

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur*VIDENSKAB

VORES FORSLUGNE GALAKSE

Miljø-DNA og naturovervågning
Mindre luftforurening giver varmere klima
Turbulens på flyveturen

NR.2 - 2025 MAJ 50 KR.

Jodle-aber

De bedste jodlere kommer måske ikke fra Alperne, men nærmere fra regnskoven i Latinamerika, viser et nyt studium af forskere fra Anglia Ruskin University og Universit t Wien.



Foto: Dr Jacob Dunn, Anglia Ruskin University

Aber har – til forskel fra mennesket – en såkaldt stemmemembran i deres hals, der er en ekstrem tynd membran placeret over stemmebåndene i strubehovedet. I det nye studium viser forskerne, at disse stemmemembraner tillader aber at introducere "stemmestop" i deres kald. De opstår, når aberne skifter lydproduktion fra stemmebåndene til vokalmembranerne. De producerede kald besidder de samme hurtige frekvensovergange, man kender fra jodling – men dækker et meget bredere frekvensområde.

Kilde: *Philos. Trans. R. Soc. B*

Quizzen

Hvor længe tager det for DNA fra en given organisme at forsvinde fra en vandprøve, efter at man har fjernet selve organismen fra vandet?

A: Cirka 2 dage? B: Cirka 2 uger? eller C: Cirka 2 måneder?

Find svaret i artiklen om miljø-DNA.



Corona-nedlukningens betydning

I en kronik i Politiken g r Viggo Andreassen, Daniel Munch Nielsen og Lone Simonsen, alle tilknyttet PandemiX-center på RUC, rede for, hvad vi i dag har lært om nedlukningernes betydning under coronapandemien. De skriver, at der i dag er evidens for, at cirka to tredjedele af danskerne ville være blevet smittet i løbet af pandemiens første år uden nedlukning. Med en dødelighed på 0,5 % svarer det til 21.000 dødsfald i Danmark i første bølge. Dertil kommer, at vi i dag ved, at Danmark i det følgende år yderligere ville være blevet ramt af en alfab lge og af reinfektioner inden vaccinerne ankomst.

Kilde: *Politiken* 11/3-2025.



Foto: Shutterstock

Mindre svovl giver færre lyn

Forskning har tidligere vist, at forurening med for eksempel svovlpartikler fra skibe øger forekomsten af tordenskyer og lyn i de stærkt trafikerede skibsruter i Det Indiske Ocean og Det Sydkinesiske Hav. Chris Wright ved University of Washington i Seattle og kolleger har i et nyt studium analyseret tordenskyer og lynhyppigheden i disse områder f r og efter januar 2020, hvor nye internationale regler trådte i kraft, der markant reducerede den tilladte mængde af svovl i skibsbrændstof. Deres resultater tyder på, at antallet af lyn faldt med 76% i Det Indiske Ocean og med 47% i Det Sydkinesiske Hav mellem 2020 og 2023.

Kilde: *Nature* og *ACP*, 25, 2937–2946, 2025

Sexchikane værre end uredelighed

I det akademiske miljø er citeringer en grundlæggende måde at anerkende forskeres videnskabelige arbejde på. Et nyt studium publiceret i tidsskriftet *Plos One* viser, at det ikke altid er rent faglige kriterier, der driver citerings-adfærden. Studiet viser, at forskere, der offentligt er blevet anklaget for sexchikane, oplevede en markant nedgang i antallet af citeringer i tre år efter, at anklagen blev offentlig kendt. Til sammenligning var der ikke en signifikant nedgang i antallet af citeringer for forskere, der offentligt er mistænkt for videnskabelig uredelighed.

Kilde: *Plos One*/<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317736>

N bdyrsmysterium opklaret

Det har længe været et mysterium, hvorfor et n bdyr indsamlet på den fjerde Dana-ekspedition for næsten 100 år siden og i dag opbevaret på Statens Naturhistoriske Museum indeholder en masse klumper spredt rundt i kroppen. Men nu har et forskerteam ledet af lektor Henrik Lauridsen fra Aarhus Universitet opklaret mysteriet ved hjælp af en helt ny scanningsmetode kaldet hyperspektral micro-CT, som for første gang er blevet anvendt på et naturhistorisk museumspr parat. Det viser sig, at klumperne er blyhagl, der er blevet kemisk nedbrudt.



Kilde: *Carlsbergfondet/PLOS one* doi.org/10.1371/journal.pone.0309845

indhold



Miljø-DNA kan revolutionere naturovervågningen

Danske forskere har været pionerer på de metoder, der benyttes til at analysere DNA i naturen.

8



Vores forslugne galakse

Rumteleskopet Gaia har kortlagt Mælkevejen og gjort astronomerne meget klogere på galaksens form og fortid. Nu ved vi fx, at Mælkevejen har opslugt adskillige mindre galakser i tidens løb.

14



Mindre luftforurening giver et varmere klima

Aerosoler spiller en stor rolle for menneskers sundhed i form af luftforurening, men de påvirker også klimaet både direkte og indirekte.

20



Kraftig turbulens på flyveturen – en oplevelse for livet!

Hvad forårsagede den kraftige turbulens, der i november måned 2024 fik et SAS-fly til at afbryde en tur til Miami? Meteorolog Jesper Eriksen kommer med et bud.

30

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 8 Miljø-DNA kan revolutionere naturovervågningen
- 14 Vores forslugne galakse
- 20 Mindre luftforurening giver varmere klima
- 25 Hvordan skaber man viden?
- 30 Kraftig turbulens på flyveturen – en oplevelse for livet!
- 34 Hovedpinepiller – en hovedpine for miljøet?
- 38 Hjalte gik efter sin interesse for matematik
- 40 BAGSIDEN: Dåbshandlinger i laboratoriet

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.

Abonnementsservice:

Tlf.: 3036 0662 eller abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Udgiver

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

Postadresse:

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

Layout: Jørgen Dahlgaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

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

Opplag: 3.800

Forsidefoto:

Mælkevejen, Illustration: ESA/Gaia/DPAC,
Stefan Payne-Wardenaar/ CC BY-SA 3.0 IO



DET NATURVIDENSKABELIGE
FAKULTET



Roskilde Universitet

SPONSOR-
ABONNENT



Da Universet blev gennemsigtigt

De første stjerner og galakser kondenserede ud fra kolossale gasskyer nogle få hundrede millioner år efter Big Bang. Præcis hvornår det skete, forskes der intenst i, men indtil videre har astronomer opdaget galakser helt tilbage til mindre end 300 millioner år efter Big Bang.

En af grundene til, at det er så svært at dekttere de første galakser, er netop den gas de dannes af. Nydannede galakser skinner klarest i det energirige ultraviolette lys (UV). Men i løbet af omtrent den første halve milliard år, blev UV-lys meget effektivt absorberet af den gas, der omsluttede galakserne og lå mellem dem, fordi denne gas var neutral. Dermed kunne kun det svagere, mindre energirige lys slippe gennem tågen af gas. Derfor er det i dag udfordrende at observere de første galakser, fordi de simpelthen er usynlige i de korte UV-bølgelængder.

UV-strålingen fra de første lyskilder transformerede imidlertid langsomt Universet, fordi de neutrale atomer blev splittet ad af UV-lyset.



På billedet ses galaksen GS-z13-1 som en rød prik i midten af billedet. Foto: ESA/Webb, NASA, STScI, CSA, JADES Collaboration.

Dermed blev Universet "gennemsigtigt". Denne proces kalder man "reioniserings-epoken", og indtil for nylig har konsensus været, at reioniseringen begyndte, da Universet var omkring en halv milliard år gammelt. Men nu viser et nyt internationalt studium ledet af astronomer ved Cosmic Dawn Center (DAWN), at reioniseringen begyndte tidligere end antaget.

Postdoc Joris Witstok og affilieret professor Peter Jakobsen har sammen med internationale kolleger brugt James Webb Teleskopet til at undersøge en af de fjerneste – og dermed ældste – galakser i Universet kaldet JADES-GS-z13-1. Forskerne har opdaget, at denne galakse udsender såkaldt Lyman-alfa-lys, der er UV-lys ved en særlig bølgelængde. Unge galakser skinner allerklarest ved netop denne type lys, der stammer fra hydrogen. Men på grund af dets korte UV-bølgelængde absorberes det let af det omgivende medium, og derfor har forskere hidtil ikke set denne type lys fra galakser fra dengang. Universet var mindre end en halv milliard år gammelt.

Den nye opdagelse viser, at der var dannet en boble af ioniseret gas omkring denne galakse, for ellers kunne Lyman-alfa-lyset ikke være undsluppet. Og dermed tyder det på, at reioniserings-epoken allerede var begyndt et par hundrede millioner tidligere end hidtil antaget.

CRK, Kilde: Niels Bohr Institutet/
Nature vol. 639, pp 897–9

Supertilpassede alger på indlandsisen

Foråret kommer tidligere og tidligere til Grønland på grund af klimaforandringerne, og det gør det muligt for alger at kolonisere større og større områder af isen. Algerne på isen indeholder brunt pigment, som farver isen mørk og får isen til at smelte hurtigere, da dens evne til at reflektere solen forringes.

Problemet har været kendt af polarforskere i et stykke tid. Men indtil nu har de troet, at algerne havde begrænsede muligheder for at kolonisere isen på grund af manglen på næringsstoffer. Nye resultater offentliggjort i *Nature Communications* viser, at algerne er i stand til at leve af meget få næringsstoffer – og at de er i stand til at lagre næringsstoffer. Det gør det muligt for algerne at kolonisere en større del af indlandsisen, end man tidligere troede. Det er Laura Halbach, som for nylig fik sin ph.d.-grad fra Institut for Miljøvidenskab ved Aarhus Universitet, der sammen med sit forskerteam står bag opdagelsen. Hun er nu postdoc ved Max Planck Institutet i Bremen.



De mørke plamager på Indlandsisen er alger, som blomstrer op om foråret, når det øverste lag af sne smelter. Nederst i billedet ses forskeren Laura Halbach.

De mørkefarvede områder på isen består i virkeligheden af et helt økosystem af mikroorganismer, som udover forskellige alger omfatter bakterier, svampe og endda virus. De mange andre organismer har gjort det svært at lave specifikke undersøgelser af isalgerne. Indtil nu har forskerne kun været i stand til at manipulere og teste hypoteser på alle mikroorganismerne på én gang. I det nye studium brugte Laura Halbach og

kolleger nye metoder, hvor de ved hjælp af et såkaldt sekundær-ion-massespektrometer meget præcist kunne måle optaget af mærkede næringsstoffer i enkelte algeceller. Dataene viste, at algerne er meget effektive til at optage de sparsomme næringsstoffer på isen, og at de desuden har evnen til at lagre fosfor, som spiller en afgørende rolle for deres stofskifte.

Idet isalgerne er i stand til at lagre fosfor, kan de potentielt kolonisere områder af isen med meget begrænsede mængder fosfor. Det betyder, at algerne, og dermed den mørke is, muligvis vil brede sig til større områder, end man tidligere troede var muligt. Den nye viden om algernes næringsbehov kan hjælpe forskerne til at blive bedre til at forudsige algernes påvirkning af afsmeltningen af den grønlandske indlandsis i fremtiden.

Jeppe Kyhne Knudsen, Technical Sciences, AU
Kilde: Halbach, L. et al. *Nat. Commun.* 16, 1521 (2025). doi.org/10.1038/s41467-025-56664-6

Havbund sladrer om plastikforurening i Grønland

Ved at bore kerneprøver fra havbunden, i stil med de iskerneboringer, glaciologer anvender, har forskere fra Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet sammen med kolleger fra Institut for Økoscience ved Aarhus Universitet, opnået den første historiske optegnelse af plastikforurening på Grønlands havbund.

Undersøgelsen viser en øget ophobning af mikroplast på havbunden siden 1950'erne med betydelige udsving. Mens særlige miljøforhold som frostvejr og gletsjerafstrømning kan spille en rolle, så stemmer sådanne stigninger og fald i plastikakkumulering interessant nok også overens med den historiske socioøkonomiske udvikling i Grønland.

Den fremherskende opfattelse har været, at størstedelen af plastikken kommer til Arktis via havstrømme. Men forskernes data viser at byggeprojekter og andre socioøkonomiske begivenheder, der fandt sted lokalt i Grønland under landets modernisering, falder sammen med store stigninger i mængden af plastik, der ophobes på havbunden.

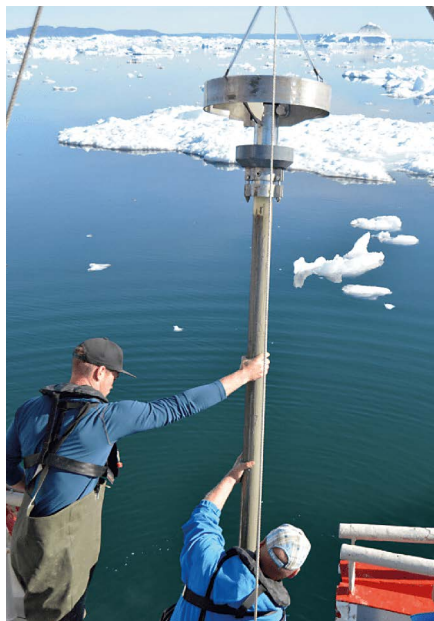


Foto: Karla Parga Martinez

Forskerne har udviklet forfinede metoder til udtagning af kerner i havets sediment og til at identificere plast ud fra deres polymer-sammensætning ved at analysere prøvernes samlede indhold. Ved at jage et rør (som det på billedet) ned i havbunden på 850 meters dybde i Diskobugten ud for Grønlands

vestkyst kunne forskerne hente kerner af havbunden op til analyse. Prøverne blev dateret ved hjælp af isotoper af naturligt bly og cæsiumisotoper dannet som følge af atombombesprængninger i atmosfæren i 1960'erne, som har en halveringstid på cirka 30 år.

Ved at skære kernerne op i, hvad der svarer til relativt korte tidsperioder, og isolere mikroplasten fra havbundens bestanddele (sand, ler, organisk affald osv.), kunne de derefter sammenligne plastikkens kemiske sammensætning med et bibliotek af kendt plastik fra forskellige aldre. Til sidst kunne forskerne opbygge en oversigt tilbage i tiden ved at matche mikroplasttypen med alderen på det havbundssediment, som den blev udvundet fra.

Ifølge forskerne kan sådanne metodiske forbedringer ende med at spille en større rolle i vores forståelse af plastikforurening i verdenshavene, fordi de kan anvendes mange andre steder i verden, og give solide, mere ensartede globale data.

Kilde: Science.ku.dk / Commun Earth Environ 5, 584 (2024).

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

Nye undervisningsmaterialer

Undervisningsmateriale om mineralforekomster

Find materialet på aktuelnaturvidenskab.dk under punktet undervisningsmateriale.

Materialet tager udgangspunkt i artiklen Geologiske mineralforekomster og den grønne omstilling" fra Aktuel Naturvidenskab nr. 4-2024. Artiklen handler om de geologiske processer, der skaber økonomisk interessante mineralforekomster.

Artiklen har et højt fagligt niveau, så derfor virker den mest egnet til Naturgeografi B-niveau, men som inspirationsmateriale eller til en dygtig naturvidenskabelig klasse kan den måske også bruges på C-niveau – for eksempel til et forløb omkring råstoffer, vulkanisme eller grøn omstilling.

Samlet består materialet af tre øvelser:

En konkurrence, hvor klassen parvist dyster om at svare på spørgsmål baseret på artiklen. Figuranalyse, hvor eleverne i mindre grupper skal analysere nogle af figurerne fra artiklen mere i dybden. På den måde træner de til eksamen, de kobler til det overordnede emne (eksempelvis vulkaner) + de perspektiverer til andre problemstillinger.

Undersøgelse af nogle af de problemstillinger, som knytter sig til et af artiklens overordnede temaer; den grønne omstilling. Eleverne får hjælp til, hvor de skal søge, og samtidigt får de også lov til at komme med deres egen holdning.

Materialet er udarbejdet af projektgruppen på Viborg Katedralskole for Aktuel Naturvidenskab

Lattergas dannes også uden mikroorganismer

Af Birgitte Svennevig, journalist, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk universitet

Lattergas er cirka 300 gange mere potent drivhusgas end CO_2 , og koncentrationen af den i atmosfæren er stigende. Forskerne ved, at udledningen i høj grad er menneskeskabt, og derfor interesserer de sig for at finde ud af, om man kan mindske dannelsen.

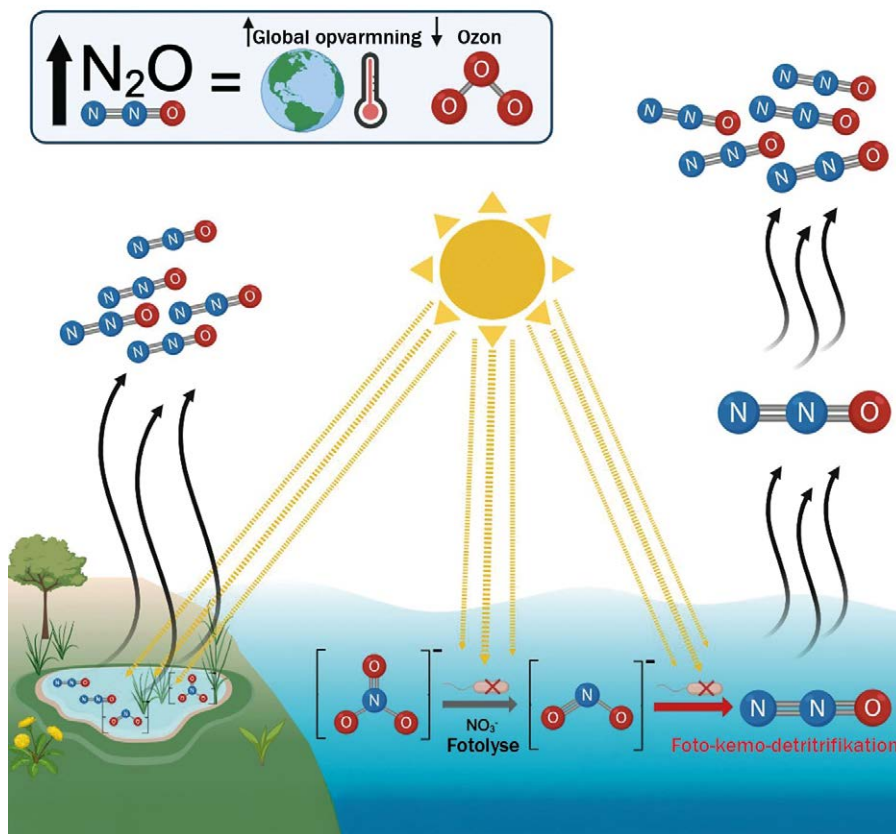
På den baggrund kan det forekomme nedslående, at forskere i tidsskriftet *Science* nu fortæller, at de har opdaget en hidtil ukendt mekanisme, der fører til dannelsen af lattergas. Men faktisk kan det betragtes som en god nyhed, mener en af forskerne bag studiet, professor og mikrobiolog Bo Thamdrup, for det giver os mulighed for bedre at styre vores menneskeskabte dannelse af lattergas. Bag studiet står mikrobiologer fra Syddansk Universitet og Universidad de Granada i Spanien.

Ifølge lærebøgerne dannes lattergas (nitrogenoxid eller N_2O) af mikroorganismer (bakterier og arkæer), når de omsætter nitrogen. Men det nye studie viser, at lattergas også kan dannes abiotisk – altså uden medvirken af mikroorganismer.

»Det er spændende at opdage en helt ny proces, der medvirker til dannelsen af lattergas i vandmiljøet. Vi kender i forvejen flere mikrobielle processer, og denne opdagelse tilføjer nu yderligere kompleksitet til et i forvejen lidt indviklet emne,« siger professor og mikrobiolog Bo Thamdrup, der i sin forskning arbejder med at kortlægge de komplekse mikrobiologiske mekanismer, der fører til dannelsen af lattergas.

Den nyopdagede kemiske mekanisme drives af sollys i nærvær af uorganisk nitrogen, og forskerne kalder den for "foto-kemo-denitrifikation".

Ifølge studiets førsteforfatter, Elizabeth Leon-Palmero, kan der genereres betydelige mængder lattergas til atmosfæren på denne måde. Hun peger på, at der er behov for at blive bedre til at identificere kilderne til dannelsen af lattergas, fordi udledningen til atmosfæren bare stiger og stiger.



Figuren illustrerer, hvordan sollys driver dannelsen af lattergas (N_2O) i både ferskvand og saltvand uden medvirken af mikroorganismer. Øverst er illustreret, at udledning af lattergas øger den globale opvarmning og desuden nedbryder ozonlaget. Illustration: Elizabeth Leon Palmero/BioRender

Bo Thamdrup er enig: »For at forudsige, hvordan atmosfærens indhold af lattergas vil udvikle sig i fremtiden og forstå, hvordan vi eventuelt kan mindske dannelsen af denne stærke drivhusgas, er vi nødt til at kende kilderne. Den nyopdagede proces kan være en vigtig, men overset kilde. Opdagelsen vil føre til mere præcise forudsigelser, og det kan hjælpe os til bedre forvaltning af vandmiljøet, og hvordan vi bruger kvælstof.«

Forskerne foretog eksperimenter i to ferskvandsreservoirer i det sydøstlige Spanien og i Østersøen. De observerede en konsekvent og betydelig stigning i lattergas-koncentrationer, som var korreleret med den mængde sollys, der blev modtaget under eksperimenterne. Nærmere analyser viste, at sollys

fremmer den abiotiske omdannelse af nitrit til lattergas. Produktionen af lattergas ved denne proces er størst ved vandoverfladen og aftager med dybden, da sollys mindskes med dybden.

Forskerne fandt, at foto-kemo-denitrifikation danner mere lattergas i overfladevandet end biologiske processer gør. Derfor kan denne proces bidrage væsentligt til globale lattergas-udledninger fra overfladen af både ferske vandmiljøer og have, især i regioner med højere tilgængelighed af uorganisk nitrogen og mere solskin – for eksempel i næringsrige vandmiljøer som fjorde, langs kyster og i tropiske regioner.

Videnskabelig artikel: *Science*, Vol 387, Iss. 6739 pp. 1198-1203

EFTERUDDANNELSE PÅ INSTITUT FOR BIOLOGI

Hvad siger du til ny inspiration til undervisningen?

Institut for Biologi tilbyder korte, praksisnære efteruddannelseskurser til dig, der underviser i naturvidenskabelige fag på gymnasieniveau.

På bare én til fem dage får du ny faglig viden, konkrete metoder og hands-on erfaring, du kan tage direkte med hjem og bruge i din undervisning.

KURSER I 2025

- | |
|---|
| Havet som økosystem (3 dage) |
| Dyreforsøgskundskab (3 dage) |
| Fysiologi – læren om hvordan kroppen fungerer (5 dage) |
| Bananfluers genetik i praksis (2 dage) |
| Skræddersyede kurser – få et uforpligtende tilbud til din skole |



INSTITUT FOR BIOLOGI
AARHUS UNIVERSITET



Scan koden og tilmeld dig
bio.au.dk/uddannelse/efteruddannelse

Før i tiden måtte Philip Francis Thomsen (på billedet) trække i waders, hvis han ville kortlægge dyrelivet i en sø. I dag kan han nøjes med en lille vandprøve.

Foto: Lars L. Iversen.



Forfatter
Kristian Sjøgren,
videnskabsjournalist.
ksjoegren@gmail.com

Om forskeren



Philip Francis Thomsen er lektor ved Institut for Biologi på Aarhus Universitet. Han arbejder med udvikling og anvendelse af miljø-DNA til både grundforskningsmæssige og anvendte spørgsmål indenfor økologi og forvaltning af natur og biodiversitet. Han er modtager af flere prestigefulde forskningsbevillinger, senest DFF Sapere Aude. pftthomsen@bio.au.dk

MILJØ-DNA KAN REVOLUTIONERE NATUROVERVÅGNINGEN

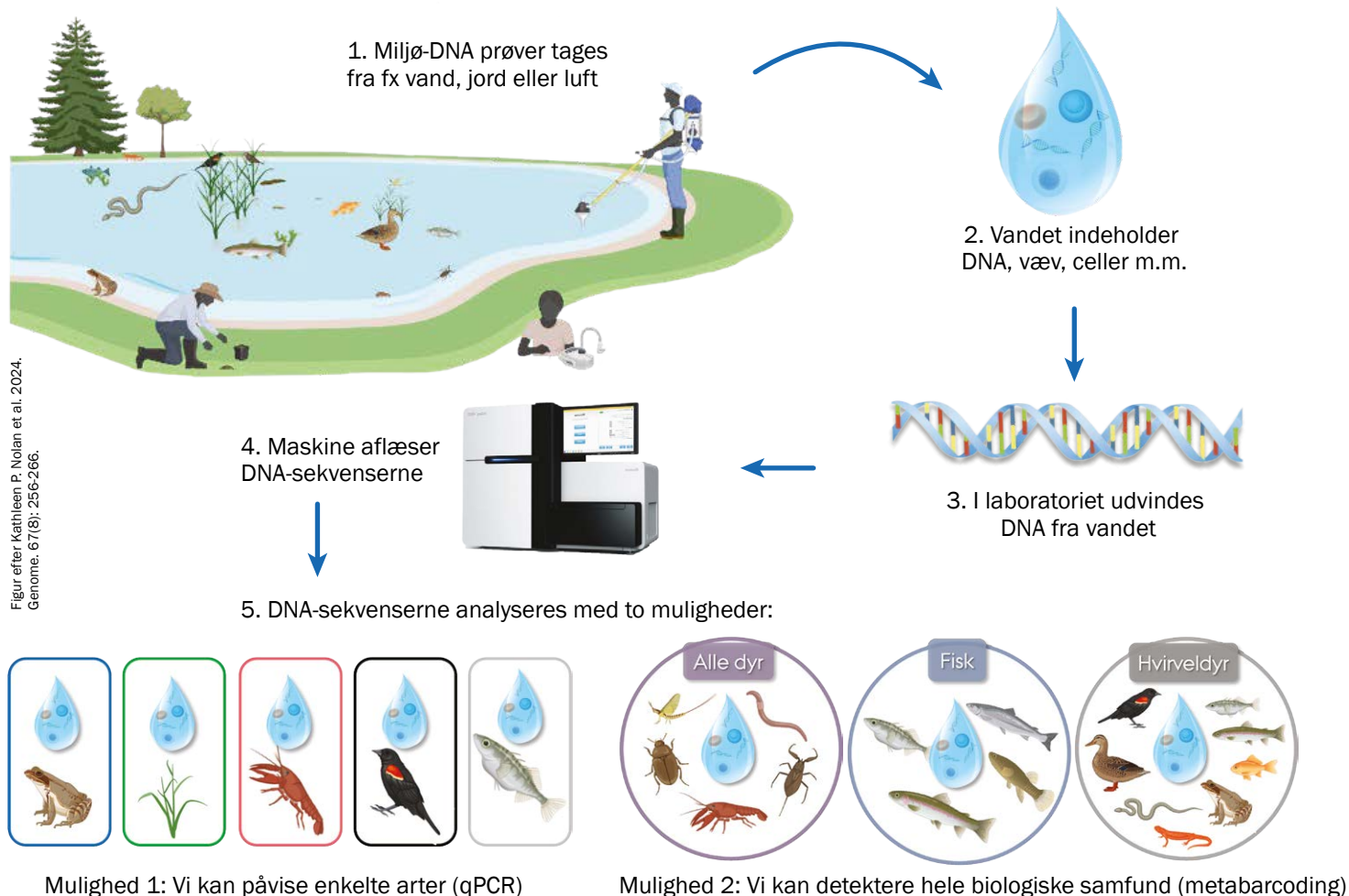
Gennem de seneste to årtier har forskere revolutioneret mulighederne for naturovervågningen gennem analyser af miljø-DNA. Danske forskere har været pionerer på de metoder, der benyttes til at analysere DNA i naturen. Og de metoder tillader dem både at overvåge nutidens natur samt studere verden, som den så ud engang for mange tusinder af år siden.

Allerede i 1980'erne opdagede forskere, at analyser af DNA i en miljøprøve kunne afsløre mange flere mikroorganismer end den traditionelle metode, hvor man først skulle kultivere bakterier på agarplader for at finde ud af, hvad der var i prøven. DNA-analyserne viste også mange typer af bakterier, som man ikke havde set før.

Disse første analyser af DNA i jordprøver var startskuddet til det, der i dag kendes som analyser af miljø-DNA (også kaldet eDNA = environmental DNA). Det er et forskningsfelt, man ikke kan omtale uden samtidig at nævne Danmark, idet danske forskere har været pionerer indenfor området og udviklet mange af de metoder, der i dag benyttes til blandt andet

at overvåge fiskebestande i alverdens have og undersøge, hvad der levede på Jorden for tusinder af år siden.

En af de forskere, som har været med et godt stykke af vejen, er lektor Philip Francis Thomsen fra Institut for Biologi ved Aarhus Universitet, og han fortæller, hvordan det hele startede.



»Efter de første fund af DNA i miljøprøver gik der nogle år, hvor der ikke skete så meget udvikling indenfor feltet, men i 2003 begyndte det virkelig at tage fart, da Eske Willerslev fra Center for Geogenetik ved Københavns Universitet gik ind i feltet og begyndte at undersøge, hvad det rent faktisk var muligt at sige ud fra prøver af is og permafrost,« forklarer Philip Francis Thomsen.

Philip Francis Thomsen var selv ph.d.-studerende under Eske Willerslev og har som sådan været med næsten helt fra begyndelsen.

Kortlagde faunaen i Sibirien for titusinder af år siden

Det var tilbage i 2003, at Eske Willerslev med sin forskningsgruppe fik verdens øjne op for, hvad det er muligt at udtale sig om med en lille klump jord eller en vandprøve. Forskerne lavede dengang et banebrydende forsøg, der blev omtalt i hele verden og viste, at det ud fra en lille sedimentprøve fra den sibir-

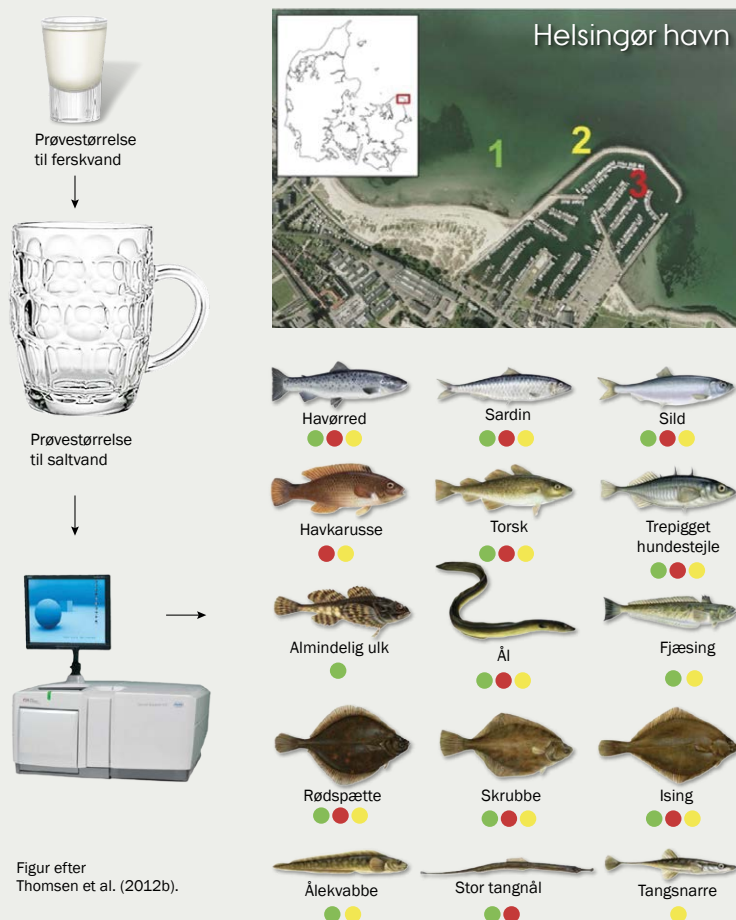
Forskellige teknikker til at analysere miljø-DNA

Analysen af miljø-DNA kan udføres på forskellige måder afhængigt af formålet med analysen. Den grundlæggende forskel ligger i, om man ønsker at identificere specifikke arter eller opnå en bred indsigt i alt DNA i en given prøve.

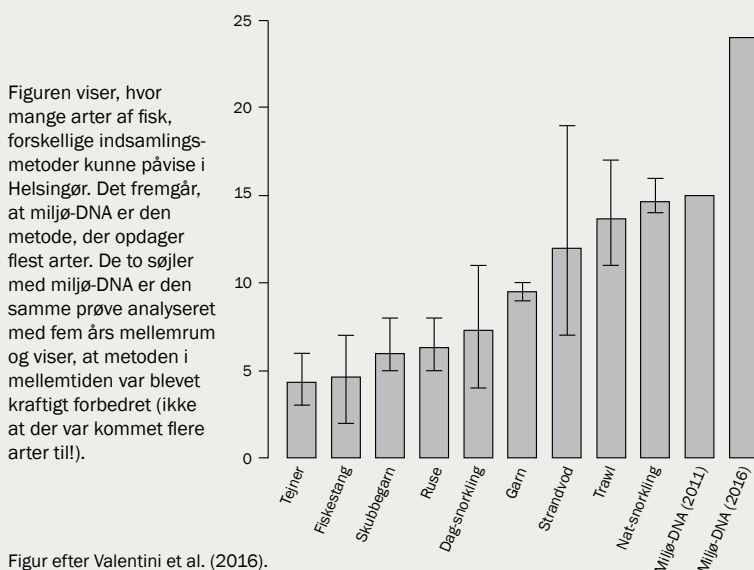
Skal man lede efter specifikke arter, benytter forskere målrettede metoder såsom PCR (Polymerase Chain Reaction). Ved PCR mangfoldiggøres DNA-sekvenser, der er unikke for den ønskede art, og det sker ved hjælp af specifikke "primere", der binder til DNA'et. Denne metode er særdeles følsom og gør det muligt at identificere selv små mængder DNA fra den art, som man undersøger en prøve for tilstedeværelsen i. Metoden er især nyttigt, hvis man har en idé om, hvilke arter man leder efter, eller når prøven indeholder mange forskellige DNA-fragmenter, som kan skabe "støj". En variant af denne metode er qPCR, som både kan kvantificere DNA'et og verificere dets tilstedeværelse.

Ved brede analyser af DNA i en prøve anvender forskere i stedet metabarkodning eller shotgun-sekventering. Metabarkodning bruger universelle primere til at mangfoldiggøre DNA fra en lang række organismer i prøven. Herefter bestemmer forskerne rækkefølgen (sekvensen) af DNA-byggesten i de mangfoldiggjorte DNA-fragmenter og bestemmer deres oprindelse ved at matche dem mod enorme databaser med DNA-sekvenser fra alle tænkelige organismer, der nogensinde er blevet bestemt. Shotgun-sekventering går skridtet videre og sekventerer alt DNA i prøven uden en forudgående proces, hvor DNA'et mangfoldiggøres. Denne metode giver en bred og detaljeret indsigt i den samlede biodiversitet, men kræver store mængder data og ressourcer at analysere. Valget af metode afhænger således af målet med analysen, prøvens kvalitet og de tekniske ressourcer til rådighed.

Miljø-DNA i havvand



Mens man til undersøgelser af miljø-DNA i en sø kan klare sig med prøvestørrelser svarende til et snapseglass, skal der større mængder til – svarende til et ølglass – i saltvand for at få DNA nok. Figuren viser, hvordan Philip Francis Thomsen og kolleger ved at tage prøver tre forskellige steder omkring Helsingør havn kunne finde DNA fra mange af de almindelige fisk, man umiddelbart ville forvente at finde. En overraskelse var tilstedeværelsen af DNA fra sardin – men det var blot et forvarsel om, at denne fisk faktisk allerede var ved at etablere sig i Danmark.



ske permafrost var muligt at genfinde DNA fra mange af de dyr, som levede i Sibirien for titusinder af år siden. DNA i naturen stammer fra hud, hår eller andre celler, som dyr hele tiden afgiver til omgivelserne. Det gør vi mennesker for den sags skyld også. DNA'et vedbliver dog ikke med at være i naturen, men nedbrydes over tid, og den proces er meget afhængig af temperatur. Netop i permafrosten blev DNA'et bevaret i tusinder af år, og forskerne kunne derfor finde DNA fra mammuter, bisoner, lemminger, planter og meget mere. Det var med andre ord muligt at genskabe et billede af floraen og faunaen, som det alt sammen så ud i en meget fjern fortid. Miljø-DNA gav på den måde en indsigt, som det ville have taget forskere årtier at komme frem til, hvis de skulle have analyseret knoglestumper og frosne frø og nødder.

»Det var chokerende, så meget man kunne se ud fra analyser af jordprøver. Det var virkelig der, at der blev skabt en helt ny æra indenfor miljøbiologi, hvor mange fik øjnene op for, hvad det egentlig er muligt at gøre med denne type analyser af alt DNA i en prøve,« forklarer Philip Francis Thomsen.

Nye metoder revolutionerede naturovervågning

Der gik ikke mange år fra det danske gennembrud, før forskere over hele verden begyndte at tage teknologien til sig og lave deres egne forsøg. Blandt andet benyttede franske forskere miljø-DNA til at lede efter invasive amerikanske oksefrøer i franske søer. De franske forskere viste med deres studie, at miljø-DNA ikke bare er relevant i undersøgelser af fortidens DNA, men at det også kan være meget relevant i undersøgelser af nutidens økologi. Med det franske studie kunne forskerne pege på, hvilke franske søer der viste tilstedeværelse af de invasive oksefrøer, og hvilke der indtil da var gået fri.

Philip Francis Thomsen blev ansat som ph.d.-studerende ved Center for Geogenetik under Eske Willerslev kort efter, at det franske resultat var publiceret, og i sin ph.d.-afhandling bragte

Philip og hans kollegaer de teknikker, som forskerne benyttede i deres analyser, skridtet videre.

Indtil da havde forskere undersøgt miljøprøver for specifikt DNA i prøverne. Det vil sige, at de i deres undersøgelser måske ville kigge efter oksefrøer og så lede specifikt efter oksefrø-DNA i prøverne. I Philip Francis Thomsens ph.d.-afhandling forsøgte forskerne dog noget helt nyt, og det var at tjekke for alle arter samtidig. Det lader sig gøre med teknikker som metabarkodning og shotgun-sekventering (se faktaboks). Det vigtigste er at forstå, at det med de nye teknikker ikke er nødvendigt at vide, hvad man leder efter i prøverne. Man kan bare lede.

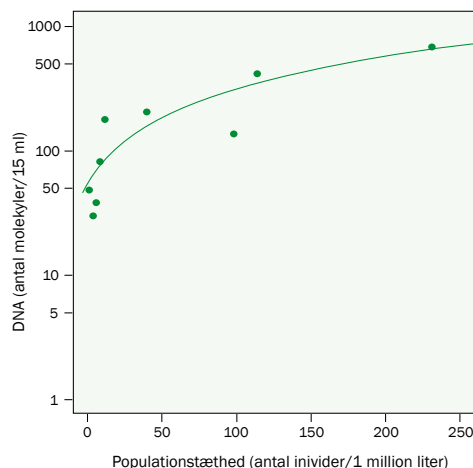
I sine forsøg viste Philip Francis Thomsen blandt andet, at det er muligt at kortlægge alle padder og fisk i en hel sø blot ved at analysere nogle vandprøver fra søen. Så kunne forskerne sige, om der var gedder, aborrer eller forskellige arter af frøer i søen. Forskerne gjorde det samme med vandprøver fra havet omkring Helsingør, hvor de kunne identificere tilstedeværelsen af blandt andet sild, torsk, rødspætte og skrubbe. I et andet studie fra Danmark viste forskerne, at de også kunne finde DNA fra marsvin i prøverne, og at der derfor havde været marsvin i havområdet på et tidspunkt forinden. Forskerne lavede også et lignende forsøg i dybhavet ud for Grønland og kunne vise, at det DNA, som forskerne identificerede i vandprøverne fra dybt nede i havet, matchede det, som fiskerne hev op med deres trawl.

»Det var her, at det virkelig blev klart, hvordan man kunne bruge analyser af miljø-DNA i miljøovervågning. Da jeg startede på min ph.d., var vi nok omkring fem forskningsgrupper i verden, der arbejdede med miljø-DNA, og i dag er der mange hundrede grupper. Det vidner noget om, hvor store perspektiver folk ser i teknologien,« siger Philip Francis Thomsen.

Mængden af DNA matcher antallet af dyr

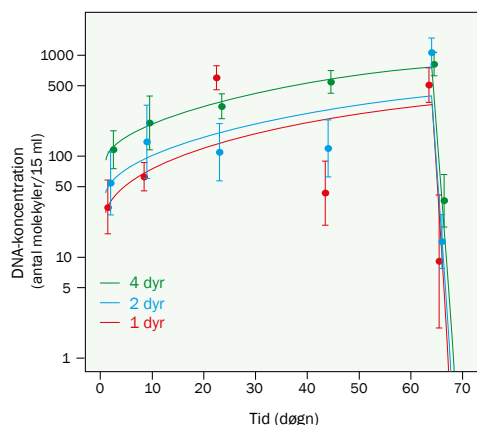
Det næste store fremskridt indenfor forskningen var påvisningen af, at det ikke kun er muligt at identificere arter ud fra miljø-DNA, men at det også er muligt at kvantificere dem. Philip Francis Thomsens forskning viste blandt andet, at der er en sammenhæng mellem mængden af DNA fra det enkelte dyr i en prøve og så det faktiske antal dyr i miljøet. Det viste forskerne blandt andet ved at analysere vandprøver fra søer med forskellige tætheder af padder og supplere disse prøver med kontrollerede akvarieforsøg med haletudser. Denne forskning viste også, i hvor lang tid DNA egentlig forbliver i vandmiljøet. Resultaterne viste, at DNA-signalet typisk forsvinder efter én til to uger efter, at dyrene er borte.

»Det viste, at hvis vi ser et signal fra et dyr i en vandprøve, har dyret været der indenfor relativ kort tid. Det var vigtigt at få slået fast, da mange troede,



Figur efter: Thomsen et al. (2012).

Kontrollerede forsøg med padder (her er vist resultater for padderarten løgfrø) viser, at der er en sammenhæng mellem mængden af DNA, man måler i en vandprøve, og hvor mange individer, der faktisk findes i det lokale vandhul, hvor prøven er taget.



Figur efter: Thomsen et al. (2012).

Her ses, at DNA forsvinder fra et akvarium med et kendt antal individer efter cirka to uger efter at dyrene er fjernet. Så når man måler DNA i miljøet, er det altså fra organismer, der har været i området indenfor de seneste cirka 14 dage (der er vist forsøg med henholdsvis 1, 2 og 4 individer i vandet).

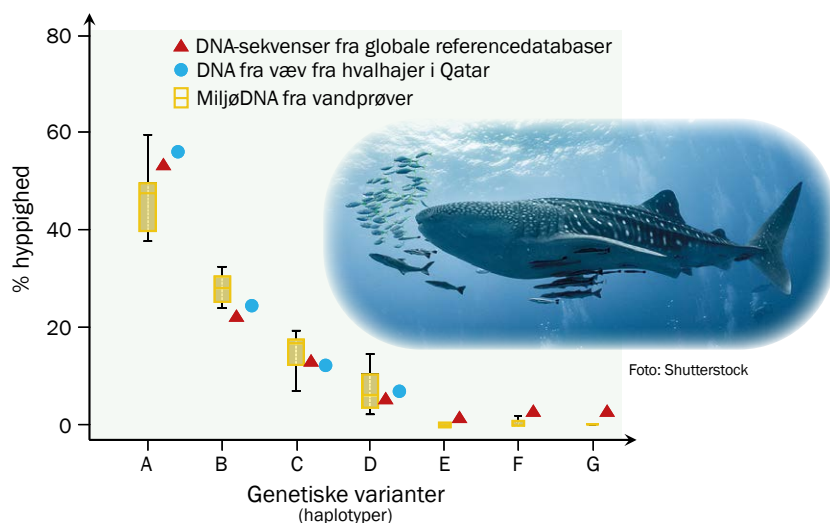
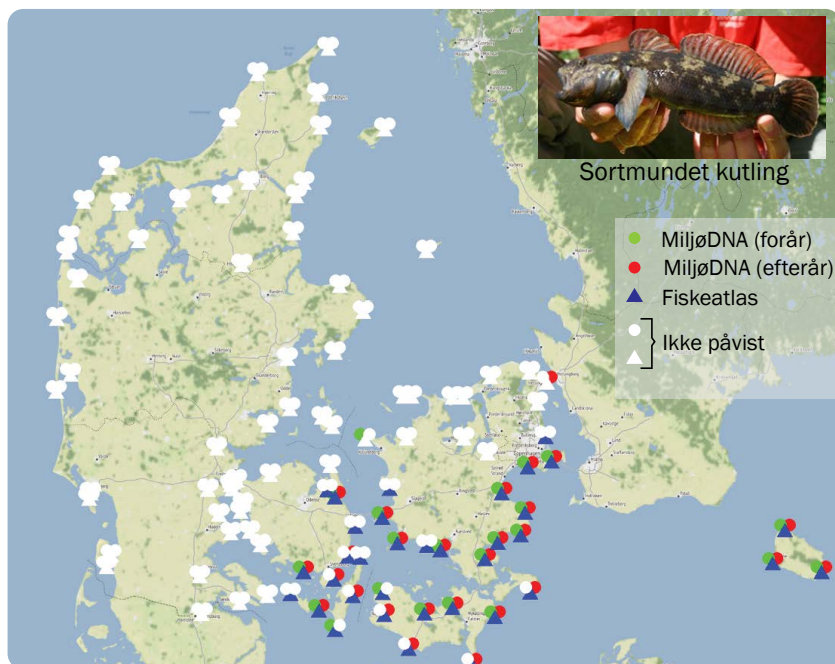


Foto: Shutterstock

Figuren viser fordelingen af genetiske varianter (haplotyper) af hvalhajer i tre forskellige typer af prøver, nemlig miljø-DNA fra havvandet ud for Qatar, vævsprøver fra hvalhajer i samme område samt data fra en global referencedatabase med DNA fra hvalhajer fra hele verden. Det fremgår, at fordelingen er meget ens. Figur efter Sigsgaard et al. 2016.



Figuren viser udbredelsen af den invasive fiskeart sortmundet kutling i Danmark. Den nyeste viden om artens udbredelse sammenfattes af det såkaldte Fiskeatlas og ved analyser af miljø-DNA. Indsamlingen af miljø-DNA-prøverne blev foretaget som en del af et Citizen Science-projekt (kaldet Havblitz), hvor 360 frivillige fra Danmarks Naturfredningsforening over hele landet tog prøver samme dag kl. 13. På den måde får man et øjebliksbillede af, hvilke fiskearter der på det tidspunkt befandt sig i de kystnære områder. Figur efter Agersnap et al. (2022).

at det DNA, som vi fandt, bare var blevet ophobet over tid og dermed ikke kunne sige noget om, hvad der lever i miljøet lige nu og her. Vi viste også, at vi ud fra mængden af DNA kan sige noget om antallet af dyr. Begge dele er meget relevante at vide ved naturovervågning, hvor man jo netop gerne vil kortlægge, om der er givne dyr i et område, og eventuelt hvor mange der er,« siger Philip Francis Thomsen.

Hvalhajer i Qatar

Efter han var færdig med sin ph.d. og var blevet ansat som postdoc, tog Philip Francis Thomsens forskning ham til Qatar, hvor han med sine kollegaer og samarbejdspartnere satte sig for at undersøge tilstedeværelsen af hvalhajer omkring nogle boreplatforme. Der var dog ingen tvivl om, at hvalhajerne var i miljøet. Det kunne man se med det blotte øje; det er trods alt verdens største fisk. I stedet var forskerne interesserede i, om de ud fra miljø-DNA ikke bare kunne identificere tilstedeværelsen af hvalhajerne, men oveni pege på, hvilke bestande det drejede sig om.

Hvalhajer, ligesom alle andre dyr, har ikke bare gener, der adskiller dem fra andre arter, men også genvariationer, der adskiller grupper af individer fra hinanden. Indenfor

biologien hedder det haplotyper. Forskerne havde til projektet adgang til vævsprøver fra hvalhajerne og kunne i dem se fordelingen af haplotyper hos de hvalhajer, der svømmede rundt omkring boreplatformene ved Qatar. Da de undersøgte miljø-DNA for de samme genetiske markører, fandt de den samme fordeling. Det viste, at forskerne med miljø-DNA ikke bare kunne vise, at der var hvalhajer i vandet, men også hvilken genetisk sammensætning denne population havde.

»Vi kan endnu ikke skelne de enkelte individer fra hinanden, men med undersøgelser af haplotyper fra vandprøverne er det muligt at sige noget om den genetiske variation, som findes i en population. Det gav nogle helt nye muligheder indenfor naturovervågning,« forklarer Philip Francis Thomsen.

Kortlægning af fisk ved kysterne i Danmark

I Qatar lavede forskerne også analyser af miljø-DNA fra koralrev, sandbanker, mangrover og alt muligt andet og viste derigennem, at det med miljø-DNA er muligt at overvåge et helt lands artsdiversitet af marine hvirveldyr som for eksempel fisk. Disse undersøgelser blev inspirationen til den forskning, som Philip Francis Thomsen kaste-

de sig over, da han kom tilbage til Danmark, hvor han også flyttede til Aarhus Universitet og startede sin egen forskningsgruppe. Den næste række af undersøgelser viste, at det ud fra over 100 vandprøver fra kystområder i Danmark var muligt at kortlægge store dele af kongerigets fisk. Fordi forskerne havde adgang til så mange prøver, var det muligt for dem at lave et digitalt Danmarkskort, hvor man kunne se fordelingen af alle de fisk, som lever i havet omkring os. Her identificerede forskerne DNA fra 52 kystnære fiskearter, hvilket er omkring 80 % af alle de kystnære fisk, der nogensinde er observeret i kystnære biotoper. Forskningen blev lavet i samarbejde med 360 frivillige fra Danmarks Naturfredningsforening.

Philip Francis Thomsen fortæller, at med kortlægningen er miljø-DNA blevet et uvurderligt redskab til overvågning af havmiljøet omkring Danmark. For eksempel viste analyserne af miljøprøverne meget tydeligt, hvor den sortmundede kutling lever i Danmark. Den sortmundede kutling er en invasiv art, og det er derfor også meget relevant hele tiden at følge dens udbredelse. Med analyserne viste forskerne, at på analysetidspunktet levede fisken kun i havet omkring Bornholm og omkring Sjælland, men endnu

ikke rundt om Jylland. Analyser af miljø-DNA kan over de kommende år vise, om udbredelsen ændrer sig, og om den sortmundede kutling kommer yderligere vestpå, eller om den holder sig til de områder, hvor den lever i dag.

»Rundt om i verden benytter mange lande miljø-DNA til at overvåge forskellige relevante arter. Det kan være invasive arter som den sortmundede kutling eller amerikansk oksefrø, eller det kan være truede dyrearter som for eksempel stor vandsalamander. Det betyder også, at der er blevet etableret mange firmaer, som har specialiseret sig i analyser af miljø-DNA, og som de udfører for myndigheder eller NGO'er,« siger Philip Francis Thomsen.

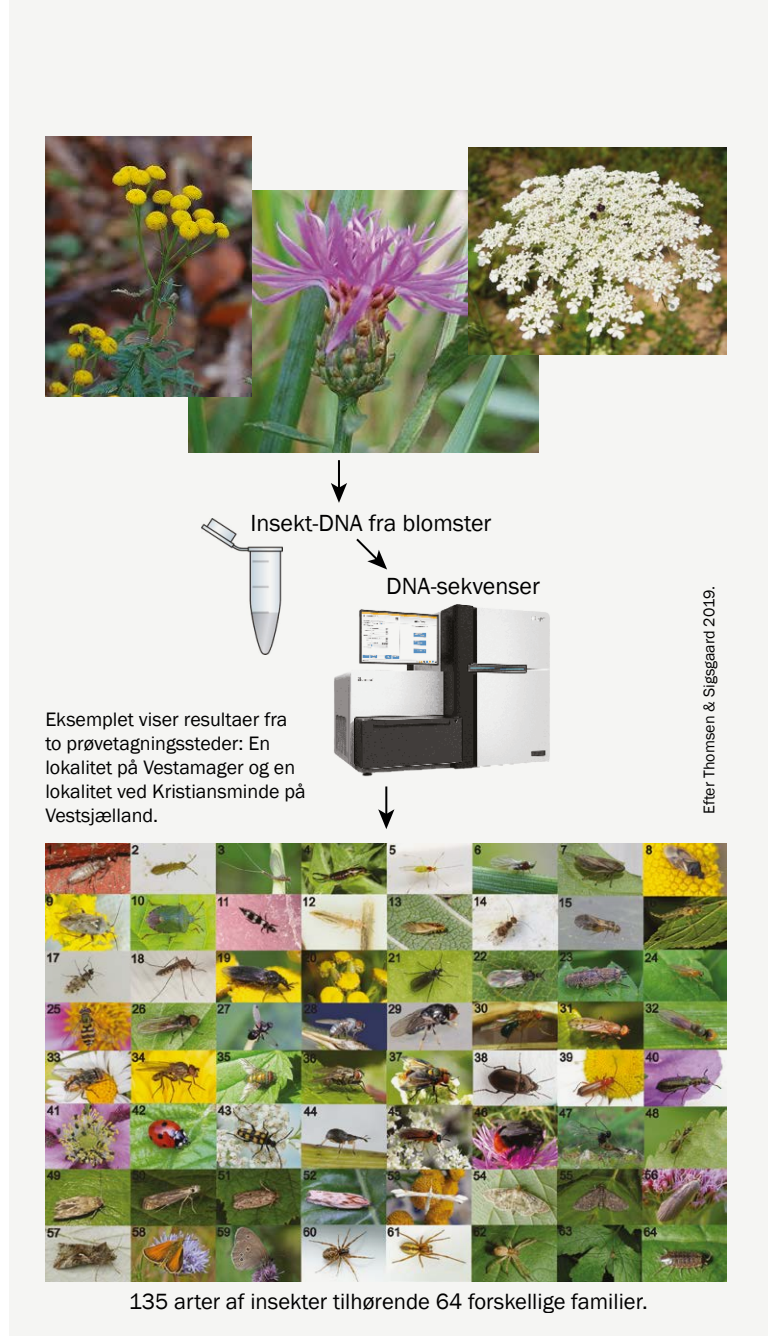
Forskeren advarer dog, at man ikke bør forkaste alle de måder, man hidtil har lavet naturovervågning på for at erstatte dem med analyser af miljø-DNA.

»Der kan være problemer i forhold til at skifte metode, fordi man derved bryder lange tidsserier med data op. Har man som eksempel indsamlet insekter og talt dem i 30 år, skal man blive ved med at gøre det, fordi det giver nogle helt unikke tidsserier, som man endnu ikke kan skabe med miljø-DNA, før metoden har været brugt i mange år. Netop tidsserier er noget af det vigtigste at have adgang til indenfor forskning i, hvordan det går naturen over tid,« siger Philip Francis Thomsen.

Analyserede DNA fra insekter på blomster

Netop når det kommer til insekterne, er de også i centrum i et af de seneste af Philip Francis Thomsens forskningsprojekter. I det projekt ønskede han at komme dybere ned i en af de store bekymringer for biodiversiteten lige nu og her, og det er den udbredte insektdød, som rapporteres fra mange studier i disse år.

I forskningsarbejdet indsamlede han derfor blomster og analyserede alt det DNA, som fandtes på blomsterne. Helt specifikt kiggede



han efter DNA fra insekter. Analyserne afslørede, hvor overvældende naturen nogle gange kan være, idet forskerne samlet set identificerede DNA fra intet mindre end 135 insektarter fra bier og biller til fluer og sommerfugle. Der var både bestøvere, rovinsekter og dem, der blot lever af at spise pollen. Der var også insekter, som lever af at lægge æg i andre insekter, for eksempel en art af snyltehveps, som parasiterer en art af bladlus. I nogle af prøverne fandt forskerne endda både DNA fra disse parasitiske insekter og den vært, som de lægger deres æg i. Miljø-DNA gav på den måde en indsigt i insekternes verden, som er meget svær at få på anden måde.

»Når vi taler om insekters tilbagegang, kan man tage en blomst og

så undersøge DNA for at se, hvilke insekter der har været på blomsten indenfor den seneste tid. Dette er vanskeligt at kortlægge ved at sidde og studere en blomst. For det første er det ikke praktisk muligt, og for det andet er det for mange af disse arters vedkommende svært at skelne dem fra hinanden med det blotte øje. Det kan man til gengæld let gøre ved at se på deres DNA,« siger Philip Francis Thomsen, der forudsiges, at de næste store skridt indenfor brugen af miljø-DNA kommer til at omhandle netop undersøgelser af prøver fra land fremfor vand.

»Det er et spørgsmål om tid, før det her også bliver lige så stort indenfor naturovervågning, som undersøgelser af vandprøver er det. Det er jeg overbevist om,« siger han. ■

Forskere kan bestemme hvilke insektarter, der har besøgt en blomst ved hjælp af miljø-DNA. Det giver en indsigt i insektverdenen, som er svær at opnå på anden måde. Det er også lettere at skelne insektarter fra hinanden ud fra deres DNA end ud fra fysiske kendetegn, hvilket ofte kræver ekspertviden.

Videre læsning:

Agersnap, S. et al (2022): A National Scale "BioBlitz" Using Citizen Science and eDNA Metabarcoding for Monitoring Coastal Marine Fish. *Front. Mar. Sci.* Vol 9.

Thomsen, P.F et al. (2012): Monitoring endangered freshwater biodiversity using environmental DNA. *Mol. Ecol.* 21(11):2565-73.

Thomsen, P.F et al. (2012): Detection of a Diverse Marine Fish Fauna Using Environmental DNA from Seawater Samples. *PLOS One* 7(8):e41732.

Thomsen, P.F & Sigsgaard, E.E. (2019): Environmental DNA metabarcoding of wild flowers reveals diverse communities of terrestrial arthropods. *Ecology & Evolution.* Vol., Iss. 4, 1665-1679.

Valentini, A., et al (2016): Next-generation monitoring of aquatic biodiversity using environmental DNA metabarcoding. *Mol. Ecol.* Feb;25(4):929-42.

Sigsgaard, E.E. et al (2016): Population characteristics of a large whale shark aggregation inferred from seawater environmental DNA. *Nature ecology & evolution.* Nov 21;1(1):4.



VORES FORSLUGNE GALAKSE

Rumteleskopet Gaia har kortlagt Mælkevejen og gjort astronomerne meget klogere på galaksens form og fortid. Nu ved vi, at Mælkevejen har opslugt adskillige mindre galakser i tidens løb, for Gaia har fundet stjerner, der ikke blev dannet på vores galaktiske hjemmebane.

Den 15. januar 2025 tog det europæiske rumteleskop Gaia de sidste billeder af stjernehimlen over os. Teleskopet havde til formål at kortlægge Mælkevejen, og man må sige, at missionen lykkedes.

Nu ved vi meget mere om den galakse, vi selv bor i. Astronomerne har fået et bedre kendskab til Mælkevejens form og struktur, og de kan spore, hvornår og hvordan galaksen har vokset sig større gennem kollisioner med andre galakser igennem milliarder af år.

»Gaia er en helt igennem fanta-

stisk mission, som vi har lært en masse af. Nu ved vi for eksempel, at Mælkevejens skive er bøjet, at spiralarmene ikke helt er, som vi regnede med,« fortæller Mia Sloth Lundkvist, der er adjunkt på Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet.

»Vi har også fundet ud af, at Mælkevejen ikke bare er en galakse, der engang er blevet dannet og så har udviklet sig isoleret. Den er lidt af en kannibal, der vokser sig større ved at spise mindre galakser.« fortsætter hun.

I det daglige beskæftiger hun sig mest med asteroseismologi, hvor

astronomerne undersøger stjernernes struktur ved at måle deres svingninger. Metoden kan bruges til at aldersbestemme stjerner, og det er uhyre nyttigt, når Mælkevejens historie skal skrives.

Gaia blev sendt op fra den europæiske rumhavn i Fransk Guyana 19. december 2013. Tre uger senere nåede rumteleskopet frem til sin destination godt halvanden million kilometer fra Jorden i retning væk fra Solen.

Efter nogle måneders test af udstyret startede den videnskabelige mission for alvor 24. juli 2014, og i mere end ti år har teleskopet kred-

Rumteleskopet Gaia har fundet positionen for en procent af Mælkevejens stjerner, så nu har astronomerne en god idé om, hvordan vores spiralgalakse må se ud fra oven.

Illustration: ESA/Gaia/DPAC, Stefan Payne-Wardenaar/ CC BY-SA 3.0 IGO

Forfatteren
Henrik Bendix er
videnskabsjournalist.
bendix@vidmere.dk

Artiklen har udgangspunkt i foredraget På tur i Mælkevejen igennem rum og tid, som Mia Sloth Lundkvist holdt sammen med professor Hans Kjeldsen i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab i april måned 25. Se mere på ofn.au.dk

set om Solen, mens det samtidig har roteret om sig selv og taget billeder af rummet.

Gaia har ikke bare filmet stjernerne på forskellige tidspunkter, men også fra lidt forskellige vinkler på sin vej rundt om Solen. På den måde kan afstanden til stjernerne nemlig beregnes, på samme måde som vi mennesker er i stand til at bedømme afstande, fordi vi ser genstande fra lidt forskellige vinkler med vores to øjne.

»Gaia har målt positioner på himlen helt ekstremt præcist. For stjerner, der er op til 4000 gange svagere end dem, man kan se med det blotte øje, måler Gaia så præcist som 24 mikrobuesekunder. Det svarer til at se bredden på et menneskehår på 1000 kilometers afstand,« siger Mia Sloth Lundkvist.

Et mikrobuesekund er en milliontedel af et buesekund, og der går 3600 buesekunder på en grad, så Gaia kan måle med en præcision på syv milliardtedele af en grad. Hvis teleskopet stod på Jorden og blev rettet mod Månen, kunne det registrere størrelsen af en astronauts tommelfingernegl.

Rumteleskopet nåede at foretage 3,2 billioner astronomiske målinger, og nu kender astronomerne den præcise position i tre dimensioner for halvanden milliard af Mælkevejens stjerner.

De informationer kan bruges til at skabe et 3D-kort over vores galakse. Den fjerde dimension kommer også i spil, fordi Gaia har affotograferet himlen igen og igen igennem 10 år, så astronomerne kan følge stjernernes bevægelser hen over himlen.

Målinger fra Gaia er indtil videre blevet brugt i 13.000 videnskabelige artikler, og der kommer mange flere. Teleskopet har produceret så enorme mængder data, at det tager adskillige år at bearbejde dem og gøre dem klar til brug for astronomerne. Det endelige katalog med

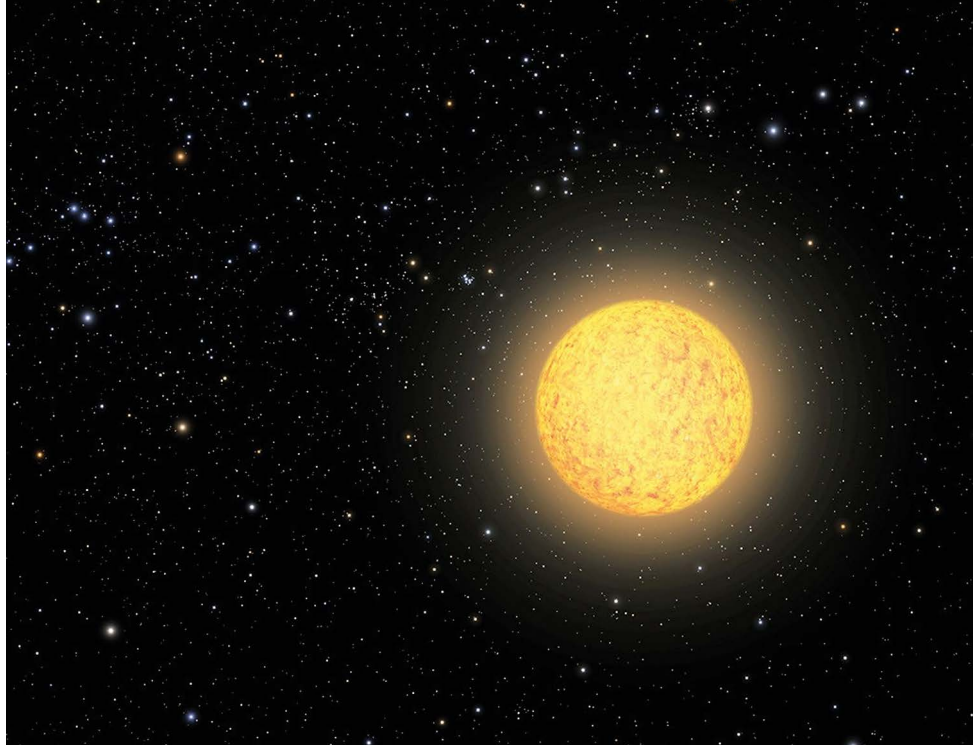


Illustration af Metusalem en af Mælkevejens ældste stjerner. Den er blot 200 lysår væk og lyser så klart, at den kan ses i en almindelig håndkikkert. Baggrundsfoto: DSS/STScI/AURA/Palomar/Caltech/UKSTU/AAO

Mia Sloth Lundkvist

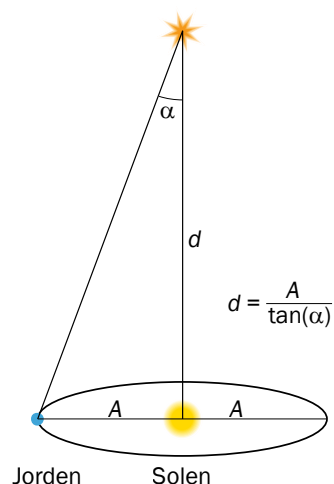
Mia Sloth Lundkvist er adjunkt i astrofysik ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Hun forsker og underviser i stjerner og exoplaneter. Især er hun interesseret i exoplaneter, som er lidt større, men meget varmere end vores egen Jord, da de bliver formet af processer, som vi ikke ser i vores eget Solsystem samt exoplaneter, som kredser om små stjerner. I sin forskning arbejder Mia med data fra både teleskoper på Jorden og rumteleskoper så som NASAs Kepler- og TESS-missioner. Hun er medlem af Instrumentcenter for Dansk Astrofysiks bestyrelse og er en af de to danske repræsentanter i Nordisk Optisk Teleskops Council. lundkvist@phys.au.dk



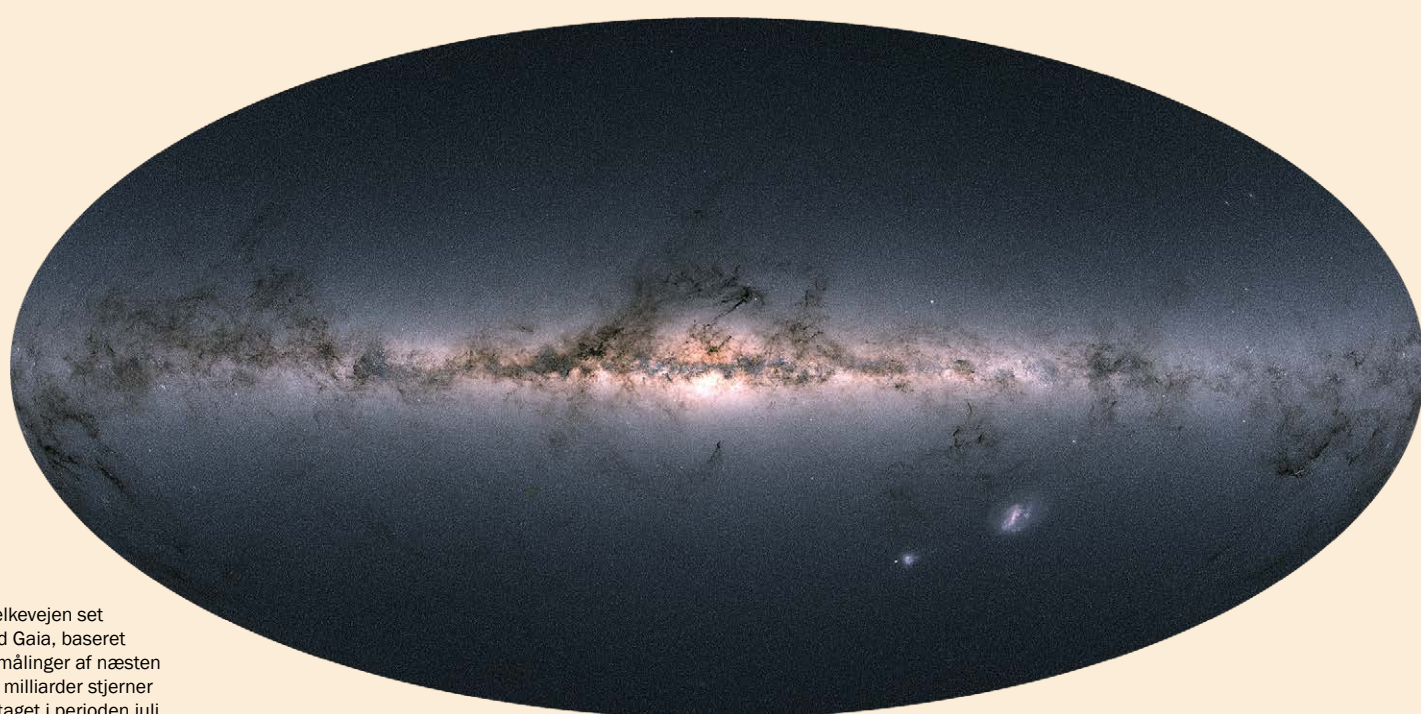
samtlige data bliver først frigivet i slutningen af 2030.

Metusalem er måske ældre end Mælkevejen

Når vi kigger ud på andre galakser, er det nemt at få øje på deres form og struktur. Det er straks sværere at kortlægge Mælkevejen, idet vi selv befinder os i den. Vi kan ikke bare sende en rumsonde ud og se det hele lidt fra oven. Men helt umuligt er det ikke, og siden 1950'erne har astronomerne observeret galaksen i mange forskellige bølgelængder, så vi efterhånden har en ret god idé om vores galaktiske hjem.



Ved at måle vinklen α til stjernen med et $\frac{1}{2}$ års mellemrum kan man bestemme afstanden d til stjernen. A er afstanden til Solen fra Jorden.



Mælkevejen set med Gaia, baseret på målinger af næsten 1,7 milliarder stjerner (optaget i perioden juli 2014 til maj 2016). Nederst i højre side ses de to Magellanske skyer.

Foto: ESA/Gaia/DPAC/
CC BY-SA 3.0 IGO

Stjerner sparkes ud af galaksen

Nogle få af de mange stjerner, som Gaia har målt på, skiller sig ud ved at have fuld fart på. De såkaldte hyperhastighedsstjerner farer afsted med hastigheder på mange hundrede kilometer i sekundet.

En del af dem har større hastigheder end de 500 km/s, der er undvigelseshastigheden for Mælkevejen. Det betyder, at de er på vej til at forlade galaksen for evigt.

Rekorden indehaves af den hvide dværg J027, som Gaia har målt til at have en hastighed på 2285 km/s eller godt otte millioner km/t. Den har sandsynligvis kredset rundt om en anden hvid dværg, der er eksploderet som en supernova og har givet sin makker et solidt spark. Mange andre hyperhastighedsstjerner menes at være blevet slynget ud fra galaksens centrum af

det supertunge sorte hul, der lurer derinde. Som del af dobbeltstjernesystemer er de kommet lidt for tæt på det sorte hul, der har en masse på 4,2 millioner solmasser.

Netop fordi Gaia-målingerne tillader astronomerne at skruer tiden tilbage, kan de se, hvor hurtige stjerner kommer fra. Nogle ser ud til at stamme fra andre galakser. I starten af 2025 blev der fundet ni, der lader til at komme fra dværggalaksen Den Store Magellanske Sky 163.000 lysår herfra.

Det må betyde, at Den Store Magellanske Sky også rummer et stort, sort hul, som ud fra de hurtige stjerners hastigheder kan beregnes til at have en masse svarende til 600.000 sole. Om cirka 2,4 milliarder år vil Mælkevejen i øvrigt opsluge dværggalaksen og dens sorte hul.

Indtil videre har data fra Gaia bekræftet, at vi bor i en mellemstor bjælke-spiralgalakse, altså en skiveformet galakse med spiralarme, der udgår fra en central "bjælke" af stjerner.

En langvarig debat om, hvorvidt Mælkevejen har to eller fire spiralarme, kan så småt lægges i graven, for Gaia giver et mere kompliceret og nuanceret billede af en galakse, hvor der kan tælles flere end fire tydelige arme. Der er også små arme, der stikker ud fra de store.

Vi bor i øvrigt i en af Mælkevejens fredelige forstæder, cirka 27.000 lysår fra centrum i en spiralarm kaldet Orion.

Mælkevejen rummer ikke bare de stjerner, som Gaia kan fange lyset fra, men også gas – primært hydrogen – som nye stjerner kan dannes af. Desuden er der en smule støv, der stammer fra udbrændte stjerner. Der er også mørkt stof, der ikke kan ses, men som står for størstedelen af Mælkevejens masse.

Vores galakse er ældgammel. Astronomerne mener, at den opstod få hundrede millioner år efter big bang for 13,8 milliarder år siden. De ældste stjerner i Mælkevejen er nemlig så gamle. Men helt så enkelt er det alligevel ikke, for det er svært at datere stjernerne, og nogle af dem har ikke været en del

af Mælkevejen fra starten, men er blevet adopteret senere.

Det kan Mia Sloth Lundkvist tale med om, for hun arbejder på en videnskabelig artikel om alderen på den gamle stjerne HD 140283, der har fået kælenavnet Metusalem.

Den befinder sig cirka 200 lysår fra Solsystemet i den del af Mælkevejen, der kaldes haloen – den sfære, der omgiver galaksens skive og centrale udbulning, og hvor der udover mørkt stof blot er lidt gas samt et beskedent antal stjerner og stjernehober.

Tilbage i 2013 vakte Metusalem en

del opsigt, fordi den dengang blev bedømt til at være 14,46 milliarder år gammel, altså en del ældre end universet – dog med stor usikkerhed. Astrofysikere som Mia Sloth Lundkvist forsøger at aldersbestemme stjernen med større præcision.

Grundstoffer og svingninger røber stjerners alder

Metusalem kom på astronomernes radar, fordi den har et meget lavt indhold af tunge grundstoffer. Det er et klart tegn på, at den er dannet tidligt i universets historie.

Ved big bang blev der kun dannet hydrogen, helium og en lille smule lithium, så alle tungere grundstoffer er kommet til siden. De er dannet af stjernerne og spredt ud i universet, når udbrændte stjerner eksploderer som supernovaer eller ved at neutronstjerner kolliderer.

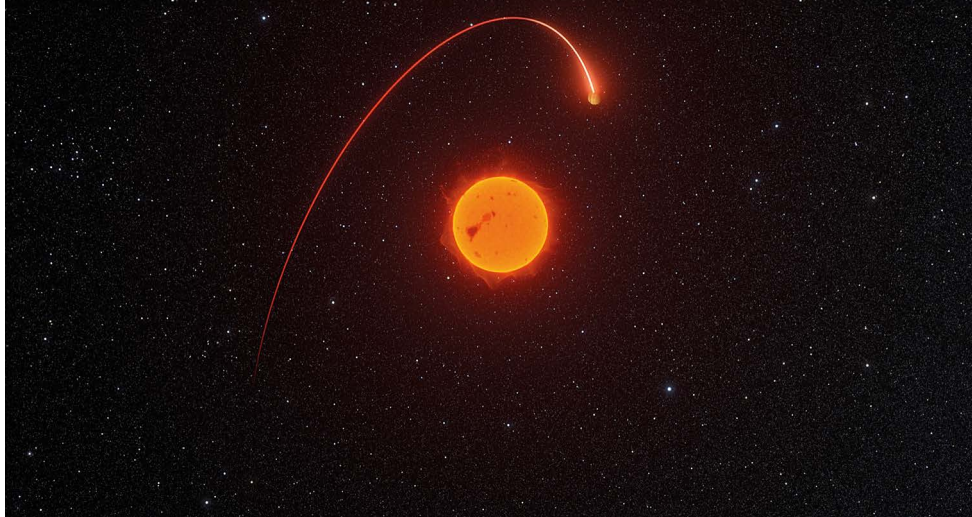
Stjernernes liv og død betyder, at universet stille og roligt bliver beriget med grundstoffer, der er tungere end helium – alle de grundstoffer, som astronomerne har fællesbetegnelsen metaller for.

Ved hjælp af spektroskopi, hvor stjernelyset deles op i de enkelte bølgelængder, kan mængden af forskellige grundstoffer måles. Hvert grundstof har nemlig sin egen unikke signatur i spektret, en slags kemisk fingeraftryk.

Hvis man finder en stjerne med meget lavt metalindhold, for eksempel ved at måle en meget lav mængde jern i forhold til hydrogen, så ved man, at den blev dannet tidligt i universets historie. Det er tilfældet for Metusalem, men den skiller sig også ud på en anden måde, fortæller Mia Sloth Lundkvist:

»Nogen har brugt Metusalems alder til at sige, at så må Mælkevejen også være så gammel. Men den har en usædvanlig grundstofsammensætning, der kunne tyde på, at den ikke er dannet i Mælkevejen.«

Når astronomerne nærstuderer spektret fra Metusalem, ligner den



Gaia har fundet sin første exoplanet

I dag ved vi, at de fleste af Mælkevejens stjerner omkredses af en eller flere exoplaneter. Det kan vi først og fremmest takke det amerikanske rumteleskop Kepler for, men det er også muligt at opdage exoplaneter ved hjælp af Gaia. De præcise målinger fra Gaia kan nemlig bruges til at finde stjerner, der rokker frem og tilbage på himlen, fordi de påvirkes af tyngdekraften fra en exoplanet – specielt hvis der er tale om store exoplaneter, der ikke kredser alt for hurtigt om forholdsvis små stjerner.

Indtil videre er der kun fundet en enkelt exoplanet på denne måde, nemlig Gaia-4b, der har 12 gange så stor masse som Jupiter og er 570 døgn om at komme en gang rundt om sin stjerne. Efterhånden som der frigives flere data fra rumteleskopet, vil astronomerne opdage mange flere.

Kunstnerisk illustration af Gaia-4b, der kredser om sin stjerne.
Illustration: ESA/Gaia/DPAC/M. Marcussen/
CC BY-SA 3.0 IGO

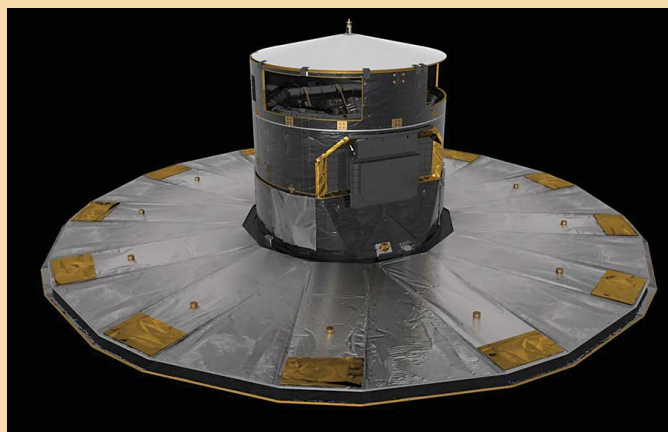


Illustration: ESA

Sådan kortlagde Gaia galaksen

I løbet af 3827 døgn roterede det europæiske rumteleskop Gaia 15.300 gange om sig selv, mens det kredsede om Solen og tog billeder af himmelrummet. I de godt 10 år er samme område af himlen blevet fotograferet 14 gange om året, så det er muligt at følge stjernernes bevægelser.

Gaia har egentlig to teleskoper, der opfanger lys fra hver sin retning, adskilt af en vinkel på 106,5 grader. Så kan astronomerne ikke bare se, hvordan en stjerne ændrer position i forhold til omkringliggende stjerner, men også i forhold til stjerner i et helt andet udsnit af himlen. Det øger præcisionen. Lyset ender i 106 CCD-chips, der tilsammen har 937.782.000 pixels. Sensorerne kan opfange lys, der er 400.000 svagere, end hvad det menneskelige øje kan opfatte.

Teleskopet har målt lysstyrke og position på himlen for 1,8 milliarder objekter, hvoraf langt de fleste er stjerner. Næsten halvanden milliard af dem har også fået målt parallakse (afstand) og bevægelse hen over himlen.



Hvis vi kunne se Mælkevejen fra siden, ville vi se en skive med en bule i midten. Skiven er bøjet i enderne, måske på grund af påvirkningen fra en dværggalakse.

Illustration: ESA/Gaia/DPAC, Stefan Payne-Wardenaar/
CC BY-SA 3.0 IGO

ikke Mælkevejens stjerner. For eksempel har den et andet indhold af magnesium i forhold til mangan og af aluminium i forhold til jern. Det kan skyldes, at den er dannet i et andet miljø, forklarer Mia Sloth Lundkvist:

»Stjerner i andre galakser har andre kemiske sammensætninger, fordi de har en anden historie. Fordelingen af stjernernes masser vil være lidt forskellig, hvilket betyder, at berigelsen fra supernovaer også bliver forskellig fra galakse til galakse.«

Sammen med andre forskere forsøger hun at bruge asteroseismologi til at aldersbestemme Metusalem, men netop den usædvanlige grundstofsammensætning har besværliggjort arbejdet, siger hun:

»Vi har målt Metusalems svingninger ved hjælp af rumteleskopet TESS. Den har et meget fint spek-

trum med tydelige stjernessvingninger. Men vores model for stjernen kan ikke tage højde for den særlige grundstofsammensætning, så vi skal have fundet en anden model, der passer bedre til virkeligheden, så kan vi komme med et bud på stjernens alder og masse.«

Galaksens historie skrives af Gaia

Ældgamle Metusalem er langt fra den eneste stjerne, der lader til at stamme fra en anden galakse. Mange andre stjerner afviger i grundstofsammensætning, og en del bevæger sig også rundt i Mælkevejen på bemærkelsesværdige måder. Dem kan data fra Gaia afsløre, og de viser sig at være efterladenskaber fra sammenstød med andre galakser.

For eksempel har astronomerne fundet tusindvis af usædvanlige stjerner, der bevæger sig rundt om Mælkevejens centrum i aflange baner i den modsatte retning af de øvrige stjerner. Disse strømme af stjerner stammer fra en mindre galakse, Gaia-Enceladus, der engang for 9-10 milliarder år siden blev opslugt af Mælkevejen. En række stjernehober i haloen menes også at komme fra Gaia-Enceladus.

Forskere på Aarhus Universitet har brugt asteroseismologi til at datere nogle af stjernerne fra Gaia-Enceladus og på den måde afgøre, hvornår kollisionen senest har fundet sted. Metoden, der er beskrevet i *Aktuel Naturvidenskab* nr. 3-2023, kan også bruges til at datere stjerner, der er dannet i forbindelse med galaksesammenstød. Når galakser smelter sammen, mødes store gasskyer, og så kan nye stjerner opstå.

Det er endda muligt, at Solen er dannet som konsekvens af en kollision, der stadig er i gang. Mælkevejen er nemlig stille og roligt ved at opsluge dværggalaksen Sagittarius, der kredser rundt om Mælkevejens centrum og tre gange har banet sig vej gennem vores galakses skive af stjerner.

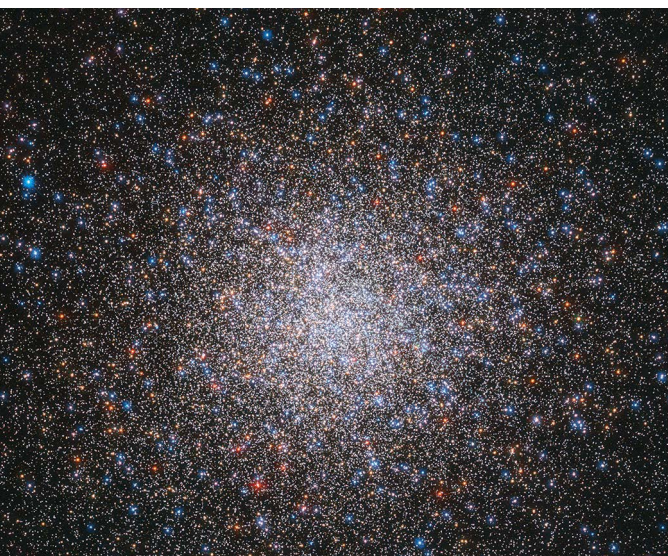
Denne pardans har stået på i seks milliarder år. Måske var det krusninger fra det første sammenstød, der fik den store gassky, som Solen og mange andre stjerner blev dannet af, til at kollapse.

Det kan også være Sagittarius, der er årsagen til, at Mælkevejens skive ikke er helt lige. Set fra siden bøjer den lidt opad i den ene side og nedad i den anden, som et langstrakt s.

Under indflydelse af tidevandskræfter fra Mælkevejen bliver Sagittarius strakt ud og efterlader sig strømme af stjerner, som Gaia kan identificere. I tidens løb har flere andre dværggalakser med navne som Kraken og Sequoia lidt samme skæbne, mens Mælkevejen har vokset sig større.

Med data fra Gaia og andre teleskoper vil astronomerne blive ved med at tilføje nye kapitler til Mælkevejens historie. De forsøger også at se frem i tiden, for vores galakse er slet ikke færdig med at vokse sig større.

Om et par milliarder år kommer turen til dværggalaksen Den Store Magellanske Sky, og nogle milliarder år senere vil Mælkevejen smelte sammen med vores store nabo Andromeda. Det bliver et smukt syn for de astronomer, der eksisterer til den tid. ■



Mange af de kuglehober, der omgiver Mælkevejens skive, er tilflyttere fra andre galakser. Det gælder for eksempel M2, der stammer fra galaksen Gaia-Enceladus. Foto: ESA/Hubble & NASA, G. Piotto et al.

SubUniversity

HAR DU ELEVER MED POTENTIALE – SOM MÅSKE IKKE SELV OVERVEJER UNIVERSITETET?

SubUniversity er et tilbud til gymnasieskoler, der giver fagligt motiverede elever med universitetspotentiale – særligt dem fra ikkeakademiske hjem – en unik mulighed for at opleve universitetet

95% af eleverne vil anbefale SubUniversity

88% føler sig mere afklaret i forhold til deres studievalg

»Jeg har set, at universitet slet ikke er så skræmmende, som jeg troede.«

»Jeg ved, hvilken retning jeg vil gå i nu – og mine mentorer har været vildt gode til at vise, hvordan en hverdag som studerende ser ud.«



Trafik i Beijing, Kina. Storbyen er kendt for en voldsom luftforurening, som dog er reduceret med ca. 50 % i løbet af de seneste 15 år. Foto: Colourbox.

MINDRE LUFTFORURENING GIVER VARMERE KLIMA

Om forfatterne



Carl Svenhag er postdoc og arbejder med klimamodeller i sin forskning om samspillet mellem aerosoler og skydannelse. carl.svenhag@envs.au.dk



Ulas Im er seniorforsker og arbejder med klimamodeller i sin forskning om aerosoler, skydannelse, luftkvalitet og helbredseffekter. ulas@envs.au.dk



Peter L. Langen er professor og arbejder med klimamodeller i sin forskning om arktiske klimaforandringer og klimafeedbacks. plangen@envs.au.dk

Alle er ved iClimate og Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet



Aerosoler er mikroskopiske partikler i luften, der både kan stamme fra menneskets aktiviteter og fra naturlige kilder. De spiller en stor rolle for menneskers sundhed i form af luftforurening, men de påvirker også klimaet både direkte og indirekte. Når vi bekæmper luftforurening, påvirker det derfor også klimaet.

Atmosfæriske aerosoler er bittesmå faste eller flydende partikler, der svæver i luften. De stammer både fra naturlige kilder og menneskelige aktiviteter. Disse partikler påvirker klimaet ved at sprede sollys, ændre skydannelse og påvirke luftkvaliteten – og det har konsekvenser for menneskers sundhed.

Aerosoler kommer fra mange forskellige kilder. Naturlige kilder omfatter blandt andet støv fra ørkener og landbrug, havsalt, vulkanudbrud og skovbrande. Planter udleder også organiske forbindelser, der kan omdannes til sekundære

aerosoler i atmosfæren. Menneskeskabte kilder omfatter afbrænding af fossile brændstoffer, industrielle processer, afbrænding af biomasse og landbrugsaktiviteter. Disse aktiviteter udsender både partikler som sod og flyveaske samt gasformige forstadier som svovldioxid (SO_2) og nitrogenoxider (NO_x), der kan reagere i luften og danne nye aerosoler.

Aerosoler påvirker både sundhed og klima. Indånding af fine partikler kan føre til luftvejssygdomme, hjerte-kar-problemer, lungeskader og i værste fald for tidlig død – især i stærkt forurenede byområder. I forhold til klimaet bidrager visse aerosoler såsom sod (på engelsk:

black carbon) til opvarmning ved at absorbere sollys, mens andre, såsom sulfat-aerosoler, virker afkølede ved at reflektere sollys tilbage ud i rummet. Aerosoler spiller også en vigtig rolle i skydannelse og nedbørsmønstre, og de kan forstærke ekstreme vejrfænomener som cykloner. Samlet set er forståelsen af aerosoler derfor afgørende for at bekæmpe luftforurening, forbedre folkesundheden og håndtere klimaforandringer.

Aerosolers effekt på klimaet

Atmosfæriske aerosoler påvirker klimaet direkte gennem spredning og absorption af solindstråling. Deres effekt afhænger af deres sammen-



refleksionsevne (albedo), hvilket reducerer mængden af solenergi, der når overfladen. Sulfat-aerosoler, som dannes af svovldioxid (SO_2) fra vulkaner og forurening, er blandt de mest effektive afkølede partikler. De reflekterer sollys ud i rummet og kan midlertidigt sænke de globale temperaturer. Efter store vulkanudbrud som Mount Pinatubo i 1991 så man for eksempel en markant men kortvarig global afkøling. Tilsvarende kan reduktionen af sulfat-udledninger fra skibstrafik føre til en opvarmningseffekt, da færre sulfat-aerosoler betyder mindre reflekteret sollys og dermed mere energi til at opvarme kloden.

Omvendt bidrager opvarmende aerosoler som sod til global opvarmning. Disse partikler absorberer solindstråling og opvarmer atmosfæren, samtidig med at de mindsker albedoen, hvis de afsættes på sne og is. Sod udledes fra afbrænding af fossile brændstoffer, biomasse og industrielle processer. Når det lander på is og sne, gør det overfladen mørkere, og det øger varmeoptagelsen og accelererer afsmeltningen. Det forstærker opvarmningen, især i Arktis.

Derudover kan mineralstøv have både afkølede og opvarmende effekter afhængigt af sammensætningen. Mens nogle partikler reflek-

terer sollys, kan større partikler absorbere stråling og dermed påvirke regionale temperaturer.

Samlet set afhænger aerosolers direkte klimapåvirkning af deres type og udbredelse. At reducere sod kan hjælpe med at bremse opvarmningen, mens reguleringen af sulfat-aerosoler er en balancegang mellem at begrænse luftforurening og undgå utilsigtede temperaturstigninger.

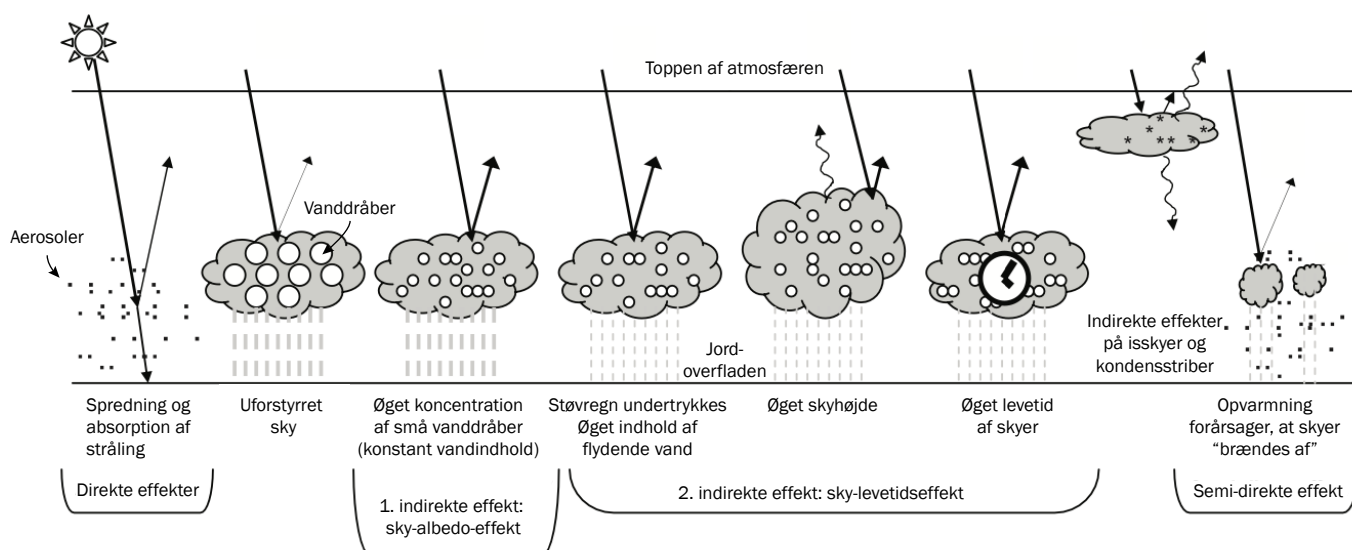
Aerosoler påvirker dannelsen af skyer

Aerosoler påvirker klimaet indirekte gennem deres rolle i skydannelse. Og det har stor betydning for Jordens energiregnskab.

Skyer dannes, når vanddamp i luften køles ned og kondenserer til små dråber. Dog omdannes ren vanddamp ikke så let til dråber af sig selv. En skydråbe har næsten altid brug for en overflade at klæbe sig til for at begynde at dannes, og her kommer aerosolerne i spil. Når en aerosolpartikel er i stand til at tiltrække vand (det kaldes på fagsprog hygroskopisk), kan den fungere som en skykondensationskerne, der tillader fugt at samle sig omkring den og danne skydråber. Jo flere af sådanne vand-tiltrækkende aerosoler, der er til stede, desto flere små skydråber dannes der.

sætning, størrelse og evne til at reflektere eller absorbere lys. Nogle aerosoler bidrager til afkøling, mens andre forårsager opvarmning.

Afkølede aerosoler spredde sollys og øger Jordens samlede

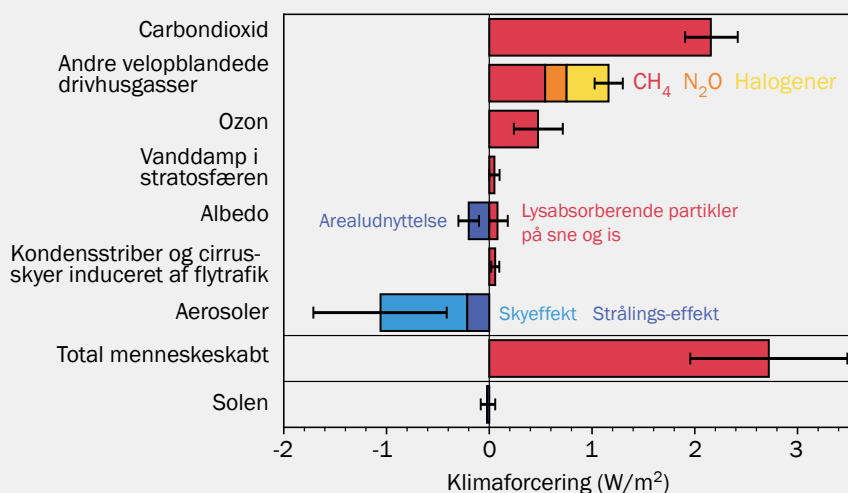


Skematisk illustration af de mange måder, aerosoler kan påvirke skyerne og dermed klimaet på. På figuren repræsenterer de rette linjer med pil indkommende og reflekteret stråling fra Solen, mens de bølgede pile repræsenterer langbølget stråling (varmestråling) fra Jorden. Kilde: IPCC AR4/ Haywood and Boucher (2000).

Klimaforcing, klimafølsomhed og klimafeedbacks

Klimaet på Jorden styres af en fin balance mellem den energi, vi modtager fra Solen, og den energi, som stråler tilbage til rummet. Når noget ændrer denne balance – for eksempel øgede mængder af drivhusgasser eller aerosoler – taler vi om *klimaforcing*. Klimaforcing måles konkret i Watt per kvadratmeter (W/m^2). Positiv klimaforcing betyder, at Jorden optager mere energi, hvilket fører til opvarmning, mens negativ klimaforcing har en kølende effekt.

Men hvor meget varmere bliver det egentlig ved en given positiv klimaforcing? Det afhænger af *klimafølsomheden*, som angiver, hvor meget den globale temperatur (målt i grader Celsius) vil stige som resultat af en vis klimaforcing. Her spiller *klimafeedbacks* en stor rolle. Nogle feedbacks, som mere vanddamp i atmosfæren eller smeltende is, forstærker opvarmningen, mens andre, som øget skydække, kan modvirke den.



Klimaforcingen fordelt på forskellige stoffer og processer samlet set siden 1750 og frem til 2019. Det største opvarmende bidrag kommer fra CO_2 , mens det største negative bidrag kommer fra aerosoler – navnlig aerosol-sky-samspillet gennem den indirekte aerosoleffekt. Det ses også, at den klart største usikkerhed i vores vurdering af det totale bidrag kommer fra aerosolerne (og samspillet med skyer), illustreret ved de vandrette sorte streger. Kilde: IPCC AR6.

Forståelsen af disse mekanismer er afgørende for at forudsige fremtidens klima. Små ændringer i klimaforcing kan føre til store

temperaturændringer over tid, hvilket gør det vigtigt at handle på menneskeskabte påvirkninger, før vi krydser kritiske grænser.

Det har to vigtige konsekvenser for klimaet.

For det første øger en høj koncentration af skykondensationskerner antallet af små skydråber, og det gør skyerne lysere og mere reflekterende. Disse skyer sender mere sollys tilbage ud i rummet, og det giver en afkølede effekt, ligesom sulfat-aerosoler gør.

For det andet påvirker aerosoler skyernes levetid. Skyer med mange små dråber danner ikke så let regndråber, hvilket betyder, at de varer længere, og dermed forlænger deres afkølede virkning. Omvendt, hvis der er færre skykondensationskerner i atmosfæren, vil skyerne bestå af færre men større dråber, hvilket gør dem mørkere og mere tilbøjelige til at producere regn. Dette samspil mellem aerosoler og skyer gør det vanskeligt at forudsige deres samlede klimateffekt.

Nogle typer af aerosoler kan ovenikøbet bidrage til dannelsen af iskrystaller i højtliggende skyer, hvilket kan have en opvarmende effekt, da de bidrager til drivhuseffekten. Gennem de høje, tynde isskyer påvirker den indirekte aerosoleffekt derfor klimaet på en måde, der er modsat af skyer med flydende vanddråber. I stedet for at reflektere sollys og køle planeten, har de en tendens til at holde på varmen. Modsat, når vandskyer indeholder flere aerosoler, bliver de lysere og virker afkølede.

Skyernes evne til enten at afkøle eller opvarme afhænger derfor af sammensætningen af forskellige aerosoler, af de atmosfæriske forhold og af regionale forskelle. Fordi den indirekte aerosoleffekt kan drive både opvarmning og afkøling, er det meget komplekst og svært at sætte præcise tal på deres påvirkning. Det gør dem faktisk til en af de største usikkerheder i klimamo-

deller og et aktivt forskningsområde indenfor klimavidenskaben.

Klimaforandringer og fremtidens udledninger

Siden industrialiseringen er enorme mængder drivhusgasser som CO_2 og metan blevet udledt til atmosfæren, men samtidig er også store mængder aerosoler og forurenende gasser blevet sluppet ud. Disse partikler har haft betydelige sundhedsmæssige konsekvenser, da langvarig eksponering for luftforurening kan forkorte menneskers levetid – især i storbyer med høj forurening.

Udover at aerosoler er skadelige for helbredet, har mange af dem som beskrevet også en afkølede effekt på klimaet. Det har skabt en kompleks situation, hvor bekæmpelse af luftforurening utilsigtet kan forværre den globale opvarmning.

Forskning viser ifølge den seneste rapport fra FN's Klimapanel (IPCC



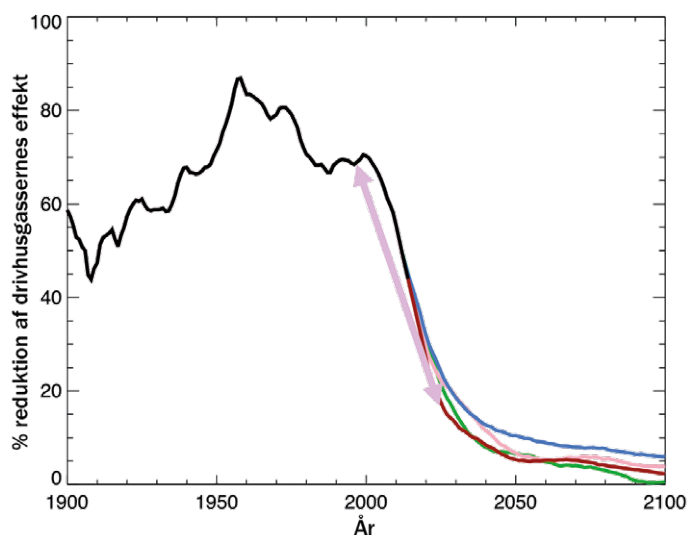
Fotoet viser en ballon til aerosolmålinger i højden samt en stationær målestation ved Villum Research Station i Nordgrønland i forbindelse med feltkampagnen CleanCloud Arctic Spring i 2024. Foto: Lionel Favre (EPFL).

AR6), at menneskeskabte aerosoler delvist har skjult eller mindsket opvarmningen fra drivhusgasser som CO₂ gennem det seneste århundrede. I takt med at vi i midten af 1900-tallet begyndte at erkende de skadelige sundhedseffekter af aerosoler og siden har reduceret partikeludledningen af hensyn til folkesundheden – for eksempel ved at rense industriudledninger – er den afkølende effekt af aerosolerne aftaget. Og det har medført en accelereret temperaturstigning.

Hvis vi i fremtiden kun fokuserer på at reducere aerosoler uden samtidig at reducere drivhusgasudledningen, kan vi derfor risikere en hurtigere global opvarmning. Det understreger blot nødvendigheden af samtidig at sætte turbo på reduktionen af drivhusgasserne for at ramme en balance mellem forbedret luftkvalitet og klimastabilisering.

Naturlige udledninger

Naturlige udledninger af aerosoler kommer fra forskellige kilder som ørken, vulkaner og bølgesprøjt på havene. Disse udledninger kan ændre sig afhængigt af klimaet. Forskere bruger avancerede klimamodeller til at forudsige disse ændringer. En stor samling af klimamodelkørsler, kendt som



Aerosoler har tidligere hjulpet med at modvirke noget af den opvarmning, som drivhusgasser skaber. I 1960-1980 kunne de reducere op til 80 % af drivhusgassernes effekt, men i dag er det tal faldet (lyslilla pil) til omkring 20 %. Når vi begrænser luftforurening og udleder færre aerosoler, mister vi deres kølende virkning, og den globale opvarmning går hurtigere. Ved slutningen af dette århundrede forventes aerosoler kun at modvirke mellem 0 og 20 % af drivhusgassernes effekt, afhængig af hvordan udledningerne udvikler sig (forskellige farvede kurver). Kilde: Modificeret fra Bauer et al. (2022).

Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), viser, at naturlige udledninger af for eksempel støv kan variere meget mellem de mulige klimafremtider. Afhængig af klimascenariet, kan det variere mellem en lille reduktion og en betydelig stigning.

For eksempel lader udledninger af støv fra ørken i Nordafrika,

som Sahara, til at øges på grund af mindre regn og stærkere vinde. Omvendt kan udledninger fra ørken i Asien, som Taklimakan og Gobi, falde på grund af forventet mere regn og svagere vinde. I USA kan områder som de sydlige Great Plains og sydvestlige områder opleve flere støvstorme i fremtiden på grund af mindre nedbør og stærkere vinde.

Denne artikel udspringer af et projekt under Klimastøtten/Energistyrelsen. Det europæiske forskningsprojekt CleanCloud er støttet af EU's Horizon Europe Programme.

Videre læsning

Bauer, S. et al (2022): The Turning Point of the Aerosol Era. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 14, e2022MS003070. doi.org/10.1029/2022MS003070

IPCC AR 4, kap 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.

IPCC AR 6, kap 7: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity

Om iClimate: iclimate.au.dk

Disse naturlige ændringer i aerosol-udledninger er vigtige at forstå, fordi de kan påvirke både klimaet og luftkvaliteten. Ved at studere disse ændringer gennem klimamodeller kan forskere bedre forudsige fremtidige klimaforandringer og finde måder at tilpasse sig dem på.

Stadig store usikkerheder i aerosolernes effekt

Omkring 80% af usikkerheden i de ændringer i energibalancen, der har drevet de hidtidige klimaændringer (kaldet klimaforcering – se faktaboks) skyldes aerosoler og deres komplekse samspil med skyer. Det skyldes, at aerosoler påvirker både solindstråling og skydannelse på måder, der er svære at kvantificere præcist. Direkte påvirker aerosoler klimaet ved at reflektere eller absorbere sollys, hvor sulfat-aerosoler har en kølende effekt, mens sod bidrager til opvarmning. Deres indirekte effekter opstår gennem skydannelse, hvor aerosoler fungerer som skykondensationskerner, hvilket ændrer skyernes refleksions-evne, levetid og evne til at danne nedbør.

Denne kompleksitet gør det svært at vurdere, hvordan aerosoler samlet set påvirker klimaet over tid. Samtidig varierer aerosoleffekter regionalt, hvilket komplicerer klimamodellernes evne til at give præcise forudsigelser. Vi forskere arbejder derfor på at forbedre vores forståelse af aerosolernes rolle i klimaforandringer, da en bedre beskrivelse af deres effekter er afgørende for at forudsige fremtidens klimaudvikling.

På Aarhus Universitet bruger vi avancerede klimamodeller til at undersøge, hvordan aerosoler og skydannelse påvirker klimaet – både globalt og regionalt. Disse processer er komplekse, og en af de største usikkerheder i klimamodeller er netop, hvordan aerosoler dannes i atmosfæren. Processen involverer en lang række kemiske reaktioner og interaktioner, som endnu ikke er fuldt ud forstået, og selv små ændringer i modellernes antagelser kan have stor betydning for forudsigelserne af skydannelse og dens effekt på klimaet. For at reducere denne usikkerhed ser vi blandt andet på naturlige kilder

til aerosoler. Desuden udsender mikroorganismer flygtige organiske forbindelser – det vil sige stoffer, der let fordamper – og her er en af de vigtigste isopren, som planter og alger producerer, og som kan føre til dannelsen af nye partikler i luften. Vi undersøger også, hvordan biologiske partikler som bakterier, svampesporer og pollen spredes og påvirker skydannelse og klimaet.

For at sikre at vores modeller giver pålidelige resultater, tester vi dem løbende ved at sammenligne deres output med virkelige data – blandt andet aerosolprøver fra feltmålinger og satellitobservationer af skyer og atmosfæriske forhold. Takket være teknologiske fremskridt kan vi i dag lave mere avancerede simuleringer, hvor vi fanger flere detaljer og opnår større præcision. Dette arbejde er en central del af det europæiske forskningsprojekt CleanCloud, som vi leder. Her kombinerer vi feltmålinger, laboratoriestudier og modeludvikling for at opnå en bedre forståelse af, hvordan aerosoler og skyer interagerer, og hvad det betyder for klimaet. ■

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:





Illustration: Shutterstock

HVORDAN SKABER MAN VIDEN?

**Filosoffer har altid diskuteret, hvad der kendetegner rigtig videnskab.
Forskning i vores kognitive mekanismer kan bidrage til
en videnskabsteori, som er mere baseret på erfaringer
fra naturvidenskabernes praksis.**

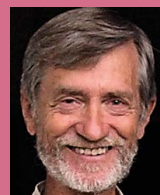
I lærebøger i videnskabsteori møder vi typisk en række filosoffer og tænkere, som har forsøgt at fastslå, hvordan videnskab bør praktiseres. De mener, at det er filosofien, der bedst kan forklare, hvad man skal forstå ved objektiv sandhed og dermed definere grænsen mellem videnskab og ikke-videnskab, det såkaldte *demarkationsproblem*. Det er et gennemgående projekt i filosofiens historie. Det er dog aldrig lykkedes at skabe enighed om dette spørgsmål.

Blandt visse humanister og sociologer har den resultatløse jagt efter kriterier på objektiv sandhed ført til en opfattelse af videnskab som en rent social konstruktion. Videnskab beskrives her som resultatet af psykologiske, sociale og ideologiske forestillinger, som kommer til at diktere vores opfattelse af virkeligheden. Sandheden bliver så defineret som det, de fleste kan blive enige om, eller det, som viser sig at give de mest nyttige forudsigelser. Men din sandhed behøver ikke være den samme som min.

Grænsen mellem viden og standpunkter bliver her flydende.

En sådan *socialkonstruktivisme* finder flere og flere fortalere indenfor humaniora, men stemmer dårligt med naturforskerens selvforståelse. For målet for naturforskerens undersøgelser er netop at uddybe og præcisere vores fælles viden om "verden derude". Som det så omhyggeligt dokumenteres i hvert eneste nummer af dette tidsskrift.

Så hvad gør man, hvis man ønsker



Forfatteren
Troels Holm cand.
scient., biolog,
tidligere formidler
og underviser, nu
pensionist.
mail@troelsholm.dk

System 1	System 2
Arbejder med bidrag fra: • Følelser • Nedarvede opfattelsesmønstre • Indbyggede tankestrukturer • Erfaringer • Tillærte, automatiske tankemønstre	Arbejder med bidrag fra: • Logik • Rationelle analyser • Korttidshukommelsen • Tillærte, bevidste tankemønstre
Fungerer: • Hurtigt • Automatisk, intuitivt • Ubevidst • Ubesværet	Fungerer: • Langsomt • Viljestyret • Bevidst • Energikrævende
Bruges til opgaver, der er: • Rutinemæssige • Simple • Under tidspres eller stress	Bruges til opgaver, der er: • Usædvanlige • Komplekse • Ikke-presserende

at forklare, at der foregår noget, der fortjener betegnelsen naturvidenskab og som faktisk skaber ny, præcis viden? Måske kan forskning i menneskers måde at opfatte på give ny inspiration.

De to tænkesystemer

De seneste årtier er der opstået nye forskningsgrene, som kan levere væsentlig viden om, hvordan mennesker opfatter deres omverden og tilegner sig viden om den. Det kaldes *kognitionsforskning*. I Aktuell Naturvidenskab nr. 4/2024 omtaler Daniella Fiedler kort forskning i intuitive forståelsesmønstre og forklarer nogle af de typer af misforståelser om evolution, det kan medføre. Det fortjener en uddybning.

Et første skridt i forståelsen af de kognitive mekanismer er at tage følelsernes stærke indflydelse i betragtning. Fordi følelserne ofte er ubevidste, kan de nemt komme til at overskygge den rationelle tænkning. Religiøse følelser kan have samme effekt, og det kan forklare de sammenstød, der gennem tiden har været mellem religion og videnskab.

Men en opdeling i følelser kontra fornuft har vist sig at være for simpel. Den israelsk-amerikanske psykolog Daniel Kahneman (som

også er nævnt i Daniela Fiedlers artikel) hævder, at mange af de fejl, der opstår i tænkning hos almindelige mennesker, udspringer af den måde, vores tænkning grundlæggende fungerer på.

Kahneman foretager en todeling, men i stedet for at tale om fornuft kontra følelser, opererer han med to tænkesystemer (se faktaboks): System 1 fungerer automatisk, hurtigt og intuitivt. Det står altid parat med hurtige løsninger på hverdagens rutinemæssige udfordringer. System 1 får vigtige bidrag fra vores følelser, men også fra nedarvede opfattelsesmønstre og tankestrukturer samt erfaringer og indlærte tankemønstre, der med tiden er blevet automatiske og ubevidste.

Desuden har vi System 2, som normalt er reserveret til vanskeligere situationer, hvor System 1 må give op. System 2 fungerer langsomt, det kræver energi og aktiv opmærksomhed, men er til gengæld i stand til at løse mere komplekse opgaver, som kræver metodisk tilgang, dybere rationelle analyser og logisk tænkning.

Denne arbejdsdeling er helt nødvendig. Hvis vi skulle foretage rationelle vurderinger og bevidste analy-

ser af den overvældende mængde information, vi konstant modtager, ville systemet hurtigt blive overbelastet. Derfor er System 1 med sine følelser og intuitioner ikke bare en forhindring men perfekt til at afvikle den store mængde simple rutineopgaver, hverdagen byder på. Også i kritiske, livstruende situationer kan det være afgørende, at vi kan handle øjeblikkeligt og spontant, uden forsinkende overvejelser.

Det mere besværlige og energikrævende System 2 kan så spares, indtil der virkelig er brug for det, eller tid til at bruge det. Det kan være nye situationer, vi ikke har erfaring med, komplekse logiske problemer eller – vigtigt i denne sammenhæng – videnskabelig tænkning. Men selv når vi bevidst forsøger at foretage rationelle overvejelser, vil System 1 ofte ubemærket "hjælpe" os med genveje og metoder, som gør System 2's arbejde lettere. Det vil i nogen tilfælde ende med tvivlsomme resultater. Det er den type fejl, som man kalder for *bias*.

Social og psykologisk bias

Det er en vigtig pointe, at det ikke er nok at være på vagt overfor rent følelsesmæssig bias. For naturforskeren gælder det også om at være kritisk overfor intuitive og "naturlige" forklaringer fra System 1, som umiddelbart virker som sund fornuft. Forskeren skal derfor bruge energi og opmærksomhed på at kontrollere og analysere sine egne begreber, metoder og teorier, så de kan stå for logisk og rationel kontrol fra System 2. Det er langsomt og besværligt. Derfor kræver det tid, engagement og træning at blive en god naturforsker.

Mange har forsøgt sig med at opliste de talrige typer af fejl, som system 1 kan begå, når det forsyner os med hurtige og "beskidte" løsninger.

Meget af litteraturen om bias og fejlslutninger drejer sig om almindelig hverdagstænkning. Mange af de eksempler, der har været brugt, handler om bias, som skyldes

logiske fejl. Andre kan forklares ud fra sociale forhold som trang til konformitet, autoritetstro, drømme om succes og berømmelse etc. Mange handler om almene psykologiske forhold som modvilje mod at ændre standpunkt, overvurdering af egen viden, snæversyn, forfængelighed, dovenskab etc.

Mange af disse typer bias forekommer naturligvis hos forskere. Men de kan i høj grad modvirkes gennem uddannelse og videnskabelig træning, som netop handler om at erkende disse typer bias og bevidst forsøge at neutralisere dem med specielle fremgangsmåder og metoder. Mange standarder for prøveindsamling, eksperimentelle metoder og statistisk behandling handler netop om dette.

Medfødt, kognitiv bias

Men derudover findes der en række bias og "tankefælder", som åbenbart stikker dybere end den enkeltes personlige eller sociale motiver. De hænger sammen med selve den måde, vi fra naturens hånd opfatter vores omverden på. Man kunne kalde det for medfødt, kognitiv bias.

Når vi taler om naturvidenskabelig forståelse generelt, kan de mest hårdnakkede typer kognitiv bias samles i nogle hovedgrupper: Den *antropocentriske*, den *antropomorfe*, den *teleologiske* og den *essentialistiske/kategoriske* forståelse, som Daniela Fiedler også beskriver (se faktaboks).

Vi skal dog huske, at teleologisk (dvs. formålsrettet) tænkning ikke i alle sammenhænge kan betragtes som fejl i vores opfattelse. Mennesker er næsten konstant omgivet af artsfæller med hensigter og mål. Evnen til at sætte sig i andres sted eller se sig selv med de andres øjne (i psykologien kaldet *Theory of Mind*) er grundlaget for vores intuitive forståelse af andre mennesker, deres motiver og deres handlinger og dermed helt centralt for vores sociale liv. Det ser ud, som om børns udvikling af disse sociale evner foregår parallelt med udvikling af deres sproglige evner,

Medfødt kognitiv bias

Antropocentrisme:

Forestillingen om, at mennesket er centrum og formål med alt i universet. Det kan være antagelsen om, at alle himmellegemer kredser om vores jordklode. Eller antagelsen om, at mennesket er kronen på skaberværket eller evolutionens endemål.

Teleologi:

Forestillingen om, at alt i universet er skabt med et formål eller en hensigt. Denne hensigt kan være personificeret i et guddommeligt væsen eller et mere abstrakt princip (Gud/Gaia/kosmisk eller åndelig energi/økonomisk kraft), der for eksempel stræber mod harmoni/balance/ligevægt. Fordi en sådan hensigtstænkning er typisk for mennesker, kan man sige, at teleologisk tænkning er en form for *antropomorf* tænkning. Vi tillægger ubevidst andre væsner eller døde ting menneskelige egenskaber (beslægtet med *antropocentrisme*).

Essentialisme:

Forestillingen om, at alle fænomeners og væseners fremtræden og adfærd er forårsaget af indre, iboende egenskaber (i modsætning til at årsager findes i relationer til omverdenen). Når man opdeler arter, mennesker eller ting i homogene, skarpt adskilte grupper ud fra antagelsen om, at de har en fælles essens, kaldes det for *kategorisering*. Overdreven kategorisering fører til generaliseringer og fordomme. For eksempel når man hævder skarpe grænser mellem mennesker og dyr, sjæl og legeme, eller når mennesker kategoriseres på baggrund af køn/religion/hudfarve/politiske holdninger osv.

som om vores intuitive opfattelse af forklaring og kausalitet er indbygget i vores nedarvede sproglige beredskab.

I naturvidenskaberne fører disse spontane forståelsesmåder derimod let til fejl og barrierer, fordi naturens mekanismer *ikke* følger sådanne principper. Vi er bare fra naturens hånd tilbøjelige til at forsøge at forklare *alt* ud fra de kognitive skabeloner, som vi kender så godt og benytter så flittigt i vores sociale virkelighed. Selv om vi gennem uddannelse og studier har forsøgt at erstatte dem med mere videnskabelig og rationelle forklaringer, dukker de spontant op sideløbende med de tillærte.

De intuitive forståelsesmåders universelle og biologiske karakter understreges af, at de er særligt foretrukne af børn. Det er også påfaldende, at de dukker frem igen hos voksne Alzheimers-patienter, der er begyndt at glemme deres tillærte viden.

De medfødte kognitive bias (antropocentriske, teleologiske og essentialistiske) er ikke kun dominerende og livskraftige, fordi de er "nemme" og spontane. De er også psykologisk tillokkende, fordi de forsyner naturen og menneskelivet med et formål. Vi bliver betydningsfulde og vores liv får en retning og en mening. Det er smertefuldt at give afkald på. For nogen er dette vigtigere end sandheden om den fysiske verden.

Mange naturforskere har haft succes med at reservere en afdeling af hjernen til videnskab og en anden til religion. Hvis man har held med at holde dem adskilt på denne måde, kan man nyde godt af fordelene ved begge forståelsesmåder.

Etablering af en videnskab

Hvis man blander dem, vil de intuitive forståelsesmåder blokere for en mere objektiv forståelse af naturens virkemåde. En naturvidenskabs fødsel må derfor starte med et brud med denne ikke-videnska-

Som iagttaget af et billede med gennemarbejdet perspektiv, kan man enten benytte System 1 til at nyde den spontane oplevelse af dybde og afstand i scenet, eller man kan aktivere System 2, som derpå kan analysere, hvordan formindskede personer, konvergerende linjer og forsvindingspunkter på udspekuleret vis afsporer vores objektive viden om billedets fysiske 2-dimensionalt.

Illustration: The Annunciation, with Saint Emidius, maleri af Carlo Crivelli 1486. National Gallery, London



belige forståelse. Det betyder, at et videnskabeligt fags begreber og teorier skal være:

- **Ikke-antropocentriske:**

Teorier og begreber skal ikke tage udgangspunkt i begreber og relationer, som handler om stræben, forestillinger og behov, men i den virkelighed, der findes uafhængigt af mennesker. Det kræver, at et fags begreber og termer defineres helt præcist, så de ikke giver plads til personlig fortolkning af termerne og projicering af menneskelige egenskaber.

- **Ikke-teleologiske:**

Teorien skal være uden hensigt og formål. Processer skal være "selvkørende" i kraft af relationerne mellem begreberne. Franske epistemologer inspireret af Gaston Bachelard kaldte det meget rammende for "processer uden subjekt".

- **Ikke-essentialistiske:**

Teoriens funktionsmåde må ikke være afhængig af fænomeners eller begrebers iboende essens. Den skal udelukkende fungere i kraft af logiske relationer mellem begreberne. Mekanikkens energi, masse og hastighed er defineret ud fra relationerne mellem dem. Det samme gælder el-lærens spænding, modstand og strømstyrke. Den biologiske evolution drives ikke frem mod et endemål eller i kraft af arternes indre essens. Den er et logisk uundgåeligt resultat af relationerne mellem genetiske forskelle i et kuld, fødselsoverskud, konkurrence om ressourcer, som fører til høj dødelighed, og selektiv overlevelse.

Hvis dette grundlæggende teoretiske arbejde udføres omhyggeligt, har faget en robust kerne, som man kan arbejde ud fra og bygge videre på, justere og præcisere. Eventu-

elt kan der ske fraspaltning af nye fagområder. Gode naturforskere har udviklet en forståelse for disse principper, som efter lang tids arbejde bliver intuitiv – og dermed faktisk en del af System 1.

Naturvidenskabernes store gennembrud kan ofte anskues som opgør med traditionelle antropocentriske, teleologiske eller essentialistiske forklaringsmåder. Darwins evolutionslære er et opgør med alle tre principper. Kreationistiske forklaringer (inklusive Intelligent Design) opererer med kategoriske artsgrænser, skarpe grænser mellem mennesker og dyr, mennesket som skabningens ypperste og endelige mål. Darwinismen afviser alle disse betragtninger og erstatter dem med en logisk proces uden mål og uden subjekt.

Hinsides forståelse

Det synes mere og mere klart, at den menneskelige erkendelse fra naturens hånd ikke er udviklet til automatisk at forsyne os med objektiv korrekt indsigt i verden omkring os, som de empiristiske videnskabsteorier tidligere antog. Det ser derimod ud til, at vores kognitive beredskab – i god samklang med evolutionslæren – er optimeret til indsigter og forståelser, der maksimerer vores muligheder for at reagere spontant og hensigtsmæssigt i vores omgivelser og især i sociale sammenhænge.

Udviklingen indenfor den teoretiske fysik i 1900-tallet antyder, at denne forskel måske er endnu mere dramatisk end her beskrevet. Vi opfatter intuitivt, at alt, hvad der foregår i verden, kan anskues som hændelser, der er styret af kausale lovmæssigheder i et fikseret tredimensionelt rum og et urokeligt tidsforløb. Det er tilsyneladende den minimale ramme, vi har brug for, for overhovedet at føle, at vi forstår noget.

Relativitetsteoriene og kvantefysikken fortæller os, at ikke engang dette grundlag er urokeligt. Selv vores forestillinger om kausalitet,

det absolutte rum og den absolutte tid viser sig at være resultater af en tendens i vores hoveder til at anskue disse forhold som absolutte, velafgrænsede kategorier. Når dette fundament begynder at vakle, er det svært at fastholde oplevelsen af, at vi faktisk forstår, hvad der foregår. Meget af den moderne fysik (som relativitetsteorien, kvantemekanik og kosmologi) handler da også om forhold, som man matematisk kan bevise rigtigheden af, men som det er svært at forbinde med forståelige realiteter. Forskerne kan se på formelne, at det må forholde sig sådan. Men selv garvede fysikere indrømmer nogle gange, at det ikke rigtigt er til at forstå. De må bare vænne sig til, at verden er indrettet sådan.

Det betyder heldigvis ikke, at vi er ude af stand til at forstå noget som helst af vores omgivende virkelighed. Det betyder, at når vi skal lave meget avanceret naturvidenskab, skal vi nok nedtone betydningen af vores *oplevelse* af forståelse. Og generelt skal vi være på vagt over for de tendenser i vores kognitive System 1, som forsimples eller forvrænger problemerne. Forskerne

skal blive fortrolige med systemets funktion og forsøge at kompensere for det, så godt de kan. Og så skal vi opdyrke og træne vores System 2 til netop dette.

Kimen til en anderledes videnskabsteori

Alt dette kan sammenfattes til en opfattelse af videnskab som en konstant bestræbelse på at udrydde ubevidst bias og forholde sig kritisk til medfødte kognitive skabeloner. Det kan frigøre vores rationelle potentiale i system 2 til at konstruere logisk sammenhængende teorier og begreber, der kan bruges til at udpege yderligere undersøgelser og eksperimenter. Jeg synes, det giver en temmelig realistisk beskrivelse af noget særegent ved naturvidenskabelig tænkemåde.

Begrebet "Den Objektive Sandhed" er en essentialistisk tankekonstruktion. Derfor er det også så svært for filosofferne at få rigtigt greb om det. Det er da heller ikke noget naturforskere lægger voldsom vægt på i praksis. De arbejder hellere med forskellige grader af sandhedsværdi (ofte målt i sandsynligheder) og

gradvise overgange: udlugning af rester af bias i teorierne, konstant vekselvirkning mellem teori og praksis (iagttagelser og eksperimenter), kombinationer af induktiv og deduktiv tænkning osv.

En vigtig del af en forskers arbejde består i at vurdere *graden* af videnskabelighed i kollegers og studerendes arbejder: rapporter, opgaver, eksaminer, artikler osv. Det foregår med graduerede skalaer, kritiske analyser og diskussioner, ikke med et sandt/falsk-stempel.

For at kunne gøre dette på en kvalificeret måde er man nødt til at være dybt nede i sit fags teoretiske detaljer. Det kræver uddannelse, skoling og træning. Der er ingen filosofiske genveje til at fastslå kvaliteten af naturvidenskabeligt arbejde. Og det er altså heller ikke nok at bruge hverdagens "sunde fornuft", som vi alle er så gavmildt udstyrede med. Men fra naturens hånd har vi alligevel adgang til nogen mentale værktøjer, som har vist sig at kunne forfines og trimmes til at producere forbløffende præcis og detaljeret viden om verden omkring os. ■

Yderligere læsning

En oversigt over udviklingen af kognitive videnskaber: Thagard, P. (2012). *The cognitive science of science: Explanation, discovery, and conceptual change*. Cambridge, MA: MIT Press

Om de to tænkesystemer: Kahneman, Daniel (2018): *At tænke – hurtigt og langsomt*, Lindhardt og Ringhof 2018

Om bias: Kühnel, Patrick (2015): *The Truth Behind Errors of Reasoning. Cognitive Fallacies as a matter of Conceptual Coherency*. (Grin Verlag 2015)

Gelman, Susan A. and Kristan A. Marchak (2019) *Do Our Intuitions Mislead Us* (Chap. 12 in Taylor and Francis: *What is Scientific Knowledge?* 1st edn., 2019).

Om den ubærlige objektivitet: Holm, Troels (2018): *Hvad er meningen med videnskab?* *Aktuel Naturvidenskab* 2018 nr. 1.

Om brug af kognitive teorier i arbejdet med kemiske analyser: Szántay, Csaba Jr. and Edwald Moser (2018): *Self-Managed Belief as Part of the "Scientific Method"*. *Front. Phys.* 6:68. doi: 10.3389/fphys.2018.00068



Bliv studerende for en dag

Som **Studerende for en dag** følger du undervisningen på den uddannelse, du er interesseret i. Du spiser frokost med en studerende, som viser dig rundt - og du bliver klogere på, om uddannelsen er den rigtige for dig.

Besøg **Anvendt matematik, Biokemi og molekylær biologi, Biologi, Biomedicin, Datalogi, Farmaci, Fysik, Kemi, Medicinalkemi, Matematik, Matematik-økonomi** eller **Kunstig intelligens** på SDU i Odense.

Tilmeld dig på sdu.dk/nat/studerendeforendag



KRAFTIG TURBULENS PÅ FLYVETUREN - en oplevelse for livet!

Har man oplevet kraftig turbulens på en flyvetur, er det næppe noget, man glemmer. I denne artikel går meteorolog Jesper Eriksen på jagt efter en forklaring på, hvad der forårsagede den kraftige turbulens, der i november måned 2024 fik et SAS-fly til at afbryde en tur til Miami.

De fleste mennesker, der har rejst med fly, har oplevet fænomenet turbulens, hvor flyet ryster og falder eller stiger brat. I de fleste tilfælde er det ikke så voldsomt, men hvis man har oplevet en episode med meget kraftig turbulens, er det noget, man husker for livet. Her kan man bogstaveligt talt blive kastet rundt, hvis man ikke er spændt fast og i værste fald komme voldsomt til skade. Selve flyet kan også få strukturelle skader ved en sådan omgang, og derfor foreskriver procedurerne, at et fly skal igennem et sikkerhedstjek efter sådan en omgang, før det igen må gå på vingerne.

I denne lille artikel vil jeg se nærmere på fænomenet turbulens i forhold til flyvning med udgangspunkt i en konkret hændelse den 14. november 2024, hvor et SAS-fly med 254 passagerer på vej fra Stockholm til Miami stødte på

kraftig turbulens ud for Sydøstgrønland. Flyet måtte efter mere end 5 timers flyvning vende om med de chokerede passagerer og lande til et sikkerhedstjek i København.

Turbulens og jetstrømme

Det er faktisk svært at give et kort og præcist svar på, hvad turbulens er. Men man kan groft sagt sige, at en turbulent luftstrøm er præget af ubalance, og som et resultat heraf hurtige udsving i vindens styrke i både tid og rum. I en turbulent luftstrøm opstår der derfor hvirvler af forskellige størrelser, hvor den enkelte hvirvel har en ret kort levetid. De mindre hvirvler tager energien fra de større hvirvler. Energien bevares i denne proces, men den nedskaleres, kan man sige.

Højt oppe i atmosfæren i 10 km's højde eller mere, hvor de store industrielle flyvninger foregår, undtagen når flyet skal lette og lande, er det angiveligt hvirvler med stør-

relser på mellem 100 m til flere km, der udgør en potentiel fare.

I atmosfæren findes der såkaldte jetstrømme, der er afgrænsede områder, hvor luften bevæger sig med meget høje vindstyrker – undertiden kan de komme op på 3-4 gange stormstyrke. Jetstrømmen befinder sig typisk i 8-13 km's højde, og der kan optræde hvirvler tæt på jetstrømmen, fordi vinden hurtigt ændrer styrke indenfor kort afstand. Disse hvirvler er usynlige for det blotte øje, da der i denne højde ikke er noget materiale de turbulente hvirvler kan snurre rundt med og dermed afsløre deres tilstedeværelse.

Hvordan opleves turbulens?

Turbulens inden for flyvning opdeles normalt i 3 kategorier, let, moderat og kraftig. Men der findes faktisk endnu en kategori nemlig ekstrem turbulens. Mens let turbulens højst kan føles lidt generende, slynges



Forfatteren

Jesper Eriksen er uddannet meteorolog fra Københavns Universitet og DMI og arbejder til daglig som meteorolog på DMI. Betragtningerne i denne artikel er dog forfatterens egne. je@dm.dk

alle løse genstande – og mennesker – rundt ved kraftig og ekstrem turbulens (se tabel).

En vigtig pointe er, at turbulensens styrke afhænger af flytypen og den hastighed, som flyet bevæger sig med. Set fra piloternes synspunkt opleves turbulens som en ikke planlagt og hurtig ændring af flyvehøjden, der både går op og ned. Hastighedsændringen (accelerationen) ved kraftig turbulens svarer til en påvirkning på mere end 1 g (dvs. 9,81 m/s²), og flyet vil kortvarigt være ude af kontrol. Det kan som minimum sammenlignes med en tur i det Gyldne Tårn i Tivoli, hvor man på få sekunder oplever et fald på 55 m.

Piloter prøver selvfølgelig at undgå områder med kraftig turbulens, som i for eksempel en tordenbyge. Men turbulens i højderne omkring jetstrømmen er, i modsætning en meget synlig tordenbyge, ekstremt vanskeligt at forudsige og opdage i tide.

Vender vi tilbage til episoden den 14. november 2024, så viser flykort fra det pågældende tidsrum to grene af jetstrømmen med op til 2-3 gange stormstyrke mellem Island og Østgrønland. Omkring disse to grene af jetstrømmen indikeres der risiko for moderat turbulens indenfor et større område i højder fra cirka 8,3-14 km's højde (i flyjargon angives dette i fod, dvs. 25.000-42.000 fod) og stedvis kraftig turbulens indenfor et lidt mere afgrænset område i højden fra cirka 8,3-12,7 km's højde.

En pilot, der skulle over Grønland på en tur fra Stockholm til Miami, ville derfor være advaret om, at flyet skulle igennem jetstrømme med risiko for moderat turbulens og stedvis kraftig turbulens. Det er nok meget normalt med den slags advarsler på en så lang rute, men i langt de fleste tilfælde slipper flyet for at møde alvorlig turbulens. Men var der også andre fænomener end turbulens i forbindelse med jetstrømmen i spil den dag?



Illustration: Shutterstock

Intensitet	Påvirkning	Oplevelse i flyet
 Let turbulens	Man kan opleve en let belastning af sikkerhedsseler eller skulderstropper. Usikrede genstande kan forskydes lidt.	Madservering kan udføres, og der opstår kun få eller ingen problemer, når man går.
 Moderat turbulens	Man oplever en tydelig belastning af sikkerhedsseler eller skulderstropper. Usikrede genstande løsnes.	Madservice og gåture er vanskelige.
 Kraftig turbulens	Man tvinges voldsomt mod sikkerhedsseler eller skulderstropper. Usikrede genstande bliver slynget rundt. Flyet er kortvarigt (få sekunder) ude af kontrol.	Madservice og gåture er umulige.
 Ekstrem turbulens	Endnu mere kaotiske tilstande med et fly i naturens vold. Det anbefales at lande hurtigt efter, da flyet kan have fået skader.	Evt. panik blandt passagerne og passagerer kan komme til skade.

Tabel over de forskellige grader af turbulens med en beskrivelse af deres konsekvenser. De meteorologiske symboler for de forskellige styrker af turbulens er angivet. Graderne er forfatterens oversættelse til dansk fra de engelske: Light, Moderate, Severe, Extreme. Kilde: www.weather.gov

Bjergbølger kan have spillet en rolle

Her kommer et fænomen kaldet “bjergbølger” ind i billedet. Sådanne bjergbølger opstår undertiden omkring de grønlandske fjerde, og de dannes især, når en kraftig vind rammer næsten vinkelret på en bjergkæde, og den tilhørende luftmasse bevæger sig over bjergene. Bjergbølgerne er ikke i sig selv turbulente, idet luften bevæger sig udramatisk op og ned. Men i lav højde kan afledte effekter af dem give anledning til turbulens af moderat til kraftig styrke, ligesom de i den sidste fase af deres livscyklus kan give kraftig turbulens, når de bryder i lighed med bølger på stranden.

Normalt er bjergbølger ikke farlige for fly i 10-12 km's højde, men under særlige meteorologiske forhold kan bjergbølgerne dog brede sig helt op til disse højder. Når bølger af denne type bryder op og bliver ustabile, kan de give anledning til kraftig turbulens og endda ekstrem turbulens, selv i 10-12 km's højde.

Spørgsmålet er, om der var særlige meteorologiske forhold den pågældende dag?

Teorien bag bjergbølger foreskriver, at når de har mulighed for at brede sig vertikalt, vil man se kraftige vinde ved overfladen i kystzonen tæt ved bjergene. Det var i høj grad

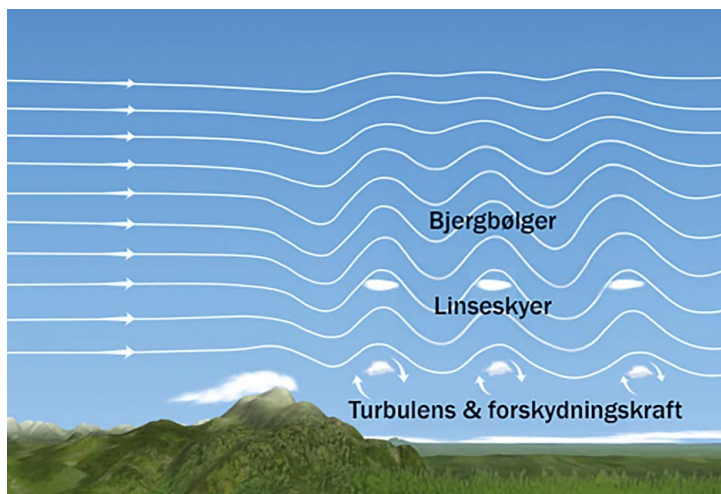


Illustration af strømningmønstret ved bjergbølger. Disse giver anledning til, at der dannes karakteristiske skytyper kaldet linseskyer ved toppen af bølgen. Derudover fremgår det at hvirvlerne med turbulens forekommer under selve bjergbølgen. Illustration efter D.R.Duran and J.B.Klemp, 1983/The COMET Program/eutrain.org

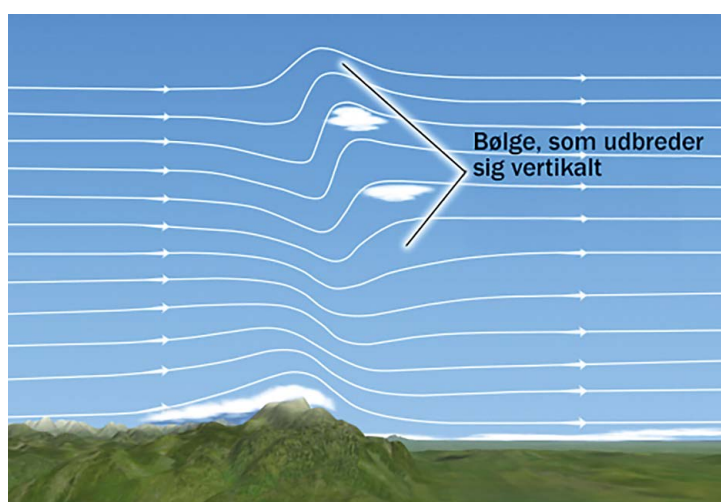


Illustration af en situation, hvor vejrforholdene medfører, at bjergbølgerne breder sig opad i atmosfæren. Man ser stadigvæk linseskyer omkring bølgens top. Illustration efter D.R.Duran and J.B.Klemp, 1983/The COMET Program/eutrain.org

turbulens, der nok vil være usynlig, men piloterne har muligvis kun se skyer af en bestemt type kaldet linseskyer tæt på.

Gennem meteorologer fra Island har jeg fået et satellitbillede (Figur 9) fra den 14. november meget tæt på det tidspunkt, hvor flyet mødte den kraftige turbulens. Ved kysten ud for Sydøstgrønland ses nogle hvide skyformationer netop i det område, hvor flyet stødte på den kraftige turbulens. Jeg tolker disse skyer som bjergbølger med vertikalt vokseværk, derudover ser man en afstand mellem skyerne og selve bjergene inde ved kysten. Teorien for bjergbølger indebærer, at når man ser denne form for barrierer, før bjergbølgen dannes, kan afledte effekter af bjergbølgen give farlig turbulens.

Hold sikkerhedsselen spændt under flyveturen

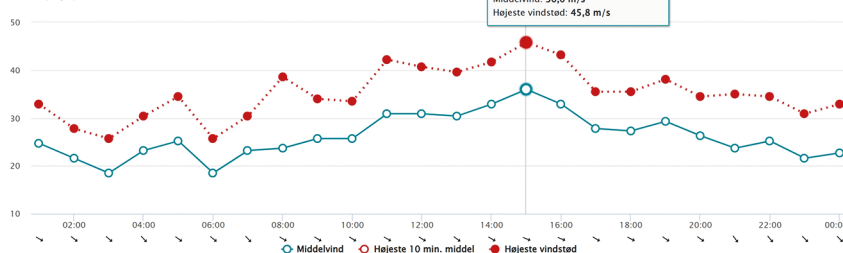
Der forskes meget i at blive bedre til at forudsige kraftig turbulens i de høje højder som de industrielle fly rejser i. Der er endnu ikke udviklet et perfekt produkt. Men der er for nyligt udviklet et nyt turbulensindeks, kaldet Eddy Dissipation Rate (EDR), der på dansk kan oversættes til "hvirvel-nedskalings-hastighed". EDR udregnet med forskellige vejrmødeler havde faktisk advaret om, at der kunne forekomme kraftig turbulens højt over fjeldene ved Sydøstgrønland den 14. november.

Årsagen til, at SAS-flyet stødte på kraftig turbulens den 14. november, kan altså efter min mening være kraftige bjergbølger, der forplantede sig vertikalt og brød op, måske kombineret med en effekt fra en jetstrøm i området.

På mange lange flyvninger, for eksempel fra Europa til USA, er piloterne nødt til at krydse en eller flere jetstrømme og af og til bevæge sig over bjerge, hvor der kan forekomme bjergbølger, der på et tidspunkt vil bryde og en kort overgang give farlig turbulens. Det er fortsat meget vanskeligt at forudsige turbulensen omkring jetstrøm-

Ikermit 14. november 2024

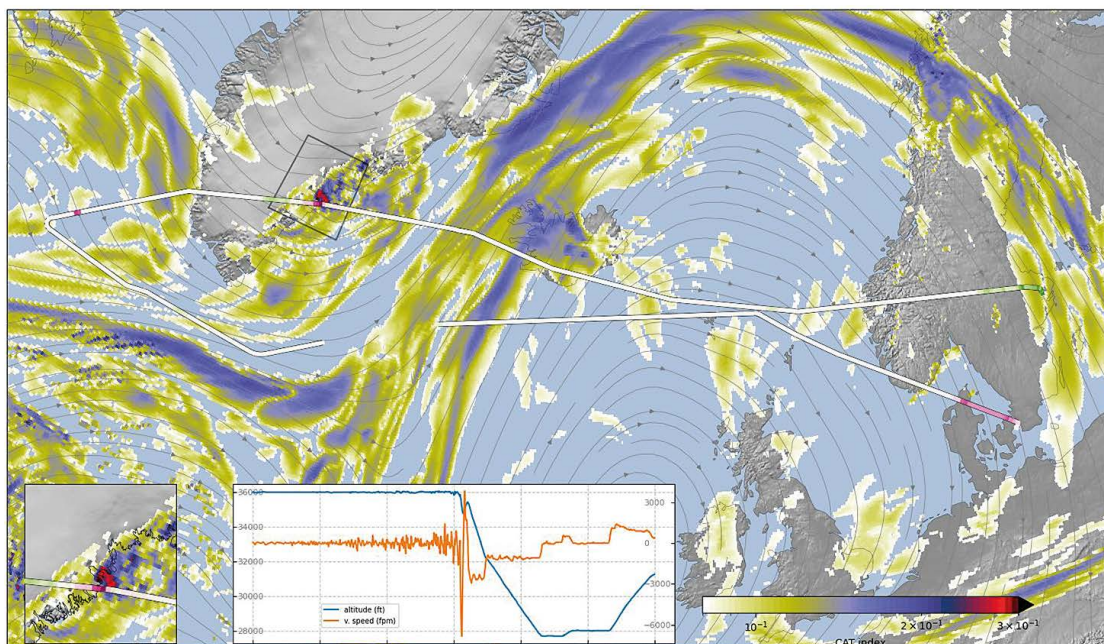
Vind (m/s)



Målinger af middelvinden og vindstød ved DMI's vejrstation Ikermit, der er placeret et ubeboet sted ved kysten af Sydøstgrønland. Det blev målt 36 m/s i middelvind, orkan starter ved 32,6 m/s. Kilde dmi.dk

tilfældet den 14. november 2024, hvor en af DMI's vejrstationer et øde sted i Sydøstgrønland målte vinde langt over orkanstyrke fra en retning der var stort vinkelret på bjergene. Når en bjergbølge breder

sig vertikalt, kommer bølgeenergien med, og teorien foreskriver, at når/hvis en bølge brydes, bliver energien nedskalaret i turbulente hvirvler i et koncentreret område tæt på selve bølgen. Det kan føre til kraftig



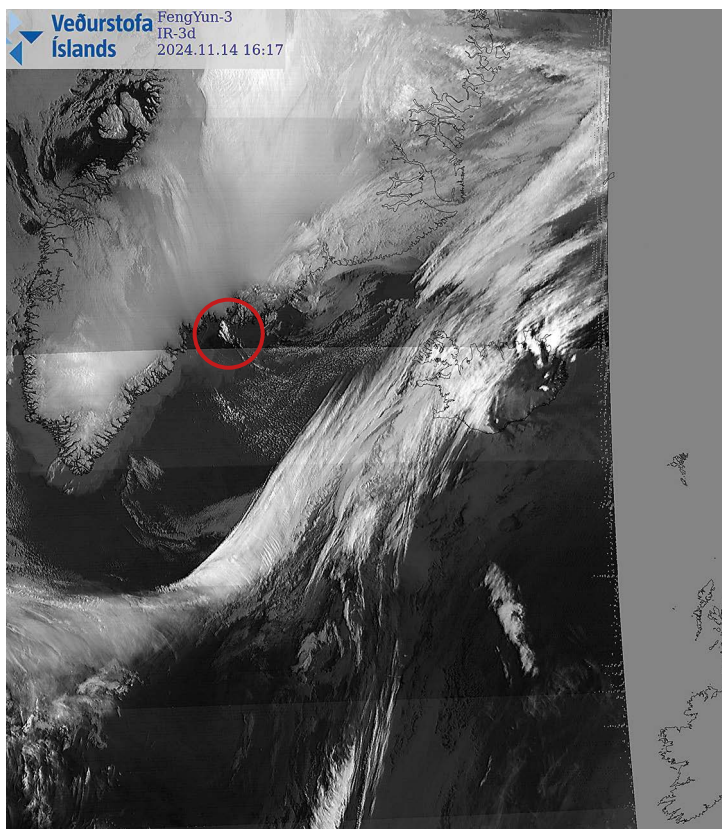
Kortet viser en prognose gældende for kl. 16 UTC (det tidspunkt SAS-flyet ramte kraftig turbulens) lavet med et nyt turbulensindeks fra den fælleseuropæiske vejrmødel IFS, overlagt med SAS-flyets rute (den hvide tykke streg). Det fremgår, at turbulensindekset advarer om fare for turbulens af alvorlig styrke omkring fjeldene ud for Sydøstgrønland.

Der er zoomet ind på det område omkring Sydøstgrønland, hvor flyveren mødte den kraftige turbulens. Derudover er der grafer med flyverens ændring af højde og den lodrette hastighedskomponent som funktion af tiden. Turbulensen afslører sig som en ekstremt hurtig ændring af højde, hvorefter piloterne selv vil ændre flyverens højde i et håb om at komme ud af hvirvlen med den kraftige turbulens. Kilde Guido Cioni.

me, og hvornår disse bjergbølger brydes.

Det betyder dog ikke nødvendigvis, at de meteorologiske forudsigelser for "High Level Turbulence" tit er dårlige. Man bør nemlig huske på, at turbulens optræder som mindre hvirvler med en ret kort levetid, og at risikoen for et møde med disse hvirvler i et større område, hvor der er forudsagt moderat til kraftig turbulens, er ret lille. Når et fly endeligt møder kraftig turbulens, advares andre fly, og de holder sig væk fra området i en periode.

Mødet med kraftig turbulens huskes for livet. Min fornemmelse er, at piloterne deler erfaringerne med andre, efter de er landet, og der oftest kommer forøget fokus på turbulens herefter. Selv fløj jeg til Wien kort efter hændelsen den 14. november, og her blev der sagt over højtaleren, at man anbefalede brug af sikkerhedssele under hele flyturen, da kraftig turbulens var vanskelig at forudsige. ■



Et satellitbillede gældende for den 14. november kl. 16.17 UTC. Man ser nogle hvide skyformationer lige ud for kysten i den sydøstlige del af Grønland (rød cirkel). Det er antageligt bjergbølger, der har bredt sig opad i atmosfæren.

Kilde: Den kinesiske satellit FengYung-3.

Kilder:

Artiklen er en redigeret udgave af artiklen Fangleg med grønlandske bjergbølger, oprindelig bragt i (eller skrevet til) Dansk Meteorologisk Selskab tidsskrift *Vejret*.

www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2021/20117-forecasting-clear-air-turbulence.pdf

www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/turbulence_stuff/turbulence/turbulence.htm

resources.eumetrain.org/data/3/304/print_2.htm

turbli.com/blog/a-turbulent-world-mountain-waves/

resources.eumetrain.org/data/4/452/print_4.htm

www.flightradar24.com/blog/sas-severe-turbulence-engine-shutdown/

Prøvetagning ved
Karrebæksmunde.
Foto: Forfatterne

Kort over Danmark
med koordinater
indtegnet for prøve-
tagningssteder:



Forfatterne



Cæcilie Heedal Dinsen
er kandidatstuden-
de i Environmental
Science
heedal@ruc.dk



Esther Shruti Haase
Øllgaard er kandi-
datstuderende i En-
vironmental Science
shruti@ruc.dk



Tor Salomonsen
Bachelor i Miljø Biologi
og TekSam Miljøplan-
lægning
salomonsen@ruc.dk



Lasse Aggerholm,
kandidatstuderende i
Chemical Biology
aggerholm@ruc.dk



Vejleder på projektet:
lektor Per Meyer Jepsen
pmjepsen@ruc.dk.

Alle ved Roskilde
Universitet.



HOVEDPINEPILLER

– en hovedpine for miljøet?

Når vi bruger hovedpinepiller med paracetamol, kan dette stof havne i vandmiljøet. En gruppe studerende fra RUC har som del af deres bachelorprojekt undersøgt, hvor meget paracetamol, der faktisk findes i danske farvande, og hvordan paracetamol kan påvirke organismer som vandlopper.

Har du nogensinde over-
vejet, hvor dine hovedpi-
nepiller forsvinder hen,
efter at du har indtaget
dem. Og er de så ufarlige som vi
tror? De spørgsmål har vi undersøgt
som en del af vores bachelorprojekt
på Roskilde Universitet.

Når du tager en Panodil eller tilsva-
rende hovedpinepille, så er det, der
lindrer din smerte, et kemisk stof
der hedder Paracetamol. Paraceta-
mol tager en tur gennem kroppen

via blodstrømmen, hvor lægemidlet
bliver primært nedbrudt i leveren,
hvorefter paracetamolen samt dens
nedbrydningsprodukter også kaldet
metabolitter, transporteres yderli-
gere via blodstrømmen til nyrerne,
hvorfra de udskilles, hovedsageligt
i urinen. Spildevandet fra dit toilet
behandles på et renseanlæg, men
på trods af dette forbliver en del af
paracetamolen og stoffets metabo-
litter i vandet efter spildevandsbe-
handlingen. Det rensede spildevand
frigives løbende til vandmiljøer, hvor

det kan påvirke de organismer, der
lever i vandet. Når paracetamol ad
denne vej er kommet ud i vandmil-
jøet, kan det bundfældes og på den
måde binde sig til sediment- eller
jordpartikler og med tiden sive ned
og forurene grundvand og dermed
drikkevand.

Feltprøver og vandloppesforsøg
Mennesker over hele verden i alle
aldre tager paracetamol. Paraceta-
mol anses for at være ufarligt, når
man tager den anbefalede dosis.

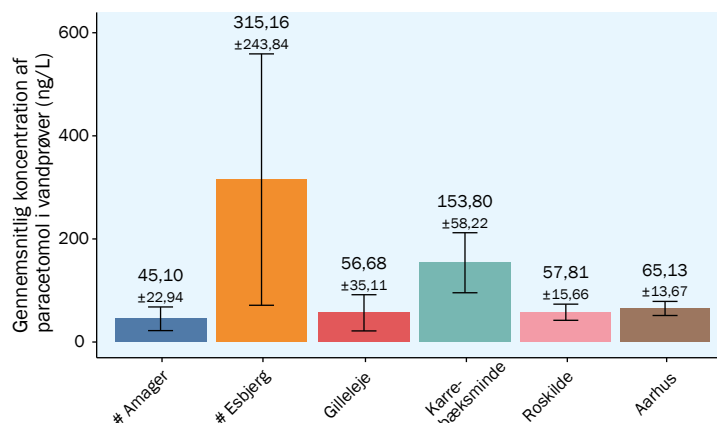
Det er endda blevet anbefalet af WHO som et sikkert og omkostningseffektivt lægemiddel. Der er dog nyere undersøgelser på mus, der viser en sammenhæng mellem moderens eksponering for paracetamol og ændringer i seksuel adfærd, testosteronniveauer, udvikling af testikler m.m. hos afkommet.

På baggrund af denne viden om det store forbrug af paracetamol, den konstante frigivelse til vandmiljøer og potentielle effekter hos afkommet af mus, fandt vi det interessant at undersøge først og fremmest de nuværende koncentrationer af paracetamol i dansk havvand – mere specifikt koncentrationen på 6 forskellige danske kyststrækninger. Men dernæst også interessant at undersøge, hvordan afkommet af den vandlevende vandloppe, *Acartia tonsa*, bliver påvirket af forskellige paracetamolkoncentrationer som en test af, hvordan paracetamol generelt kan påvirke små vandlevende organismer.

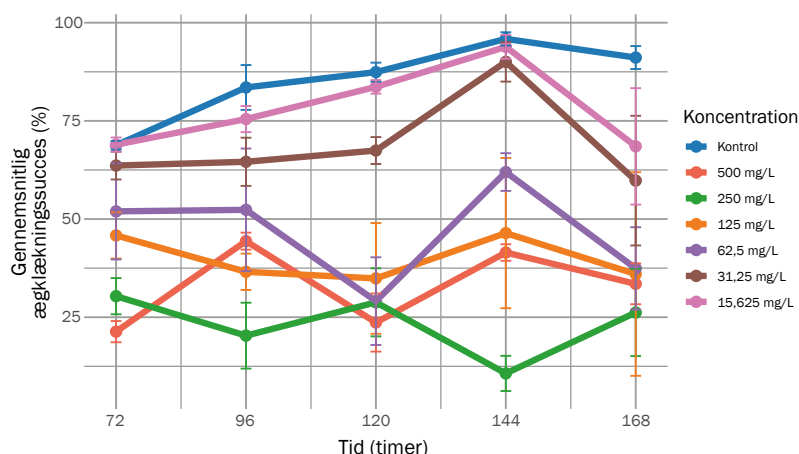
For at få en geografisk spredning på prøverne, så de repræsenterer de fleste danske farvande, tog vi prøver ved Amager, Esbjerg, Gilleleje, Karrebæksminde, Roskilde og Aarhus. Fælles for alle prøveudtagningsstederne er, at de ligger i nærheden af renseanlæg, hvor vi vil forvente at finde de højeste koncentrationer. Vandprøverne blev efter indsamling filtreret, og dernæst analyserede vi paracetamolkoncentrationen.

Paracetamol i alle prøver

Vores analyse viste, at der var paracetamol i alle de indsamlede vandprøver. Der var mest paracetamol i prøverne fra Esbjerg med 315 ng/L og Karrebæksminde med 153 ng/L (se figur 1). Vores resultater peger altså på, at paracetamol har fundet vej til det danske havmiljø. Der er dog visse usikkerheder forbundet med resultaterne for analysen. Som tidligere nævnt fjerner renseanlæg ikke al paracetamol fra vandet, hvorfor man kan forvente, at der er højere koncentrationer af paracetamol omkring et renseanlæg, fordi



Figur 1. Gennemsnitlig paracetamolkoncentration af tre prøver fra hver lokalitet. Bemærk, at prøveudtagningslokaliteter markeret med et hashtag (#) betyder, at disse prøver ikke blev kørt sammen med de andre. Dette er en potentiel fejlkilde, da man ikke kan være sikker på, at prøverne har haft præcis samme behandling. De tynde lodrette bjælker angiver standardafvigelsen, dvs. hvor stor variation der er mellem de tre prøver for hver lokalitet. Som det fremgår, målte vi den højeste koncentration ved Esbjerg, men her finder vi også klart den største spredning på de tre prøver.



Figur 2. Gennemsnitlig procentvis ægklækningssucces for vandloppeæg udsat for høje koncentrationer af paracetamol (mg/L) over tid. Vi startede med cirka 25.000 vandloppeæg fordelt i 21 kolber med 6 forskellige koncentrationer af paracetamol samt 1 kontrol. Vi lod æggene blive i kolberne i 72 timer, hvorefter vi tog en prøve på 10 mL fra kolben, hældte det ud i en petriskål og talte antallet af æg og larver i prøven. Ægklækningssuccesen blev på den måde målt i de enkelte petriskåle. Dette gjorde vi med 24 timers interval i 4 dage, i alt 168 timer.

På figuren kan man se, at de 2 laveste koncentrationer, 15,625 mg/L (lyserød) og 31,25 mg/L (brun) samt kontrollen (blå) – alle har en ægklækningssucces på 60 % eller derover gennem hele forsøgsperioden. Til sammenligning ligger ægklækningssuccesen for de 4 højeste koncentrationer (lilla, orange, grøn og rød) under 60 % gennem forsøget på nær et enkelt punkt på den lilla kurve, der er 62%.

de er et samlingspunkt for spildevand, der indeholder paracetamol. På den anden side kan der generelt være meget mere paracetamol i havvandet end vores fundne koncentrationer. Paracetamol kan nemlig transformeres i miljøet, både af

rent fysiske processer forårsaget af for eksempel sollys eller bevægelse og biologisk af dyr eller andre organismer i miljøet. Dette kan ændre på det oprindelige eller nedbrudte paracetamol-molekyle. Nogle af disse biotransformerede former for



Laboratoriemetoder

For at bestemme mængden af paracetamol i vores prøver skulle vi først have paracetamolen skilt fra havvandet. Det gjorde vi ved at lade prøverne løbe gennem et filter med en porestørrelse, der er egnet til at filtrere det ønskede stof fra (det kaldes på fagsproget for fastfase-separation). I vores tilfælde var porestørrelsen 8 nanometer. Da alt havvandet var løbet igennem, befandt paracetamolen sig i filtret. Filtret kunne vi derefter skylle med et opløsningsmiddel (metanol), som fik paracetamol til at løbe igennem filtret. Resultatet var dermed en blanding af metanol og paracetamol, som vi dernæst kunne analysere ved hjælp af en metode kaldet massespektrometri. I et massespektrometer bringes molekylerne, der skal analyseres, på gasform og ioniseres. Ionerne vil derefter vandre gennem apparatet med forskellig hastighed afhængig af deres vægt. Ved hjælp af en computer registreres det, hvornår partikler er kommet igennem apparatet, hvorefter komponenterne af molekylet kan analyseres. Ved hjælp af massespektrometri kan man undersøge mange forskellige substanser, for eksempel indholdet af paracetamol i en vandig opløsning.



Hvad er en vandloppe?

Vandloppe er en gruppe af zooplankton, der kan findes i både fersk- og saltvandsmiljøer. Under gruppen af marine vandloppe findes arten *Acartia tonsa*, som er hjemmehørende i Danmark. Livscyklussen for *A. tonsa* tager cirka 2 til 3 uger, hvor vandloppen efter ægklækning når larvestadiet nauplii. Herefter følger 5 stadier af såkaldte copepoditter, før vi har en fuldvoksen vandloppe.
← Larve (nauplius) af vandloppen *A. tonsa*. Foto: Forfatterne.

paracetamol, såsom p-aminophenol og p-benzoquinon, kan være endnu mere giftige end den oprindelige form af paracetamol.

I vores analyse undersøgte vi kun koncentrationen af paracetamol. Hvis vi også havde inkluderet metabolitterne fra nedbrudt eller biotransformeret paracetamol i analysen, ville de samlede koncentrationer formentlig have været endnu højere, end dem vi fandt.

Kan hæmme vækst af vandloppe

For at undersøge, hvordan de danske koncentrationer af paracetamol påvirker hjemmehørende akvatiske organismer, brugte vi som tidligere nævnt vandloppen *Acartia tonsa*. Vandloppe er en vigtig forbindelse mellem det mikroskopiske planteplankton (fytoplankton) og dyr læn- gere oppe i fødekæden i de marine økosystemer, og derfor er de en relevant testorganisme.

I vores undersøgelse brugte vi 500 mL glaskolber til at lave forskellige opløsninger af paracetamol i havvand, både med koncentrationer svarende til dem, vi havde målt på de 6 kyststrækninger, og væsentlig højere koncentrationer. I disse kolber anbragte vi en ens mængde vandloppeæg, og efter 72 timer tog vi hver 24. time en prøve ud for at bestemme antallet af klækkede æg, og hvor meget vandloppelarverne (kaldet nauplii) voksede.

Eksperimentet viste, at jo højere koncentration af paracetamol, jo færre æg klækkede og desto mindre voksede vandloppelarverne – for den højeste koncentration var der en negativ vækst (figur 2 og 3). Vores forsøg tyder altså på, at paracetamol hæmmer væksten og ægklækningen af vandloppen *A. tonsa*, når koncentrationen bliver høj nok.

For de koncentrationer, der var miljørelevante – altså dem, der repræsenterer hvad vi målte i felten – var der dog ikke en signifikant effekt på vandloppernes vækst i

forhold til kontrolgruppen (figur 4). Når vi i vores forsøg testede højere koncentrationer end dem, vi havde målt i felten, er det fordi, vi dels ville teste, om der overhovedet ses en effekt på vandlopperens vækst og ægklækning ved eksponering til højere paracetamol-koncentrationer, og i bekræftende fald, hvor høj koncentrationen skal være, før *A. tonsa* faktisk bliver påvirket. Dette er også interessant, fordi man kan bruge den viden til at forsøge at forudse effekten hos *A. tonsa*, hvis koncentrationen af paracetamol i miljøet bliver meget højere i fremtiden på grund af den stadige tilførsel af paracetamol med det rensede spildevand.

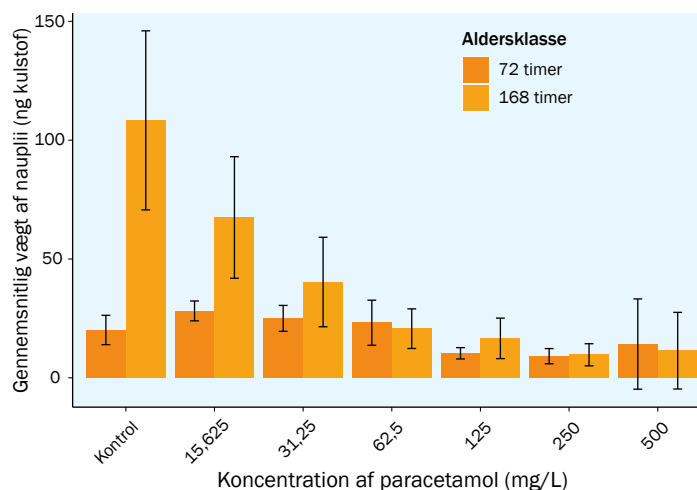
Hvilke konkrete mekanismer, der får paracetamol til at hæmme vækst og klækning af æg hos denne vandloppe, fortæller vores forsøg ikke noget om. Men ved at søge i litteraturen, kan vi få et bud på mulige forklaringer. Når vandloppeæg oplever ugunstige forhold, kan de som en form for overlevelsesmekanisme gå i dvale. Og hvis det er det, der er sket i vores forsøg, vil det jo netop kunne ses som et fald i vækst og ægudvikling. Hvis de ugunstige forhold er forbigående, kan vandlopperne komme ud af deres dvale igen, og man vil så opleve, at vækst og udvikling normaliseres.

En anden mulig forklaring kan være, at paracetamolen forhindrer DNA-replikation i en bestemt fase af celledelingsprocessen (S-fasen) i vandlopperne. Herved forbliver cellerne i S-fasen, og derfor hæmmes celledeling og dermed vækst og ægklækning.

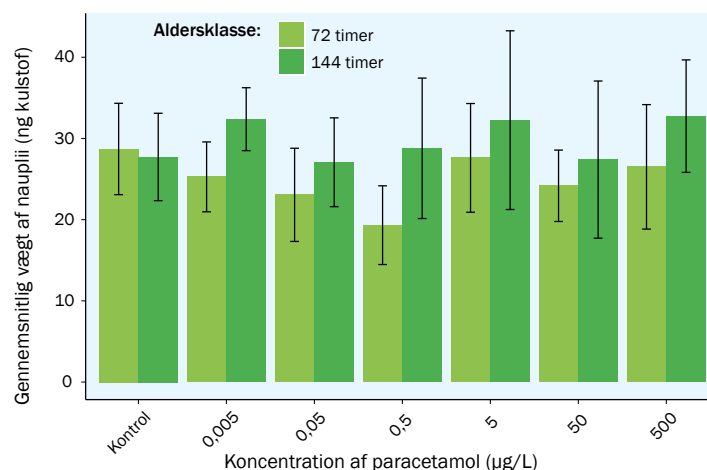
Uanset hvilken mekanismer, der er på spil, er konklusionen, at vandloppen *Acartia tonsa* ikke reagerer positivt på paracetamol i miljøet.

Behov for mere regulering?

Er paracetamol så ufarligt, som vi tror? Vores forsøg viser, at der er en klar sammenhæng mellem høje koncentrationer af paracetamol og hæmning af vækst samt udvik-



Figur 3 viser den beregnede gennemsnitlige vægt af klækkede vandloppelarver udsat for forskellige høje paracetamolkoncentrationer efter henholdsvis 72 timer og 168 timer. De sorte bjælker viser standardafvigelsen. Det er tydeligt, at vandloppelarvernes vækst er mindre, jo højere paracetamolkoncentrationen er.



Figur 4 viser til sammenligning den beregnede gennemsnitlige vægt af klækkede vandloppelarver ved miljørelevante koncentrationer (altså svarende til dem, vi målte på de 6 lokaliteter). Bemærk, at koncentrationen her er angivet i mikrogram (altså en faktor 1000 mindre end i den anden figur), og at eksponeringstiden er henholdsvis 72 og 144 timer. De sorte bjælker viser standardafvigelsen. Der ses ikke nogen signifikant forskel på væksten af larverne ved disse koncentrationer i forhold til kontrolgruppen.

lingen hos vandloppen *A. tonsa*. Det er dog vigtigt at bemærke, at ved de koncentrationer, vi faktisk har målt på de 6 kyststrækninger, kunne vi ikke observere signifikante effekter på vandlopperne. Men det betyder ikke, at der ikke er grund til bekymring. Det konstante globale forbrug og deraf følgende udledning via spildevandsudledning kan medføre en ophobning af paracetamol i vandmiljøet og dermed en risiko for utilsigtede langtidseffekter på akvatiske organismer.

Europa-Parlamentet har på nuværende tidspunkt ikke fastsat nøjagtige grænseværdier for mikroforurenende lægemidler i spildevandet fra renseanlæg, og derfor er paracetamol i miljøet en problemstilling, der hidtil er gået under radaren. Vores bachelorprojekt giver et fingerpeg om, at der kan være behov for mere regulering på området, så vi kan tage hovedpinepiller uden at vi dermed giver miljøet en utilsigtet hovedpine. ■

HJALTE GIK EFTER SIN INTERESSE FOR MATEMATIK

At matematikstudiet hurtigt skulle føre til et job i en HR-afdeling, havde Hjalte ikke forestillet sig. Men han ofrede i det hele taget ikke mange tanker på karriere og jobmuligheder under studiet, hvor han bare fordybede sig i matematikken.

Det var ret klart for alle, at Hjalte Düsterdich Vejrbæk skulle på universitetet direkte efter gymnasiet. Det var også ret klart, at han skulle læse matematik. Hans far var matematiker, hans to ældre søstre havde læst matematik, og i gymnasiet kunne han godt lide matematik.

»Jeg overvejede også fysik eller ingeniør, men i gymnasiet opdagede jeg, at det med forsøg og journal-skrivning ikke lige var mig. I stedet syntes jeg det var hyggeligt at sidde og regne på ting. Så jeg var ikke i tvivl og havde ikke brug for et sab-batår: Jeg ville læse matematik.«

Valget faldt på Syddansk Univer-sitet, og Hjalte flyttede fra Køge til Odense som 19-årig. Der bor han stadig efter endt studie, og i dag arbejder han i Region Sjællands HR-afdeling, som ligger i Sorø. Jobtitlen er analysekonsulent og RPA (Robotics Proces Automation) udvikler.

»Jeg hjælper blandt andet med at automatisere administrative processer, som ellers udføres af mennesker – det kan for eksempel være at taste en masse data ind i et lønsystem.«

Hjalte havde ikke lige set sig selv arbejde i en HR-afdeling – i det hele

taget havde han ikke rigtig set sig selv i nogen bestemt jobfunktion eller på nogen bestemt arbejds-plads, for karriere og jobmuligheder var han ikke synderligt optaget af, mens han læste.

»Jeg valgte studie efter mine inte-resser, og på studiet valgte jeg fag og kurser efter mine interesser. I starten kunne jeg bedst lide alge-bra, altså at undersøge strukturer, mens jeg brød mig mindre om diskret matematik. Man kan ikke være 100 procent optaget af alle fag, og det er fair nok.«

Studiestart kan være ret kaotisk

Inden han startede på universite-tet, havde Hjalte deltaget i en uges matematik camp på DTU (arrange-ret af Ungdommens Naturviden-skabelige Forening), og det viste sig at være en god investering, synes han:

»Der mødte jeg andre, der også skulle starte på uni. Nogle var virke-lig nørdede – det var jeg vist også selv – men det var en god intro-duktion til, hvad matematik på uni er. I gym regner man for eksempel meget, og der var en ligefrem rute til tingene, men det er ikke altid så ligefrem på uni. Der handler det ikke kun om funktioner, men også andre ting som de færreste har stiftet bekendtskab med i gym – for

eksempel bevisbaseret lineær alge-bra og gruppeteori. Der var campen en lille efterligning af, hvad der foregår på uni, og dermed en god forberedelse.«

Studiestart kan være lettere kaotisk for de fleste – og sådan tænker Hjalte også lidt tilbage på sin stu-diestart.

»Man skal være klar på mange nye indtryk meget hurtigt. Der er smæk på: Hele tiden nye sociale arrange-menter, samtidig med at man skal finde sin egen rytme i alt det nye. Ingen holder dig i hånden på uni, ingen opdager det, hvis du ikke dukker op, og der er ingen lærere der går rundt og spørger, hvordan man har det.«

De nye frie forhold bekom Hjalte vel:

»Det var befriende. For mig var det ikke at være usynlig. Det var frihed til selv at vurdere, hvor og hvordan jeg ville bruge min tid.«

Ud over at dyrke de dele af mate-matikken, der interesserede ham, arbejdede Hjalte som instruktør og med outreach på Institut for Matematik og Datalogi – studiejobs hvor han hjalp andre studerende og potentielle studerende.

»Det betød mere for mig end at få studiejob i en virksomhed. Jeg var



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

ikke bange for ikke at få job bag-
efter – det var jo en tid, hvor vi fik
at vide, at der var jobs til os, når vi
blev færdige.»

Arbejdsløshed er ikke nogen fed oplevelse

Fra Hjalte blev færdig til han star-
tede i sit nye job i Region Sjælland,
gik der 3-4 måneder.

»Jeg fik ret hurtigt job, men det var
faktisk hårdt, at det ikke skete lige
med det samme. At gå arbejdsløs
er virkelig ikke nogen fed oplevel-
se. Man keder sig, og man mister
motivationen for noget som helst.
Jeg er virkelig glad for, at jeg ikke
gik længere. Det er bedre at have et
formål, noget at stå op til.»

Til trods for at Hjalte nåede at mær-
ke arbejdsløsheden på egen krop,
lyder hans råd til andre stadig:

»Vælg det, der er spændende for
dig. Det, som du kan holde ud at ar-
bejde med. Hvad det hele skal ende
med, er sekundært. Det kommer
med tiden og skal nok løse sig.» ■



Foto: Morten Mossin Madsen.

Om Hjalte

Hjalte Düsterdich Vejrbæk havde sin gymnasietid på HTX Køge, hvorefter han startede på matematikstudiet på Syddansk Universitet i 2019. Her skrev han speciale om C^* -algebraer og fik sin kandidatgrad i juni 2024. I sin studietid har han arbejdet som instruktør på Institut for Matema-
tik og Datalogi og engageret sig i Ungdommens Naturvidenskabelige Forening (UNF), hvor han har været formand for den lokale Odenseafde-
lings bestyrelse og siden 2024 har siddet i UNF's landsbestyrelse.

I dag arbejder Hjalte som analysekonsulent og RPA-udvikler ved Region Sjælland i Sorø.



Bliv studerende for en dag

Som **Studerende for en dag** følger du undervisningen på den uddannelse, du er interesseret i. Du spiser frokost med en studerende, som viser dig rundt – og du bliver klogere på, om uddannelsen er den rigtige for dig.

Besøg **Anvendt matematik, Biokemi og molekylær biologi, Biologi, Biomedicin, Datalogi, Farmaci, Fysik, Kemi, Medicinalkemi, Matematik, Matematik-økonomi** eller **Kunstig intelligens** på SDU i Odense.

Tilmeld dig på
sdu.dk/nat/studerendeforendag



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

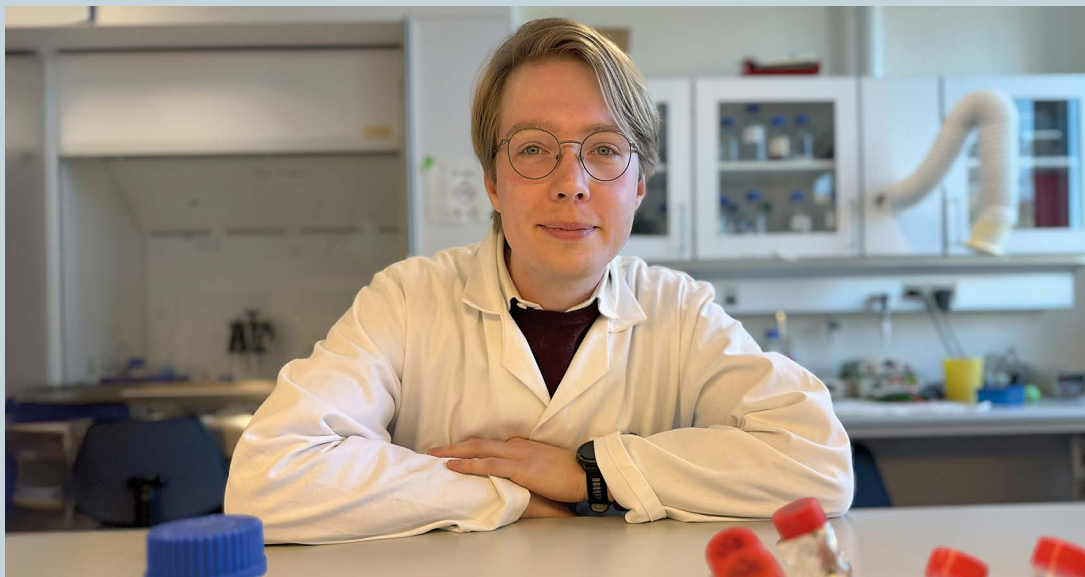


Foto: Sofie Dupont

Dåbshandlinger i laboratoriet

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Hvis du læste med på sidste nummers bagside, fik du forhåbentlig det indtryk, at det at navngive fossiler er en alvorlig sag. I det hele taget er navngivning en vigtig sag indenfor videnskab. Forudsætningen for, at vi kan være sikre på, at vi taler om det samme, er jo, at vi er enige om, hvad tingene hedder – det er derfor, vi har fagsprog.

Umiddelbart lyder "Bootylicious" eller "Cushion Cruncher" måske ikke så fagsprogsagtigt, tænker du nok. Men det er faktisk navne, som Maltje Kjaer Bendtsen og kolleger i forskningsprojektet En'Zync har givet nye plastiknedbrydende enzymer, de har opdaget.

»Vi bruger de navne både, når vi snakker med hinanden i laboratoriet, og når vi præsenterer vores forskning i artikler og ved videnskabelige konferencer«, fortæller han.

Maltje er ph.d.-studerende ved Interdisciplinary Nanoscience Center (INANO) ved Aarhus Universitet, og i forskningsprojektet En'Zync arbejder han med sine kolleger på at finde og udvikle enzymer, som kan nedbryde plastiktper, vi i dag ikke har gode metoder til at genanvende. Det gælder for mange typer plast indenfor den gruppe, vi kalder hærdeplast, som har det tilfælles, at det ikke kan smeltes og derfor ikke kan genanvendes gennem konventionelle metoder. Blandt disse finder vi polyester, der for eksempel bruges i vindmøllevinger, og polyurethan (PUR), som for eksempel bruges til isoleringsskum.

»Vi kalder vores nye enzym for Bootylicious, fordi det nedbryder den plastik, der findes i støvler, mens Cushion Cruncher har fået sit navn, fordi det nedbryder plastikskum, som du kender fra puder. For mig er det superfedt at være i en gruppe, hvor man kan have det sjovt, imens man laver vigtig forskning – og hvor man kan få ret overfor sin professor på nogle områder!« siger Maltje.

Den mere formelle praksis i navngivning af enzymer er, at man giver enzymet endelsen "-ase", og foran dette sætter man navnet på det stof (substrat), som enzymet nedbryder. Hvis det for eksempel er PUR (altså polyurethan), vil man kalde et sådant enzym for en (poly) urethanas eller en PURase. Fagfolk vil således bare ved at læse navnet kunne fortælle, at vi snakker om et enzym, og at det nedbryder PUR. Men navnet er i praksis en gruppebetegnelse, fordi det omfatter alle enzymer, der kan nedbryde PUR.

Derfor har Maltje og kolleger ofte brug for at være mere specifikke. Og det gør de så med tal og formelle betegnelser for eksempel BL70 og CC60, som er navne og numre der kommer fra screeningsprocessen.

»Men det bliver jo ikke så formidlingsvenlige navne – selv for os fagfolk. Derfor er disse "dåbshandlinger" et lille åndehul, hvor forskerens personlige smag og præferencer godt kan spille ind på en både elegant, fyndig og morsom måde (hvis man er heldig). Forskere er også mennesker!«, slutter Maltje.