og den andel stiger markant med dybden og dermed med grundvandets alder. Efter figur 10 i Thorling et al. (2024 feb).

Vandforbrugerne, dvs. os alle, må tåle forureningen og betale for de stærkt øgede udgifter til kostbare kemiske analyser, nye boringer, pumpning af vand fra fjerne boringer og eventuelt kemisk rensning af drikkevandet. I intet tilfælde har landbruget, forureneren, måttet betale for udgifterne ved forureningen og fået påbud om at stoppe forureningen, så længe pesticidet fortsat er tilladt at anvende. Tværtimod forbeholder landbruget sig ret til at sprøjte tæt på drikkevandsboringer, og vandselskaberne og kommunerne har kun indgået få frivillige aftaler med landbruget, som kræver høje kompensationer for at stoppe sprøjtningen og forureningen af grundvandet.

Status for den nationale monitoring af grundvand for 2020-2022 afslører pesticider i 68 % af 1049 prøver analyseret mindst én gang i de tre år. Grundvandet er med andre ord forurenet med pesticider langt de fleste steder. Vi har fejlet stort med at holde grundvandet rent, og problemerne stiger og stiger. Grænseværdier for enkeltstoffer på $0,1 \mu\text{g/L}$ overskrides i 33 % af prøverne, og 13 % overstiger grænseværdien på $0,5 \mu\text{g/L}$ for summen af stofferne. Som forventet siver pesticiderne mod større jorddybder og ældre grundvand, idet grænseværdien for enkeltstoffer overskrides i 40 % af grundvandet fra 0-20 m og 7 % fra 50-70 m i jorden (figur 3).

I 7000 prøver af drikkevandet er billedet kun marginalt bedre. Der er

pesticider i halvdelen af prøverne, og i 14 % overskrides grænseværdien for enkeltstoffer. Også her er der mange flere fund af pesticider i boringer fra det øverste grundvand i 0-10 meters dybde (82 %) end fra 40-60 meter dybe boringer (7 %).

Fluorholdige pesticider og PFAS

Den seneste tid har der været særligt fokus på forurening med organiske perfluor- og polyfluoralkyl-forbindelser, forkortet PFAS. Problemet med disse stoffer er, at de er så svære at nedbryde i naturen, at vi kalder dem evigheds-kemikalier. Så længe der sker en tilførsel til miljøet, vil de derfor med tiden uundgåeligt overskride enhver rimelig grænseværdi, som opstilles. I overfladevand, jord og grundvand stammer PFAS fra mange andre kilder, idet de indgår i utallige produkter (elektronik, maling, imprægnering, blødgøring, smøremidler, teflon osv.), men de forsøges udfaset i EU. Det er imidlertid ikke tilfældet for fluor-pesticiderne i landbruget, der enten er eller danner PFAS-stoffer. Tværtimod stiger deres anvendelse eksplosivt i mængde. De er udviklede som særligt potente og længerevarende gifte. Da de således er evigheds-kemikalier vil de også med tiden overskride enhver rimelig grænseværdi, som opstilles.

I drikkevandsboringer fra det øvre grundvand (0-20 m) forekommer summen af fire langkædede PFAS-stoffer med et indhold over

grænseværdierne i 35 % af prøverne. I det dybere grundvand (40-60 m) er forekomsten lavere (9 %), hvilket stemmer overens med, at PFAS-produkter især er anvendt i de seneste 40 år. Dertil konstateres mindst ét af de 22 analyserede PFAS-stoffer i prøverne, men mange stoffer analyseres der ikke for, selv om nogle af dem måske er endnu hyppigere – det illustrerer den uoverskuelige analyse-udfordring. Endvidere godkendes pesticider i EU til anvendelse ét for ét, uden man kender cocktail-effekten i naturen og miljøet af alle pesticiderne sammen.

I Danmark anvender landbruget 14 sådanne fluorholdige pesticider. Når de nedbrydes, kan mindst halvdelen af dem afgive det lille molekyle trifluor-eddikesyre, TFA ($\text{CF}_3\text{-COOH}$), der er en simpel PFAS. TFA forekommer næsten overalt og i høje og stigende koncentrationer i det øvre grundvand. En anden kilde til TFA er regnen, idet TFA dannes i atmosfæren ved nedbrydning af fluorholdige gasser, der tabes fra køleanlæg og spraydåser.

PFAS og forsigtighedsprincippet

Da TFA forekommer i høje og stigende koncentrationer, ikke nedbrydes og ikke kan fjernes ved vandbehandling, anbefaler tre ledende forskere på feltet, Xenia Trier, Sandra S. Tøttenborg og Lisbeth E. Knudsen, et øjeblikkeligt forbud af fluorholdige pesticider (Politiken

12.12 2024). Sandra Tøttenborg henviser til dyreforsøg, der tyder på, at forsøgsdyr får leverskader af TFA. Lisbeth Knudsen udtaler: »Ud fra et forsigtighedsprincip kan jeg ikke afvise bekymringer med stoffet. Desuden er det meget stabilt, og vi slipper ikke af med det igen.«

Det fremhævede *forsigtighedsprincip* indgår i EU-lovgivningen, og det kan anvendes under tre forudsætninger: 1) identifikation af potentielt farlige følger, 2) evaluering af eksisterende videnskabelige data, og 3) omfanget af den videnskabelige usikkerhed. Om TFA og fluor-pesticider og de fleste øvrige pesticider gælder, at det ikke ud fra tilgængelige data er muligt at give en fuldstændig risikovurdering af potentielt farlige persistente stoffer på mennesker og natur. Og det kan berettige, at de hverken produceres, distribueres eller anvendes.

Pesticidlovgivningen i EU og herhjemme følger imidlertid ikke forsigtighedsprincippet. I Politiken 12.12.2024 er kontorchef i Miljøstyrelsen Bettina Ø. Larsen således citeret for: »Ifølge pesticidlovgivningen er vi som myndighed forpligtet til at foretage en konkret vurdering for hvert enkelt pesticid af, om TFA udvasker til grundvandet i koncentrationer over grænseværdien«. Kontorchefen nævner, at det er producenternes ansvar at dokumentere, at stofferne ikke udvaskes til over grænseværdierne.

For artiklens forfatter står det imidlertid klart, at flere fluorpesticider bidrager til TFA i grundvandet og dermed til, at grænseværdien med



Foto: Colourbox

tiden overskrides. Når det sker, kan producenten anføre, at det ikke skyldes det konkrete pesticid. Godtages denne påstand, kan intet pesticides bidrag til TFA dømme det ude. Da dosering og nedbrydning af pesticider samt jordtype, makroporer, skybrud osv. påvirker TFA-udviklingen i grundvandet, øjner jeg så mange usikkerheder og smuthuller, at et forbud kan forhindres i det uendelige. Så borgerne og myndighederne står svagt i kontrollen af miljøfarlige pesticider.

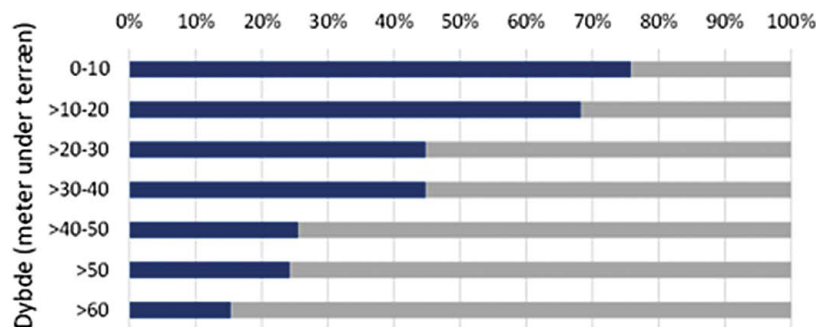
Fremtidens drikkevand?

Professor emeritus Erik Arvin og andre sagkyndige har i mange år skrevet om den stadig mere kritiske tilstand for grundvandet og drikkevandet i Danmark og anbefalet en skærpet kurs. Anvendelsen af fluorholdige pesticider kan som nævnt helt forbydes. Men skiftende regeringer og Miljøstyrelsen griber ikke markant ind over for landbrugets nitrat- og pesticidforurening.

Det sagkyndige udvalg i Akademiet for de Tekniske Videnskaber er alarmerede over forureningen af grundvandet og drikkevandet. Som ferskvandsbiolog og økolog deler jeg udvalgets anbefalinger:

- Skærpet regulering af pesticider og kemikalier
- Afværge forureningskilder, gamle såvel som eksisterende
- Udforske bedre vandrensning, fordi vi er pressede på at levere rent vand
- Oprette *grundvandsparker* og *stoppe pesticidesprøjtning* i god afstand fra vandboringer

Medmindre forureningskontrollen skærpes, og der snarest oprettes 200.000 hektar grundvandsparker, vil rent drikkevand om få år ikke mere strømme ud af hanerne til danske forbrugere. Og ingen vil kunne sige, at vi ikke var blevet advaret! ■



Dybdefordeling i vandforsyningsboringer for TFA i perioden 2021-2023. Indtagene er opdelt i to koncentrationsintervaller: ≤ KV på 9 µg/l (blå), eller ikke påvist (under detektionsgrænsen), grå. Dybden angiver afstanden fra terræn til overkanten af indtaget. Kilde: Thorling et al. (2024 dec).

Litteratur

- Arvin E. 2024. Miljøfremmede stoffer – en mission impossible? *Vand & Jord* 31, nr. 3: 96-99.
- Jacobsen B. H. et al. 2024. Health-economic valuation of lowering nitrate standards in drinking water related to colorectal cancer in Denmark. *Science of the Total Environment* 906: 167368.
- Rosenbom A. E. & Ullum M. 2023. Trods regelret brug udvaskes pesticidstofferne. *Vand & Jord* 30, nr. 3: 99-101.
- Sand-Jensen K. 2023. Problematiske fluorstoffer overalt. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 2: 26-31.
- Schullehner J. et al. 2018. Nitrate in drinking water and colorectal cancer risk. A nationwide population based cohort study. *International Journal of Cancer*/doi.org/10.1002/ijc.31306.
- Thorling L. et al. 2024. Grundvandsovervågning. Resumé. Status og Udvikling 1989-2022. GEUS 2024 feb.
- Thorling L. et al. 2024. Grundvandsovervågning Status og udvikling 1989 – 2023, GEUS 2024 dec.
- www.grundvands-overvaagning.dk.
- Note: Tak for kommentarer fra Erik Arvin, Jens Andersen, Jens Borum og Walter Brusch.

De forklaringer, du får, når du trykker "hvorfor ser jeg denne annonce?" på Facebook, baserer sig på de oplysninger, du har delt med platformen samt dine interaktioner på Facebook og eventuelt også andre sider. Et studie fra 2018 viste dog, at forklaringerne typisk er mangelfulde og vage, idet de i mange tilfælde undlader de dele af dataindsamlingen, der kan føles intimiderende for brugerne. Det giver anledning til kritiske spørgsmål om, hvad forklaringernes formål reelt er (Andreou et al. 2018).

Foto: Shutterstock



KUNSTIG INTELLIGENS

og kunsten at give en god forklaring

Hvad er en god forklaring? Selv om svaret på dette spørgsmål ikke er entydigt, rummer det flere vigtige betragtninger for udviklingen af såkaldt Explainable AI, der er metoder til at give forståelige oversættelser mellem kunstig intelligens og mennesker.



Forfatter: Torben Esbo Agergaard er ph.d.-studerende ved Center for Videnskabsstudier, Institut for Matematik, Aarhus Universitet. Torbens forskning undersøger etiske og erkendelsesmæssige udfordringer ved Explainable AI, og hvordan vi i fremtiden kan få bedre oversættelser mellem systemer baseret på kunstig intelligens og mennesker. ta@css.au.dk

Kunstig intelligens (eller blot AI efter det engelske Artificial Intelligence) oplever som bekendt en rivende udvikling og udbredelse i disse år. Det skyldes i høj grad udviklingen af meget komplicerede modeller, der med mindre og mindre hjælp fra mennesker kan udlede mønstre i store mængder data. Men succesen for kunstig intelligens er forbundet med et voksende problem: Når modellerne så at sige lærer fra data på egen

hånd, bliver det sværere for brugerne, ja, selv for udviklerne, at forstå, hvad modellerne lægger vægt på, når de lærer. Modellerne er blevet uigennemskuelige; de er blevet til såkaldte "black boxes", og det gør det eksempelvis svært at korrigere fejl i dem.

Det er netop med ønsket om at imødekomme udfordringen med "black box"-modeller, at forskere og IT-udviklere lige nu arbejder på højtryk for at udvikle metoder, der

gør det muligt at forklare, hvordan modellerne når frem til deres output. Forklaringerne kan tage form som tekst, grafik eller statistik og kan eksempelvis fremhæve, hvilke variabler modellerne har lagt vægt på i en given situation. Det kunne være hvilke pixels, der har været udslagsgivende ved vurderingen af et scaningsbillede, eller hvilke interaktioner Instagrams algoritme lægger vægt på, når du får serveret reklamer for hvide sneakers i dit feed.

Metoder, der forklarer, hvorfor modellerne når frem til deres output, kalder vi Explainable Artificial Intelligence (oftest forkortet XAI). Kort sagt er XAI metoder til at oversætte mellem AI-baserede systemer og mennesker.

Bliver din ansøgning om et banklån afvist, kan XAI hjælpe med at forklare hvorfor, hvis beslutningen er baseret på AI, hvilket er udbredt i dag. På Facebook og Instagram kan du bede om forklaringer på, hvorfor deres marketingsalgoritme har puttet en given annonce i dit feed. Og når et AI-baseret GPS-system som Google Maps fortæller, at en udvalgt rute er "den hurtigste", er det også en form for XAI, fordi det er en forklaring på, hvorfor den givne rute er valgt frem for andre.

Et forklaringsproblem

For at XAI-metoderne kan få succes, kræver det svar på et spørgsmål af mere filosofisk end teknisk karakter: Hvad er en god forklaring?

Lige så simpelt som spørgsmålet lyder, lige så kompliceret er svaret. Der findes nemlig ingen almene kriterier for, hvad der tæller som en god forklaring. I stedet afhænger det af den sammenhæng, som forklaringen indgår i, herunder hvilke mål modtageren skal opnå.

Det er ellers fristende at prøve at opstille almene kriterier for den gode forklaring. Det kunne være kriterier som korrekthed og nøjagtighed. Korrekthed er dog ikke et tilfredsstillende kriterium. Der findes nemlig masser af korrekte forklaringer på et givet fænomen, men de er ikke lige informative. Går der ild i dit lokale bageri, er forklaringen "der var ilt i luften til at nære ilden" lige så korrekt som "bageren var begyndt at eksperimentere med at bruge sprit i stedet for olie i dejen". Den er bare ikke lige så interessant, vel?

Og hvad nøjagtighed angår, er det faktisk sjældent, at en fuldstændig nøjagtig forklaring er mulig eller

Centrale begreber indenfor kunstig intelligens

Kunstig intelligens

En gængs opfattelse er, at der er tale om kunstig intelligens, når et computerbaseret system løser opgaver via en fremgangsmåde, der minder om menneskelig intelligens. Det kunne være at opstille analyser, vurderinger eller forudsigelser på baggrund af data, for eksempel at analysere brugeradfærden på et socialt medie eller streamingtjeneste med henblik på at vise annoncer eller anbefalinger, eller at vurdere symptombilledet hos en patient. I andre situationer kan kunstig intelligens omsætte data til handlinger eller interaktioner med mennesker, for eksempel chatbots.

Algoritmer

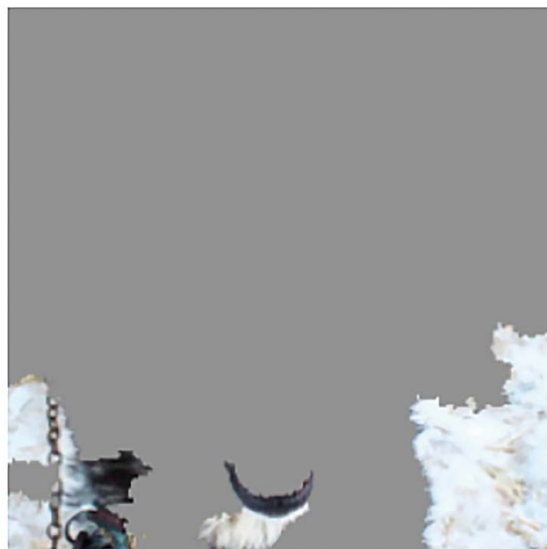
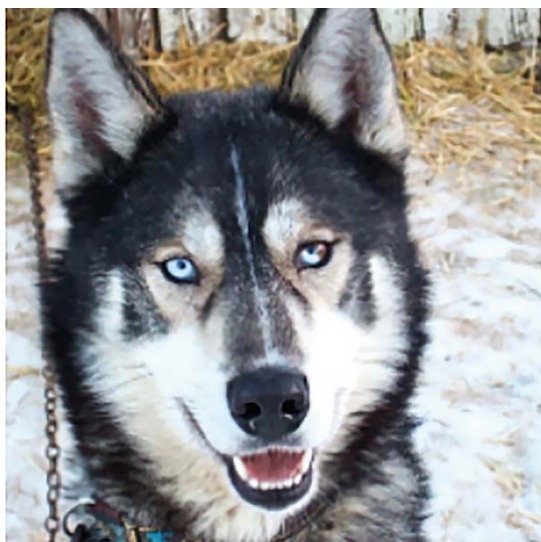
En algoritme er en sekvens af trin, der beskriver, hvordan man på baggrund af et input når frem til et resultat, der løser en opgave. En bageopskrift er en slags algoritme, hvor input er sukker, mel, mælk m.v. og resultatet er en kage. I en computermæssig sammenhæng beskriver algoritmer typisk, hvordan systemet skal omsætte et data-input til et resultat. Selv om algoritmer er centrale for kunstig intelligens, er relationen ikke en-til-en. Et system baseret på kunstig intelligens anvender ofte flere algoritmer.

Model

En model er en matematisk (for eksempel formelbaseret eller grafisk) beskrivelse af, hvordan vi kan strukturere data, og hvad vi kan forvente af fremtidige data, hvis beskrivelsen er god. En lineær eller eksponentiel fremskrivning er eksempler på simple modeller. Modeller er dog sjældent perfekte og vil derfor ofte være forbundet med en vis fejlmargen eller usikkerhed.



I 2016 viste en undersøgelse af en algoritme brugt i det amerikanske retssystem til at vurdere risikoen for, at en tiltalt begik kriminalitet igen, at tiltalte med mørk hudfarve systematisk fik højere risiko-score end personer med lys hudfarve tiltalt for samme type forbrydelse. Det er et eksempel på endnu en type af problemer med uigennemskuelige AI-systemer, nemlig såkaldte biases, hvor anvendelsen af systemet fører til diskrimination af bestemte befolkningsgrupper.



Modellen her skulle lære at skelne mellem en husky og en ulv, men fordi ulvebillederne i træningssættet havde sne i baggrunden, forbandt modellen ulve med sne, og huskyen på billedet til venstre blev derfor klassificeret som ulv. XAI-forklaringen på billedet til højre blotlægger fejlen ved at fremhæve pixels i sneen frem for karakteristika ved den fejklassificerede husky. Kilde: Ribeiro et al. (2016, s. 1143).

ønskværdig. Tænk, hvis din GPS forklarede alle skridt i beregningerne bag dens rutevejledning. Så hellere gå tilbage til at finde vej via et landkort.

Det hele bliver mere kompliceret af, at den gode forklaring heller ikke afhænger af, hvilket spørgsmål vi stiller, men i hvilken sammenhæng vi stiller dem i. Hvad der er et godt svar på spørgsmålet "hvordan virker mit TV?", afhænger eksempelvis af, om du ønsker at tænde det, eller om du forsøger at reparere det, hvis det ikke fungerer.

Vi er derfor tilbage ved, at en forklaring er god, hvis den gør det muligt at opnå de mål, der er vigtige i den givne sammenhæng, for eksempel at du kan reparere dit TV.

Dette efterlader os imidlertid med to nye spørgsmål: 1) Hvordan konstruerer og udvælger vi forklaringer, der gør modtageren i stand til at opnå disse mål? Og 2) Hvad er egentlig målene i en given sammenhæng?

Begge spørgsmål er naturligvis også vigtige for udviklingen af XAI og giver anledning til en række etiske nøgleudfordringer for feltets udvikling. Dem skal vi se nærmere på nu.

At designe forklaringer er en balancegang

Oversætter vi det første spørgsmål til en XAI-sammenhæng, lyder det noget i stil med: Hvordan kan udviklere designe forklaringer, der gør det muligt for brugeren at opnå de mål, der er vigtige i en given anvendelses-sammenhæng? Svaret er, at udviklerne skal finde en balance mellem brugerens informationsbehov og de ressourcer, hun har til rådighed i situationen. Ressourcer kan være, hvor meget tid, koncentration eller forudgående viden brugeren har.

Tag GPS'en i din bil, der har forklaret valget af rute med, at det er "den hurtigste". Den kunne sagtens have givet en længere forklaring om, hvad den har antaget om din kørerstil og ventetiden i lyskrydsene på ruten. Det kunne måske gøre dig i stand til at korrigere ruten til en endnu hurtigere, hvis du ved, at du kører anderledes, end GPS'en antager, eller at der er lyskryds på ruten, der skifter umanerlig langsomt. Men når du sidder i trafikken, er der ikke tid til lange forklaringer. Hellere komme to minutter senere frem end at risikere at køre galt, fordi du bliver overdyndet med information.

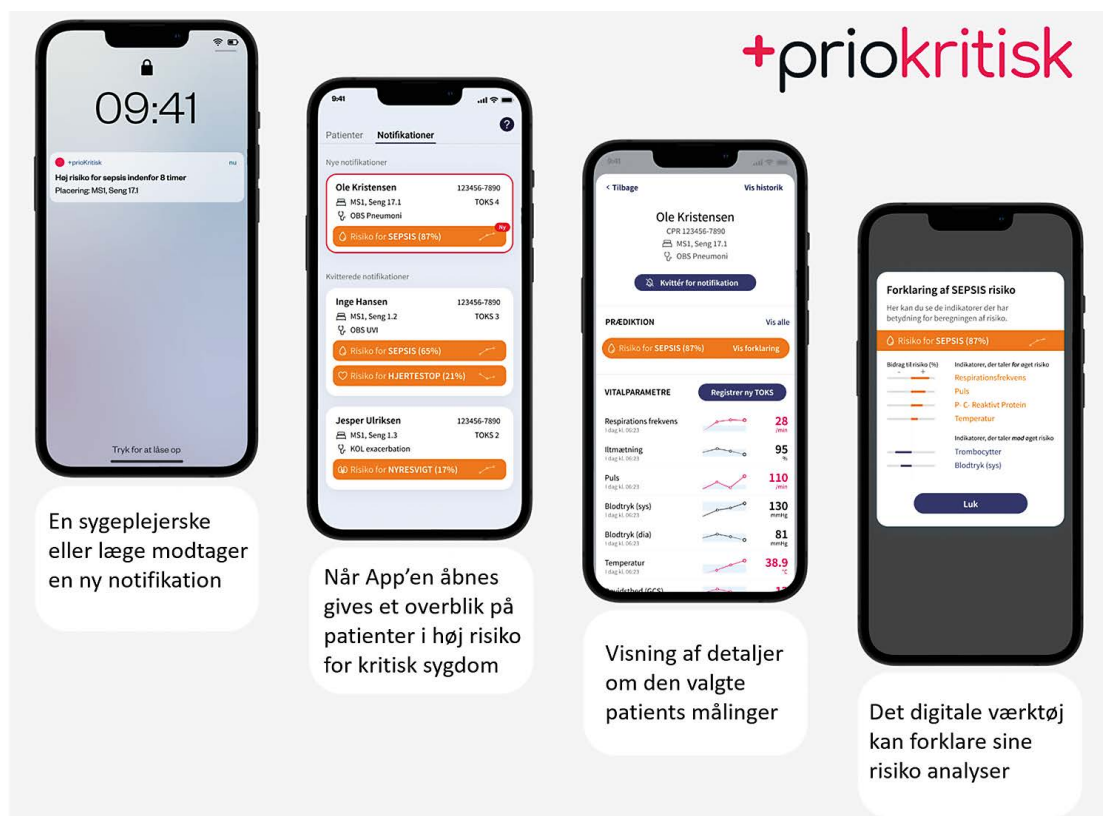
I andre tilfælde er det dog sværere at vægte informationsbehov og ressourcer, fordi der er tunge risici

på begge sider. Indenfor lægevidenskaben vinder AI-baserede systemer frem, og det samme gør også XAI-metoder til at understøtte, at lægerne får forklaret systemernes vurderinger. Her er det vigtigt, at lægerne får deres informationsbehov dækket for at kunne være kritiske over for systemets vurderinger for patienternes helbreds skyld. Men også læger har travlt, og komplekse eller utidige forklaringer kan medføre spild af værdifuld tid.

At designe forklaringer, der balancerer informationsbehov og ressourcer, er en nøgleudfordring for XAI. Og netop fordi AI kommer krybende ind i flere og flere situationer i vores liv, er det vigtigt, at der også fremover forbliver stor fokus på at forstå de behov og ressourcer, situationerne fordrer. Men "den gode forklaring" er ikke kun et designproblem. På et mere fundamentalt niveau er vi nødt til at sikre, at selve formålet med forklaringerne faktisk er i brugernes interesse. Vi vender os derfor nu mod det ofte oversete spørgsmål 2) fra tidligere:

Hvad er egentlig målene i en given sammenhæng?

At GPS'en skal få os hurtigt men stadig sikkert frem, og at læger skal træffe de bedste beslutninger for patienternes helbred, om end



En sygeplejerske eller læge modtager en ny notifikation

Når App'en åbnes gives et overblik på patienter i høj risiko for kritisk sygdom

Visning af detaljer om den valgte patients målinger

Det digitale værktøj kan forklare sine risiko analyser

Eksempel på anvendelse af XAI i sundhedsvæsenet. SOFUS (tidl. +priokritisk) giver ikke blot en risikoscore for at indlagte patienter får akutte sygdomme som blodforgiftning (sepsis). Den giver også en forklaring på risikovurderingen ved at fremhæve de symptomer, der er mest udslagsgivende for vurderingen (billede 4) SOFUS er under implementering på Regionshospitalet Horsens. Kilde: Regionshospitalet Horsens hjemmeside.

tidspres også er en faktor, virker som oplagte og rimelige mål for de XAI-baserede forklaringer, vi har kigget på. I mange situationer virker målene med forklaringerne da også så oplagte og rimelige, at vi ikke behøver at sige dem højt. Kradser vi i overfladen, vil vi i nogle situationer dog finde, at afsenderen kan have skjulte mål med forklaringerne, der ikke er oplagte for modtageren, hvilket kan medføre etiske problemer. I en XAI-sammenhæng kan afsenderen både være udvikleren eller et firma eller en organisation, der tager en algoritme i brug.

Tag eksemplet, hvor du har fået din ansøgning om et banklån afvist med forklaringen "du tjener ikke penge nok lige nu". Det virker umiddelbart som god stil at give en forklaring som denne på algoritmens vurdering, idet det giver dig mulighed for at reagere ved for eksempel at gå op i tid på dit arbejde.

Men forklaringen kunne lige så godt

være "du bruger for mange penge". Et nedsat forbrug vil kunne give dig lige så mange penge på din bankkonto som det at tjene flere penge og burde derfor også kvalificere dig til lånet. Og har du svært ved at gå op i tid på dit arbejde, er denne forklaring formentligt bedre for dig end den forrige. Men hvis din bank tjener penge på gebyrer, hver gang du bruger penge, er det en bedre forretning for dem, at du tjener og bruger flere penge, end at du sparer dem op. Dermed kan banken have en interesse i, at du får den første frem for den anden forklaring.

På et mere overordnet plan kan forklaringen også være med til at flytte fokus hen på, hvad du skal gøre for at gøre dig fortjent til lånet. Her er det dog værd at huske, at algoritmens vurdering baserer sig på de regler for udlån, som i sidste ende er bankens ansvar. Men for banken kan det være mere bekvemt at lægge fokus på kundens ansvar frem for deres eget.

Eksemplet viser, hvordan forklaringer på subtile måder kan (mis)bruges til andre formål end at give modtageren forståelse. Selv korrekte forklaringer kan som i bankeksemplet være udvalgt, så de nudger modtageren til den adfærd, som afsenderen ønsker, eller være afgrænset til kun at forklare de årsager, der er i afsenderens interesse.

Ligesom AI-modeller ikke er et stykke neutral matematik, men baserer sig på aktive beslutninger om, hvad de skal og ikke skal kunne, er det samme gældende for de forklaringer, der oversætter mellem algoritmerne og deres brugere.

Den anden nøgleudfordring for XAI er derfor at sikre, at forklaringerne faktisk er til gavn for brugerne og ikke misbruges til formål, der kun er i afsenderens interesse. Dette kræver, at der fremover bliver lagt mere vægt på at forstå og blotlægge de fordækte mål, som forklaringerne kan misbruges til at understøtte. ■

Om artiklen: Artiklen udløber af projektet TREAT (Towards Responsible Explainable AI Technologies), der er ledet af lektor Rune Nyrup og støttet af Danmarks Frie Forskningsfond. Der skal lyde en stor tak til Rune og til Kristian Hvidtfelt Nielsen, centerleder for Center for Videnskabsstudier, for værdifuld sparring i forbindelse med artiklen.

Videre læsning: Du finder en god og frit tilgængelig introduktion til Explainable AI i bogen her: Molnar, C. (2024). Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable. Interpretable Machine Learning.

Husky-ulve-billedet er fra denne indflydelsesrige artikel om LIME, en af de mest udbredte XAI-metoder: Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). "Why Should I Trust You?": Explaining the Predictions of Any Classifier. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 1135–1144. doi.org/10.1145/2939672.2939778.

Læs mere om SOFUS og følg med i implementeringen her: Forskningsenheden Regionshospitalet Horsens. (n.d.). SOFUS: Sequential Organ Failure Support System. www.sofus-ai.com/home-dk.

Omtalte studie af Facebooks "hvorfor ser jeg denne annonce?"-forklaringer: Andreou, A., Venkatadri, G., Goga, O., Gummadi, K. P., Loiseau, P., & Mislove, A. (2018). Investigating Ad Transparency Mechanisms in Social Media: A Case Study of Facebook's Explanations. Proceedings of the Network and Distributed System Security Symposium (NDSS 2018). 1–15. doi.org/10.14722/ndss.2018.23204.



JEG GIK EFTER EN BLØD START PÅ ARBEJDSLIVET

Fysikstudiet gav Kamilla analytisk tankegang og evnen til at forstå komplekse problemer med i bagagen. Det var adgangsbilletten til et job som software engineer i virksomheden BEC Financial Technologies, der løser IT-opgaver for banker og finansielle institutter.



Forfatter
Af Birgitte Svennevig,
journalist, Det Natur-
videnskabelige Fakultet
og SDU Climate Cluster.
birs@sdu.dk

Man lægger mange timer og meget energi i sit studie, så man skal vælge noget, man brænder for og har lyst til at dykke ned i. Sådan lyder Kamilla Kaminsky Lintrup's råd til uddannelsessøgende, og sådan valgte hun også selv studie.

»Jeg overvejede også ingeniør. Det var mere konkret, men jeg kunne godt lide det mere generelle i at læse fysik. Og så havde jeg en fysiklærer i gymnasiet, som var vildt passioneret og en god underviser. Det vakte virkelig min interesse, at jeg med fysikken kunne dykke ned i ting, jeg

ikke forstod«, fortæller Kamilla.

Men »ingen søger en fysiker i jobannoncerne«, siger hun også, og efterhånden som studietiden skred frem, kunne hun godt blive lidt bekymret for, hvilket job mon ventede på hende efter endt studie. »Med fysik bliver man så bred, at man kan søge utroligt mange stillinger, og det var faktisk lidt svært at rumme, da jeg læste. Men nu er jeg landet et godt sted.«

Kamillas stillingsbetegnelse i dag er software engineer i BEC Financial Technologies, hvor hun har arbejdet, siden hun blev færdiguddannet.

Graduate-program var vejen ind i arbejdslivet

»Jeg ville gerne have et graduate-program, da jeg skulle ud at søge mit første job, og det tilbød BEC.«

Graduate-programmet i BEC er af et års varighed og tilbyder blandt andet en mentor, der guider de nyuddannede gennem den første tid i virksomheden. Man får kurser undervejs, og der er ofte også sociale events sammen med andre graduates. »Vi var 25 graduates, da jeg startede, og vi var for eksempel i Polen sammen, hvor BEC har en af sine lokationer. Et graduate-forløb er en perfekt overgang mellem

universitetet og job. Det giver en lidt blødere start på arbejdslivet, og det er spændende, at en virksomhed vil investere i en«.

Som software engineer i BEC arbejder Kamilla med at administrere kundedata for de banker og finansielle institutter, som BEC løser IT-opgaver for. »Vi sidder med et kæmpestort systemansvar, og det er spændende. Samfundet fungerer jo ikke, hvis bankerne går ned, og mit område med kundedata er så centralt, at mange her i virksomheden er afhængige af vores team. Jeg er fascineret af de store set-ups, som vi arbejder med.

Der er ikke meget konkret fysik i arbejdsdagen, medgiver Kamilla – i stedet trækker hun snarere på den analytiske tankegang og evnen til at forstå komplekse problemer, som hun tilegnede sig under studiet.

» Det er samme tilgang, som når man beskriver et fysisk problem.«

Kamilla er ganske godt tilfreds med ikke at arbejde med fysikkens tunge ligninger i sit arbejdsliv, men hun kan godt savne at dykke lidt

mere ned i fysikken nogle gange. Derfor læser hun bøger om fysik, og hun rejser gerne til Finland for at se nordlys. »Den næste bog, jeg skal læse, er *The Greatest Story Ever Told So Far*. Den beskriver universet ud fra fysik, og den glæder jeg mig til.«

Sommerskole på La Palma

Kamilla gik direkte fra gymnasiet til universitetet. »Jeg har tænkt uddannelse, siden jeg var helt lille. I starten af gymnasiet var jeg i tvivl, om jeg skulle i den sproglige eller naturvidenskabelige retning, så jeg valgte et spor, hvor jeg havde begge på A-niveau. Da jeg blev optaget af fysik og valgte at læse det på universitetet, var det fedt at få lov at dykke ned i det. Jeg var vildt fascineret af partikelfysik og astrofysik! Jeg var blandt andet på et par ugers sommerskole ved Nordic Optical Telescope på La Palma.

Men Kamilla var også optaget af at snuse til andre hjørner af fysikken – gerne nogle, som var mere efterspurgte på jobmarkedet end partikelfysik – og derfor kastede hun sig over statistik og databehandling på kandidatstudiet. Hun tog sidefag

Om Kamilla

Kamilla Kaminsky Lintrup er 28 år gammel. Hun gik på Sct. Knuds Gymnasium, hvorfra hun dimitterede som STX/Matematik-Fysik-student i 2015.

I 2015 startede hun på fysikuddannelsen på Syddansk Universitet. Hun skrev speciale om 'Bayesian analysis of arterial smooth muscle contraction' / 'Bayesiansk statistisk analyse af glatte muskelcellers kontraktile dynamik i arterier' og blev kandidat i januar 2021. I dag arbejder hun i BEC Financial Technologies.

i matematik, både fordi det er et godt supplement til fysik, og fordi det også gav mulighed for at blive gymnasielærer.

»Det er jeg ret sikker på, at jeg ville kunne lide. Men nu er jeg software engineer, hvilket jeg synes er utroligt spændende, og her er jeg glad for at være. Jeg har fået kurser i blandt andet programmering og banking, og jeg kan godt lide, at min arbejdsdag er så alsidig.«

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

Fordyb dig i medicinal biologi, molekylær biologi, matematik, fysik, kemi eller miljøbiologi. Du kan f.eks. arbejde med at undersøge miljøskadelige stoffer i havet, bedre diagnosticering og behandling af sygdomme, antibiotikaresistente bakterier, plastforurening eller måske er du bare nysgerrig på hvordan man udvikler nye naturvidenskabelige metoder og teorier?

RUC
Roskilde Universitet

Arbejd på tværs af naturvidenskabelige felter.

Arbejd med topforskere i moderne laboratorier.

Uddannelsen kan tages på både dansk og på engelsk, hvor studiemiljøet er mere internationalt.

Læs mere her:



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

Da fisken fik *Carstenicrinus* galt i halsen

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

For cirka 66 millioner år siden svømmede et dyr – formentlig en fisk – rundt i det hav, der dengang dækkede området omkring Stevns Klint på Sjælland. Måske åd den et eller andet, den ikke kunne tåle. I hvert fald brækkede den sig, og ganske heldigt for os videbegærlige mennesker, blev brækklatten bevaret, så den kunne dukke op igen i al dens pragt 66 millioner år senere. Det er fossilsamleren Peter Benniscke, der har fundet den fossile brækklæt, der nu er blevet erklæret for danekræ og udstillet på Østsjællands Museum.

Da jeg så et billede af herligheden blev jeg ganske begejstret. For hvad var det dog, der i sin tid havde givet "fisken" brækfornemmelser? Er det ikke en vaskeægte *Carstenicrinus*?

Lad mig forklare: Tilbage i starten af 1990'erne skrev jeg geologispeciale om søliljer i de danske kridt- og kalk-aflejringer. Den mest interessante historie i den forbindelse handlede om netop den gruppe af små søliljer, man ser rester af på dette billede af brækklatten (mest tydeligt med nogle led fra stilken til venstre). Slægtsnavnet på denne type sølilje var dengang *Bourgueticrinus*, et navn etableret af den franske naturforsker Alcide d'Orbigny tilbage i 1840. Men nu er det sådan med biologisk systematik – som er videnskabens måde hierarkisk at inddele arter i grupper baseret på deres slægtsskabsforhold – at den altid er til diskussion. Det kan nemlig være svært at kende fossile arter fra hinanden og vurdere deres indbyrdes slægtskab. Ikke mindst når fossilerne – ligesom søliljer – består af hundredvis af forskellige skeletdele, der næsten altid findes enkeltvis.

Da jeg skrev mit speciale, blev jeg klar over, at der var flere problemer med systematikken for disse søliljer. Nogle år senere blev jeg kontaktet af den franske palæontolog Michel Roux, der havde sat sig for at få styr på sagerne. Jeg sendte ham i den forbindelse noget af mit materiale. I 2019 vendte han tilbage og sagde,

at nu havde han publiceret en ny systematik for disse søliljer. Og i taknemmelighed for, at jeg havde hjulpet ham, havde han opkaldt en slægt af disse søliljer efter undertegnede, nemlig *Carstenicrinus*. Denne slægt omfatter netop de søliljer, som før blev kaldt *Bourgueticrinus*. Det syntes jeg selvfølgelig var vældig sjovt, men forventede ikke, at det ville blive alment kendt, da disse søliljer som regel er meget uanseelige fossiler.

Men så fandt førnævnte Peter Benniscke et usædvanligt velbevaret eksemplar ved Møns Klint, der også blev erklæret danekræ. Eksperterne måtte i den forbindelse have fat i den nyeste systematik for at bestemme fossilet, og de nåede frem til, at det var en *Carstenicrinus constrictus*. Og det er netop sådan en fætter, der nu igen er dukket op – denne gang i en fossil brækklæt, som et eller andet væsen udspyede for 66 millioner år siden.



Foto: Sten Lennart Jakobsen.