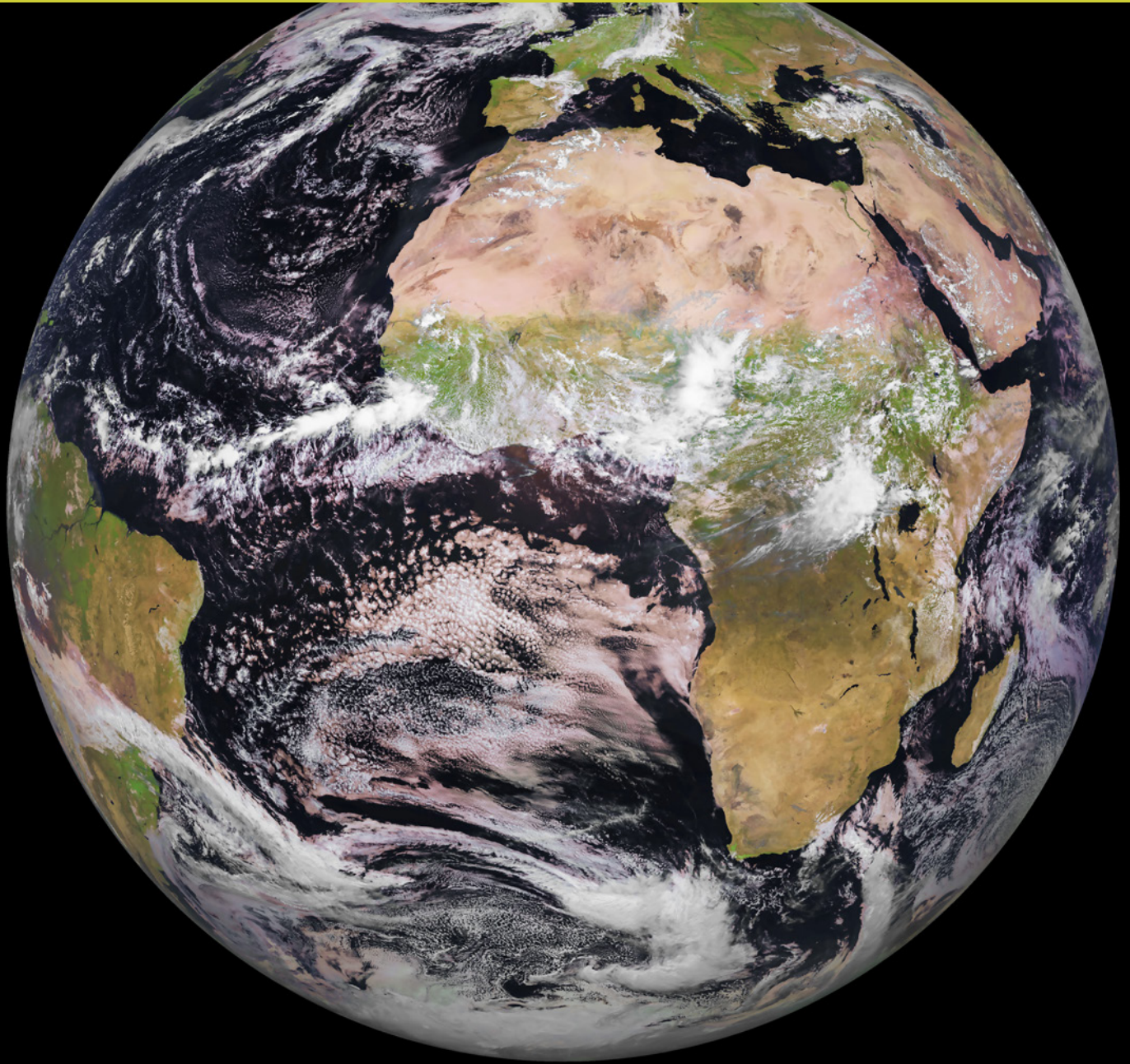


NR. -
02
SEP.
·2024·

geo viden



FORTIDENS KLIMA VISER VEJEN TIL FREMTIDEN

MØD KLIMADETEKTIVERNE,
SOM FORSKER I ISKERNER
OG MIKROFOSSILER

BLIV KLOGERE PÅ
KLIMAMODELLER, DRIVHUSGASSER
OG FEEDBACK-EFFEKTER

INDHOLD

3 Bliv klog på, hvad der **STYRER JORDENS KLIMA.**

4 Hvad kan arkæer, dinoflagellater, og kokkolitter bruges til?

6 Geofysiker Helle Kjær studerer **ISKOLDE KERNER FRA INDLANDSISEN.**

12 Dyk ned i **DEN STORE GRAFIK OM KLIMAET** i fortiden og fremtiden.

14 Geolog Kasia Sliwinska fortæller, hvordan hun bruger **MIKROFOSSILER TIL AT STUDERE FORTIDENS KLIMA.**

18 Hvorfor er Jorden **EN PLANET I UBALANCE?**

20 Meteorolog Eigil Kaas forklarer, hvordan **KLIMAMODELLER VIRKER.**

24 Geolog Camilla S. Andresen nærstuderer, hvad **INDLANDSISENS GLETSJERE SENDER UD** i grønlandske fjorde.

28 Palæontologen Nicolas Thibault aflæser **FORTIDENS KLIMAFORANDRINGER SOM MUSIK** i sedimenter.

32 Biolog Sofia Ribeiro undersøger hvordan **ÆLDGAMMEL DNA KAN HJÆLPE OS** i fremtiden.

MØD KLIMADETEKTIVERNE!

Klimaforskere er som detektiver, der studerer fortidens klimænderinger i iskerner og ældgamle sedimenter. Deres mission er at lære af fortiden og ruste os til fremtiden, og i dette nummer af Geoviden kan du møde nogle af dem.

Palæklimatologer. Det klinger flot – og lidt langt. Men måske er det meget passende, når nu ordet dækker over en gruppe af forskere, som studerer, hvordan klimaet var i fortiden – for virkelig lang tid siden. Faktisk flere millioner år.

Det var før, der fandtes instrumenter, som kunne måle temperaturer, luftfugtighed og vindforhold. Derfor kan palæklimatologerne med rette kaldes en slags klimadetektiver, der følger spor og samler brikker til det store puslespil, som udgør fortidens klima.

I dag er en stadig større mængde drivhusgasser i atmosfæren årsag til, at den globale gennemsnits-temperatur stiger. Menneskers aktiviteter medfører, at der højst sandsynligt bliver udledt mere CO₂ til atmosfæren på kortere tid end nogensinde tidligere i planetens historie.

Takket være palæklimatologers og andre klimafor-skeres arbejde kan vi sætte nutidens klimaforandringer i perspektiv og sammenligne udviklingen med andre klimatiske perioder i Jordens historie. På den måde kan viden om fortiden hjælpe os med at forstå, hvad der venter os i fremtidens mulige klimascenarier.

I dette nummer af Geoviden fortæller palæklimatologer med forskellige faglige baggrunde om deres arbejde, hvor de blandt andet undersøger mikrofos-siler, luftbobler i iskerner og ældgammel DNA.

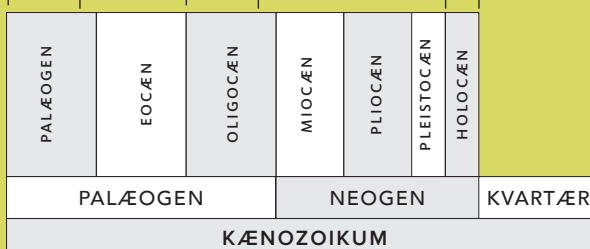
Når sidste side i bladet her er vendt, ved du meget mere om, hvad forskerne kan lære af fortiden, hvordan det kan ruste os til fremtiden – og forhåbentlig har du fået styr på at udtale ordet palæklimatolog og kan fortælle andre, hvad den slags folk egentlig laver. Det er vigtige sager.

God læsning!

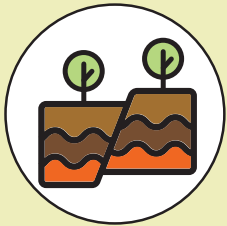


FIE KRØYER DAHL
REDAKTØR OG SKRIBENT

4600 MIO. ÅR SIDEN
PRÆKAMBRIUM
541
KAMBRIUM
485
ORDOVICUM
444
SILUR
PALÆOZOIKUM
419
DEVON
359
KARBON
299
PERM
252
TRIAS
201
JURA
MESOZOIKUM
145
KRIJDT
66
PALÆOGEN
KÆNOZOIKUM
23
NEOGEN
2,58
KVARTÆR
NUTID



TEKTONISKE BEVÆGELSER er processer, hvor Jordens kontinentalplader flytter sig. Det foregår over millioner af år og medfører store klimaforandringer:



Kontinenternes placering:

Hvis et kontinent bevæger sig mod ækvator, kan

det få et varmere og mere tropisk klima. Omvendt, hvis et kontinent bevæger sig mod polerne, kan det få et koldere klima.

Bjergkædedannelse: Når kontinentalplader kolliderer, kan de danne store bjergkæder, som påvirker vind og nedbør.

Havbundsspredning og havniveau:

Når tektoniske plader bevæger sig væk fra hinanden, kan det føre til det, der hedder havbundsspredning. Her dannes ny vulkansk havbund, og processen kan føre til, at havniveauet hæves. Det kan påvirke kystklimaet.

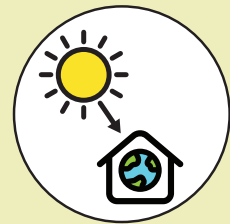
Superkontinenter: I en periode for omkring 370 til 245 millioner år siden var Jordens kontinenter samlet i superkontinentet Pangæa, før de blev adskilt til deres nuværende placeringer. Et stort sammenhængende kontinent har et tørt indre, fordi der er langt til kysterne, hvor fugten kommer fra.

DRIVHUSGASSER

Mængden af drivhusgasser som f.eks. CO₂ og vanddamp i atmosfæren er afgørende for, hvor varmt der er på Jorden:

Mindre drivhusgas = lavere gennemsnitstemperatur.

Mere drivhusgas = højere gennemsnitstemperatur.

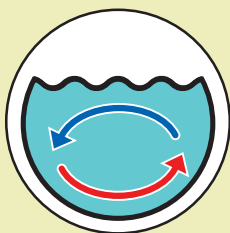


FEM FAKTORER, DER STYRER JORDENS KLIMA

Jordens klimasystem er styret af komplekse processer og mekanismer, som alle er internt afhængige af hinanden. Her er fem vigtige faktorer, som er styrende for, hvordan klimaet udvikler sig.

HAVSTRØMME spiller en stor rolle i forhold til at fordele varme rundt om på Jorden.

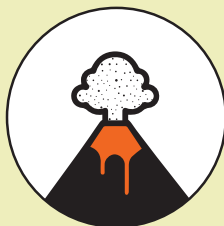
Et eksempel er Golfstrømmen, som har stor betydning for temperaturen i Danmark. Den transporterer varmt vand fra Den Mexicanske Golf op langs Nordamerikas østkyst og videre til Nordvesteuropa, hvilket bidrager til et mildere klima i de områder.



Goldstrømmen spiller en afgørende rolle i den globale varmestransport og påvirker vejrmonstre og klima på tværs af kontinenter.

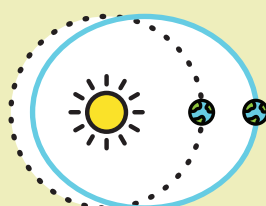
VULKANUDBRUD kan både føre til afkøling og opvarmning:

Vulkansk vinter: Når en vulkan bryder ud, kan den sende store mængder aske og støv op i atmosfæren. Det kan blokere noget af sollyset fra at nå jordoverfladen og føre til midlertidig afkøling. Fænomenet kaldes vulkansk vinter.



Aerosoler: Vulkaner udleder også gasser, bl.a. svovldioxid (SO₂). I atmosfæren kan SO₂ reagere med vanddamp og danne små dråber af svovlsyre (aerosoler). Aerosoler kan reflektere sollys væk fra jorden, og det bidrager til yderligere afkøling.

CO₂: Vulkaner udleder kuldioxid (CO₂). Normalt er mængden lille sammenlignet med menneskeskabte udledninger, så det har ikke en stor langsigtet effekt på klimaet. Men over geologisk tid har vulkaner ført til ændringer i atmosfærens niveau af drivhusgasser og sandsynligvis til opvarmning.



ORBITALE CYKLUSSE er navnet på det fænomen, som gør, at Jordens afstand til Solen ikke er konstant. I cyklusser på mange tusinder år ændrer formen på Jordens bane om Solen sig nemlig fra at være elliptisk til at være mere rund. Samtidig ændres Jordens hældning og rotation om sig selv. De orbitale cyklusser kaldes Milanković-cykler, opkaldt efter forskeren, som først beskrev dem. Læs meget mere om Milanković-cykler på side 28.

FORTIDENS KLIMA KAN AFLÆSES I MIKROFOSSILER

TEKST: ANNE RINGGAARD • LAYOUT: LYKKE SANDAL

Forestil dig, at du i den danske undergrund finder en forstenet knogle fra en krokodilleart, der trives i troperne. Knoglen er et tegn på, at der engang var krokodiller i det område, vi i dag kalder Danmark – altså må klimaet her engang have været tropisk.

Krokodilleknoglen er – ligesom fossiler fra andre levende organismer – en såkaldt proxy for fortidens klima.

Proxy betyder 'stedfortræder' og er et meget vigtigt begreb inden for palæoklimatologi, altså forskning i fortidens klima. Man kan også sige, at en proxy er en indikator for, at der f.eks. har været særligt varmt eller koldt i den tidsperiode, proxyen stammer fra.

I scenariet, hvor krokodilleknoglen er en proxy, skal det forstås sådan, at knoglen træder i stedet for et termometer, som vi normalt ville bruge til at måle temperaturen.

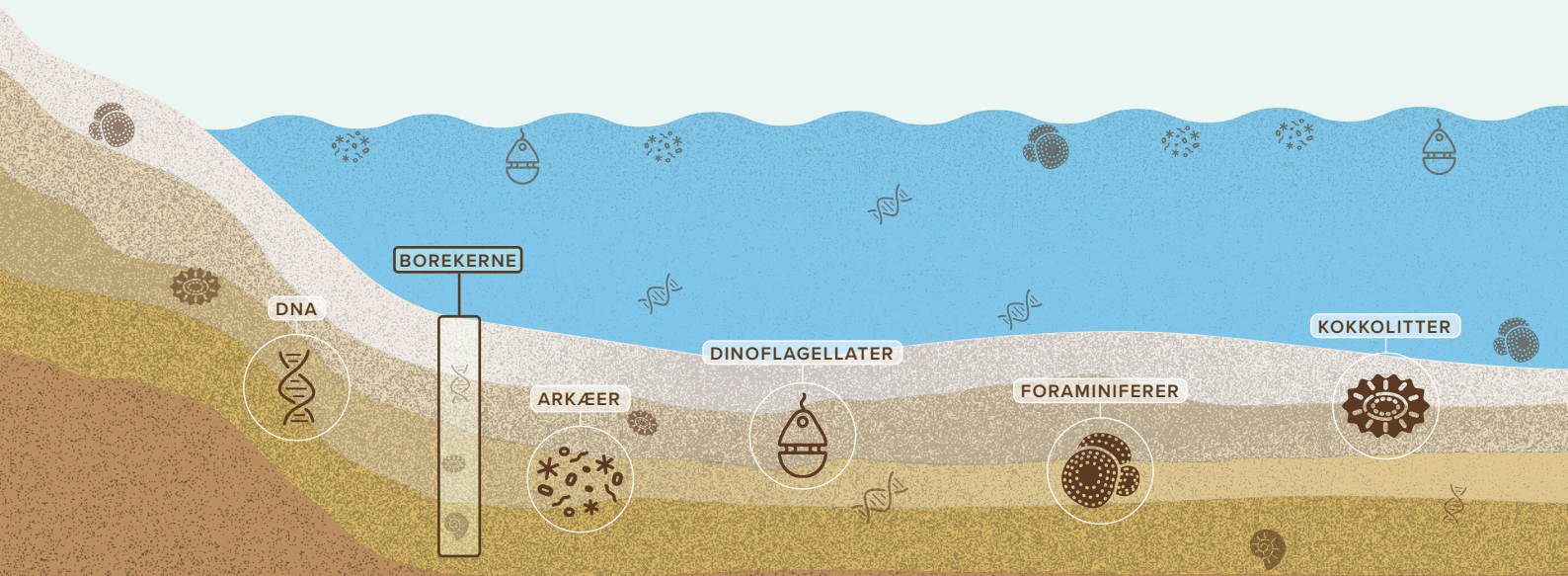
Forskerne, du møder i dette nummer af Geoviden, bruger dog ikke dyreknogler som proxyer for forti-

dens klima, men mikrofossiler, der er så små, at de ikke kan ses med det blotte øje. Det er for eksempel rester af bakterier, DNA, plankton og andre organismer.

Mikrofossilerne er igennem millioner af år blevet begravet og bevaret i sediment (se forklaring af sediment i boksen til højre). Forskere, der studerer fortidens klima – som i øvrigt kaldes palæoklimatologer – bruger mikrofossilerne til at beregne, hvad temperaturen og atmosfærens CO₂-niveau var, da de blev dannet.

Luftbobler og partikler i grønlandsk og antarktisk indlandsis er også proxyer for fortidsklima. Det samme er sammensætningen af aflejret materiale i undergrunden.

Her på siden kan du blive klogere på udvalgte proxyer – nogle af dem møder du igen længere inde i magasinet.



FORAMINIFERER

Mikroskopiske, encellede organismer, der lever i overfladen og på bunden af fersk- og saltvand. De har kalkskaller, som bliver bevaret for eftertiden i sediment og kan bruges til at studere fortidige temperaturer og klimænderinger.

KOKKOLITTER

Mikroskopiske kalkplader, der dannes af havalger kaldet coccolithophorider. Over tid danner skallerne store aflejringer af kridt i sedimenter. Kridtaflejringerne afspejler klimatiske forhold.

AMMONITTER

Blæksprutter, der levede for 240 til 65 millioner år siden. Ammonitter efterlod spiralformede skaller, som i dag kan bruges til at datere geologiske lag og studere fortidens klima.

HVAD ER SEDIMENT?



Mange palæoklimatologer finder deres proxyer i sediment. Sediment består af mineraler og partikler, der gennem Jordens historie er blevet aflejret som lag i jordskorpen og på bunden af søer, fjorde, floder og have.

Med forskellige teknikker borer forskerne kerner af sediment op i lange rør.

Sedimentkernerne inddeles efter deres gennemsnitlige kornstørrelse i kategorierne ler, silt, sand, grus eller sten.

Sedimentkernerne opbevares på store lagre, der fungerer som en slags biblioteker, hvor forskere kan bestille prøver til deres forskning.

På billedet skæres små prøver af en sedimentkerne. De skal bruges til analyse.

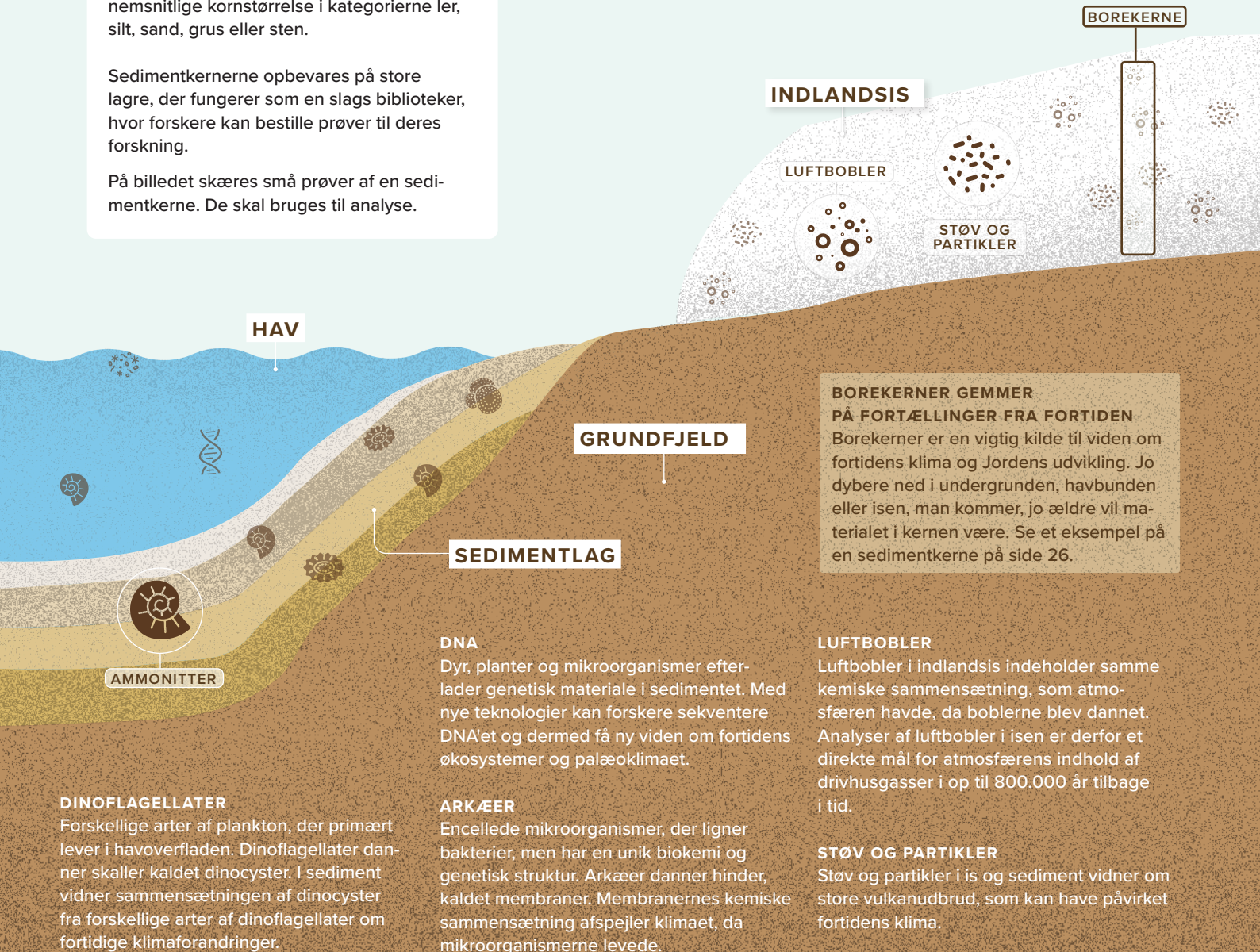
HVAD ER MIKROFOSSILER?



Mikrofossiler er f.eks. planterester, skaller, bakterier og andre mikroorganismer. De er så små, at de ikke kan ses med det blotte øje, men kun under et mikroskop.

På billedet til venstre er en forstørret dinocyste. Dinocyster

er efterladte skaller fra forskellige typer plankton kaldet dinoflagellater. Det er et af de mest brugte mikrofossiler til at studere fortidens klima. En dinocyste er typisk 15-100 mikrometer (μm). Det svarer til 0,015-0,1 millimeter – det vil sige virkelig lille!



På specialdesignede hylder i EastGRIP-lejrens iskolde lager ligger borekerner fra Indlandsisen side om side.



I EastGRIP-lejrens laboratorie under isen kan forskerne se nærmere på de iskerner, de borer op, og f.eks. måle længden på dem.



Foto: Sune Olander Rasmussen

Foto: Neemdk

ISKERNER ER ET DIREKTE VINDUE TIL FORTIDENS KLIMA

Mere end 20 kilometer indlandsis opbevares i reoler på et arkiv i udkanten af København. Isen fortæller flere hundredtusinder års klimahistorie og er en vigtig kilde til viden.

TEKST: ANNE RINGGAARD · LAYOUT: LYKKE SANDAL

Intetheden ude midt på den grønlandske indlandsis står pludselig en stor, rund tre-etagers kuppel.

”Man kunne lige så godt være på en fremmed planet. Der er helt fladt, og så er der iskrystaller i luften. De reflekterer lyset på en fuldstændig magisk måde, så der dannes regnbueagtige formationer. Det ligner ikke noget andet sted på Jorden,”

fortæller Helle Astrid Kjær, der er glaciolog på Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet.

Helle Astrid Kjær har flere gange været en del af det internationale hold forskere, som i amerikanske Hercules-fly bliver fløjet til forskningslejren EastGRIP for at udføre en vigtig mission: På ugelange ophold arbejder de hvert år i temperaturer på under 20 minusgrader i tunneller, der er etableret under isen. Her hiver forskerne igen og igen tre meter lange kerner op af det samme hul i Indlandsisen, som nogle steder er op til tre kilometer tyk. På den måde når de helt ned til is, der blev dannet for 130.000 år siden.

Fra en lignende lejr på Antarktis har forskere hentet iskerner med op til 800.000 år på bagen.

Iskernerne bliver skåret i 55 centimeter lange stykker, pakket i frysekasser og transporteret til blandt andet København, hvor Helle Astrid Kjær og hendes kollegaer bruger dem til at kortlægge fortidens klima. I isen kan de aflæse temperaturændringer tilbage i tid og direkte måle, hvor meget CO₂ der har været i atmosfæren i de seneste hundretusinder af år.

”Vi analyserer indholdet i luftbobler, der er fanget i isen. Det giver os et direkte mål for fortidens CO₂-koncentrationer,” fortæller Helle Astrid Kjær.

HELT UDEN FOR SKALA

Målingerne slår en tyk streg under, at vi i øjeblikket befinder os i en ekstrem situation: På intet tidspunkt i de seneste 800.000 år har koncentrationen af drivhusgasser i Jordens atmosfære været så høj, som den er nu.

”Vi er helt udenfor skala i forhold til, hvad vi kan måle i de gamle antarktiske iskerner. Der har hverken været CO₂- eller metan-niveauer, der minder om dem, vi har i dag,” siger Helle Astrid Kjær.

CO₂ og andre drivhusgasser bliver fanget i Indlandsisen, når sne bliver komprimeret til is. I isen fanges tidligere tiders luft fra atmosfæren i små bobler.

Hvert år falder der ny nedbør over Indlandsisen. Under et tykkere og tykkere lag bliver de indkapslede luftbobler



Foto: East Greenland Ice-core Project, www.eastgrip.org

Det var noget af en ingeniøropgave, da EastGRIP-lejrens tunneller skulle etableres midt på Indlandsisen i 2015: Først gravede man dybe render i isen. Derefter blev enorme, aflange balloner placeret i renderne og pustet op, hvorefter de langsomt blev dækket med lag på lag af sne. Da sneen var hærdet, blev ballonerne tømt for luft og fjernet – og vupti, så havde forskerne tunneller, de kunne flytte ind i. Se video og flere billeder fra opbygningen af lejren på eastgrip.org.

efterhånden trykkes ind i de omkringliggende iskrystaller, men de bevarer samme kemiske sammensætning, som atmosfæren havde, da boblerne blev dannet. De indeholder derfor også samme koncentration af gasserne kuldioxid (CO₂), metan (CH₄), kvælstof (N₂) og ilt (O₂).

“Vi er helt uden for skala i forhold til, hvad vi kan måle i de gamle antarktiske iskerner. Der har hverken været CO₂- eller metan-niveauer, der minder om dem, vi har i dag.”

HELLE ASTRID KJÆR

LEKTOR, NIELS BOHR INSTITUTET



Kuipen i EastGRIP-lejren på Indlandsisen i Grønland rummer blandt andet kantine, opholdsstue og mødelokale. I baggrunden ses et Hercules-fly. Forskerne sover i telte, når de opholder sig på isen. På hjemmesiden eastgrip.org kan du finde optagelser fra kuipen og resten af lejren – du kan også se, hvordan forskerne borer iskernerne op.

(Foto: The East Greenland Ice-core Project, EastGRIP, www.eastgrip.org)

I laboratoriet i København kigger Helle Astrid Kjær under et forstørrelsesglas på iskrystaller i et tyndt stykke is, hun har skåret af en iskerne fra Indlandsisen.



Foto: Jacob Lind Bendtsen

SÅDAN ANALYSERES ISKERNER

Forskerne borer tre meter lange iskerner op fra lejre på Indlandsisen og Antarktis. Derefter nye tre meter lange kerner fra samme hul, igen og igen. På den måde når de længere og længere tilbage i tid.

Forskerne laver en række analyser af kernerne med forskellige metoder.

MÅLING AF ELEKTRISK LEDNINGSEVNE VISER VULKANSK AKTIVITET

Forskerne måler iskernernes elektriske ledningsevne med to elektroder. Ledningsevnen fortæller, hvor mange elektrisk ledende ioner, der er i isen. Høje koncentrationer af den elektrisk ledende ion sulfat (SO_4^{2-}) kan indikere, hvornår der har været vulkansk aktivitet. Svovldioxid (SO_2) fra vulkaner bliver nemlig omdannet til sulfat i atmosfæren.

ANALYSE AF ISKRYSSTALLER VISER ISENS BEVÆGELSER

Iskrystaller fortæller noget om, hvordan isen har flydt og bevæget sig i forskellige perioder.

ISEN SMELTES, SÅ DEN INDERSTE DEL BLIVER TILGÆNGELIG

I laboratoriet på Niels Bohr Institutet skærer forskerne små stykker af isen og smelter det på en slags kogeplade, der skiller det indre vand fra det ydre. Forskerne er interesserede i at måle på det vand, der kommer fra den inderste del af kernen, fordi den yderste del kan være forurenet, efter at den har været i kontakt med luften, eller når forskerne har rørt ved den.

VAND-ANALYSE MED CAVITY RING-DOWN-SPEKTROMETRI

Vandet bliver analyseret i forskellige instrumenter. Et af dem er et laserinstrument, der kaldes et Cavity Ring-Down-Spektrometer (CRDS). CRDS kan med høj præcision måle koncentrationer af isotoperne ^{16}O og ^{18}O – forholdet mellem dem er såkaldt proxy for temperaturer. Læs om det på side 11.

Med andre metoder måles:

- Drivhusgassen metan (CH_4).
- Støvparkler, der fortæller om tørke og vindforhold.
- Ioner fra salte, der stammer fra havene og kan informere om havisens udbredelse.

Til sammen giver analyserne kontinuerlige klimadata, der når op til 130.000 år tilbage i tid fra de grønlandske kerner og op til 800.000 år tilbage fra de antarktiske kerner.

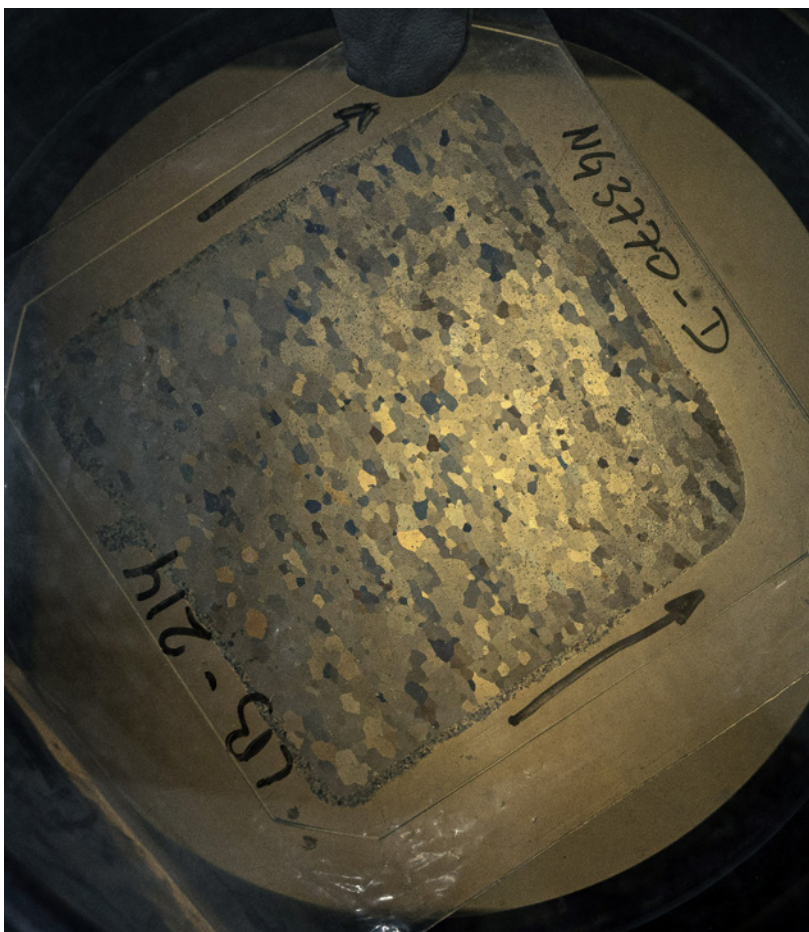
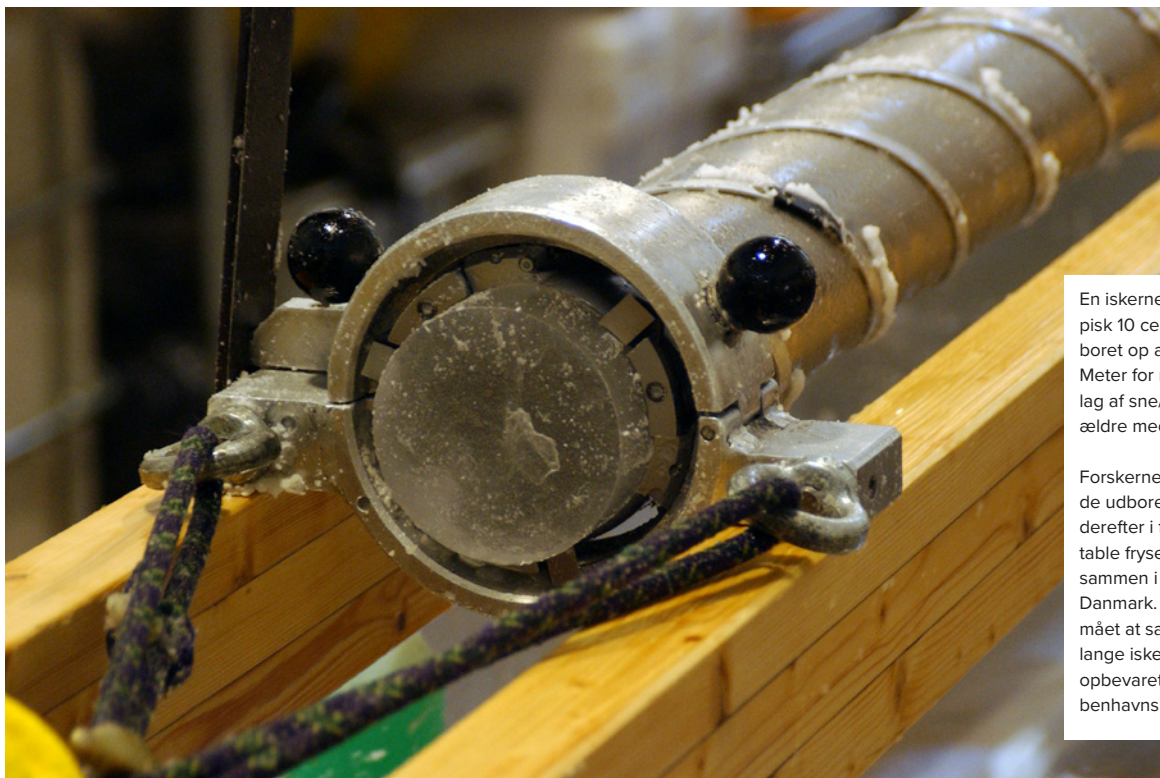


Foto: Jacob Lind Bendtsen

I iskrystallerne er der luftbobler med samme kemiske sammensætning, som atmosfæren havde, da de blev dannet. I iskernerne kan forskerne derfor måle nøjagtigt, hvor høj atmosfærens koncentration af drivhusgasser har været i de seneste hundredtusinder af år.



En iskerne er en cylinder af is på typisk 10 centimeter i diameter, som er boret op af isen fra en given dybde. Meter for meter indeholder iskernen lag af sne/is, som bliver ældre og ældre med dybden.

Forskerne pakker nøjsommeligt de udborede iskerner i plastik og derefter i frysekasser og transportable fryserne, så de kan sætte dem sammen i rækkefølge hjemme i Danmark. På den måde har de formået at samle mere end to kilometer lange iskerner. Iskernerne bliver opbevaret i minus 30 grader i Københavns Universitets iskernearkiv.

Foto: Neem.dk



Foto: Jacob Lind Bendtsen

Iskernearkivet på Københavns Universitet er et stort frostlager på 400 kvadratmeter med plads til 2.000 frysekasser i 13 reoler. I alt ligger der over 20 kilometer iskerner i de hvide termokasser. Temperaturen er minus 30 grader.

I laboratoriet isolerer Helle Astrid Kjær og hendes kollegaer luftboblerne, så de kan måle drivhusgasserne. Se, hvordan det foregår, i boksen på side 8.

DEN MENNESKELIGE FAKTOR

Drivhusgasserne udgør ikke en stor del af hverken isens luftbobler eller atmosfæren.

Jordens atmosfære består af:

- 78 procent nitrogen
- 21 procent ilt
- 1 procent andre stoffer, blandt andet drivhusgasser

Men selv om drivhusgasserne fylder meget lidt, er de effektive. I atmosfæren fungerer de som et slags tæppe, der reflekterer noget af Jordens varmestråling, så Jorden bliver en beboelig planet – det er det, vi kalder drivhuseffekten (læs mere om den på side 19).

Problemet er, at menneskelig aktivitet i løbet af de seneste par hundrede år har udledt så meget CO₂ og andre drivhusgasser, at planeten i øjeblikket varmes unaturligt op.

Siden slutningen af 1800-tallet er koncentrationen næsten fordoblet.

I 2022 udgjorde CO₂ 0,042 procent af den samlede atmosfære. Det svarer til 420 ppm (parts per million). Normalt er mængden af CO₂ kun cirka 280 ppm i mellemistider, som den vi befinder os i nu, viser analyser af iskernernes luftbobler. I istider er den endnu lavere, typisk 180-220 ppm.

>

“Vi kan jo kun vide noget om, hvordan klimaet kommer til at forandre sig i fremtiden, hvis vi ved, hvordan det har forandret sig i fortiden.”

HELLE ASTRID KJÆR

LEKTOR, NIELS BOHR INSTITUTET

”Så vi er ret langt fra normalen og det niveau af drivhusgasser, der normalt vil være i en mellemistid,” siger Helle Astrid Kjær.

ISKERNE ER GIVER EN IDÉ OM FREMTIDEN

Allerede nu mærker vi, at den rekordhøje CO₂-koncentration medfører, at atmosfæren bliver et lidt for effektivt drivhus:

Klimaet bliver varmere, havniveauet stiger, og vejret bliver mere ekstremt. Andre afledte effekter af den hastige opvarmning kan være svære at forudsige, fordi vi mennesker aldrig har opholdt os i et klima som det, vi går i møde, hvis vi bliver ved med at udlede CO₂ i de mængder, vi hidtil har gjort.

Iskerneforskningen kan hjælpe med at give et kvalificeret bud på, hvad der venter, siger Helle Astrid Kjær.

”Vi kan jo kun vide noget om, hvordan klimaet kommer til at forandre sig i fremtiden, hvis vi ved, hvordan det har forandret sig i fortiden.”

HELLE ASTRID KJÆR

Lektor ved sektionen for Is, Klima og Geofysik på Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet.

Specialiseret i at analysere støv og partikler i iskerner for at samle viden om forskellige fortidige klimaproceser. Har været med til at udvikle flere metoder til at analysere iskerner.



PÅ FLUGT FRA TIPPING POINTS

I klimaforskning betegner ordet 'tipping points' kritiske tærskler, hvor selv små stigninger i temperatur kan udløse store og ofte uoprettelige ændringer i Jordens klimasystemer. For eksempel er der risiko for, at afsmeltningen af Grønlands indlandsis kan accelerere ukontrollabelt ved en vis opvarmning.

I computerspillet 'The Tipping Point', som Helle Astrid Kjær har været med til at udvikle, kan du prøve at være klimaforsker, der skal nå at komme af Indlandsisen, før den kollapse. Undervejs samler og analyserer du data om iskappen, før den forsvinder.

Find og download computerspillet gratis til både Windows og iOS på Steam (store.steampowered.com), søg på 'The Tipping Point'.

På hjemmesiden www.eastgrip.org kan du se mange flere billeder og læse beretninger fra den fascinerende EastGRIP-forskningsstation på Indlandsisen.

OPVARMNING ER SYNLIG FOR DET BLOTTE ØJE

Den igangværende opvarmning af vores planet er allerede tydelig på Indlandsisen og i de arktiske områder. Der stiger temperaturen ifølge Helle Astrid Kjær hurtigere end det globale gennemsnit.

Inden for de seneste 10 år har forskerne flere gange oplevet, at der har været plusgrader på midten af Indlandsisen, hvor termometeret ellers tidligere har holdt sig under frysepunktet.

”Når vi står og kigger på de iskerner, vi har boret ud i Sydgrønland i 2024, kan vi med det blotte øje se, at der er mere frossent smeltevand i kernerne, efterhånden som vi kommer op til de seneste år. Det påvirker mig – at stå der med det i hånden og se det så direkte,” siger Helle Astrid Kjær.

Klimaforandringerne kan hun og kollegaerne også måle i de analyser, de laver af isen i laboratorierne hjemme i Danmark. Temperaturerne i dag og i fortiden står nemlig skrevet i sammensætningen af forskellige isotoper i isen. Læs mere om det på næste side. •



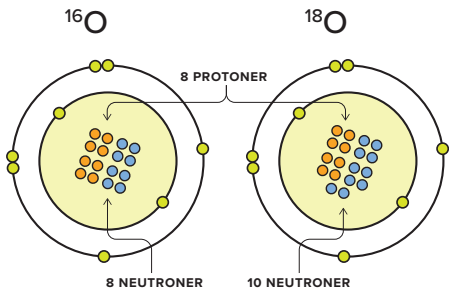
ILT-ISOTOPER AFSLØRER HAVETS TEMPERATUR

TEKST: ANNE RINGGAARD · GRAFIK: LYKKE SANDAL

En af de mest brugte metoder til at kortlægge fortidens temperaturer og klimaforandringer går ud på at måle forholdet mellem stabile ilt-isotoper i f.eks. iskerner eller kalkfossiler.

Isotoper er varianter af det samme grundstof med det samme antal protoner, men med et forskelligt antal neutroner.

kalkskaller. Skallernes koncentrationer af ^{16}O og ^{18}O varierer, afhængigt af den temperatur havvandet havde, da skallerne blev dannet.



Oxygen (ilt) forekommer hyppigst som de to isotoper: ^{16}O og ^{18}O , og de er så stabile, at de kan være bevaret i is og kalkholdige fossiler i millioner af år.

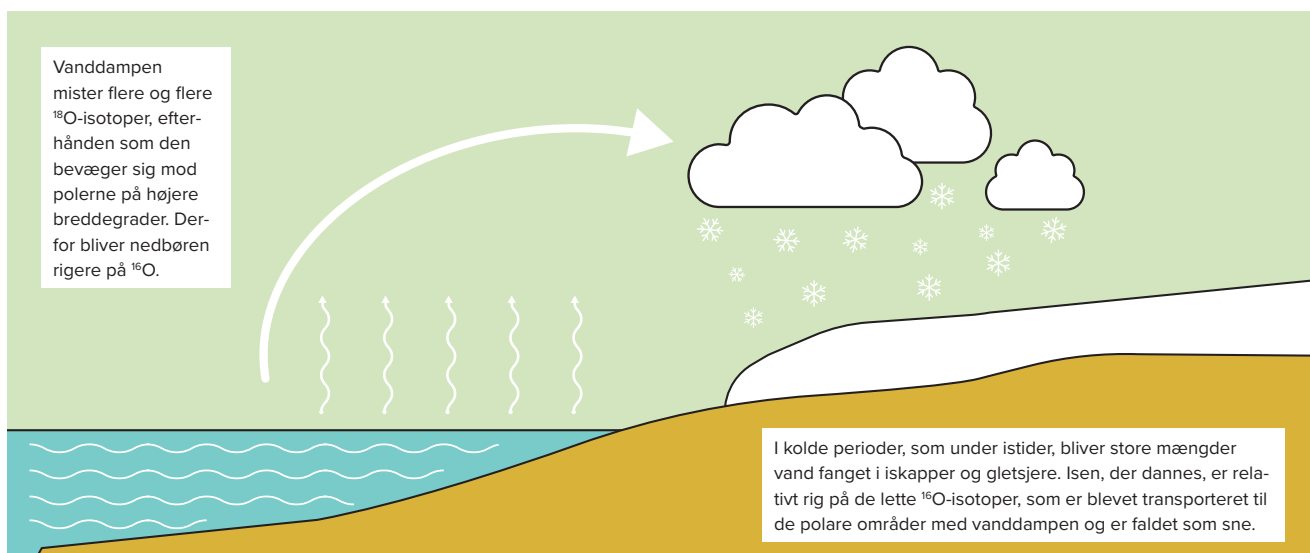
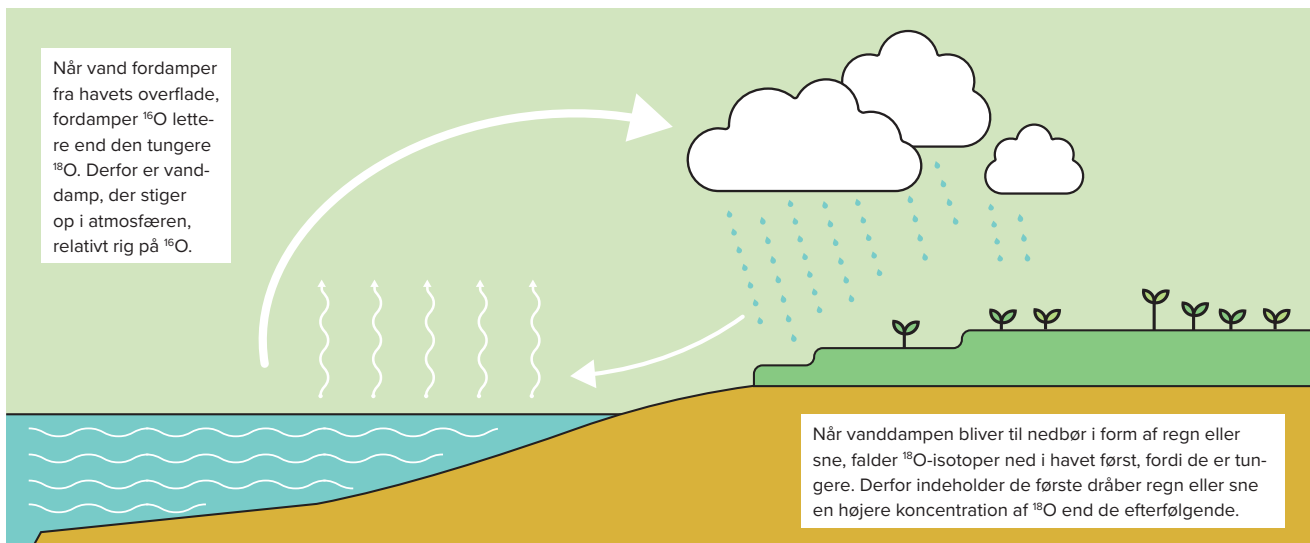
- ^{16}O har 8 neutroner
- ^{18}O har 10 neutroner og er dermed tungere end ^{16}O

I havet optager organismer ilt fra vandet. De to stabile ilt-isotoper ^{16}O og ^{18}O bruges til at danne organismernes

I koldere perioder indeholder havvandet og dermed kalkskallerne en højere koncentration af den tungere isotop ^{18}O .

Dette skyldes, at meget af den lette isotop ^{16}O er fordampet og bundet i store iskapper under koldere perioder.

Årsagen er relateret til fordampning, nedbør og isdannelse, og processerne ses her:





KLIMAEET I FORTID OG FREMTID

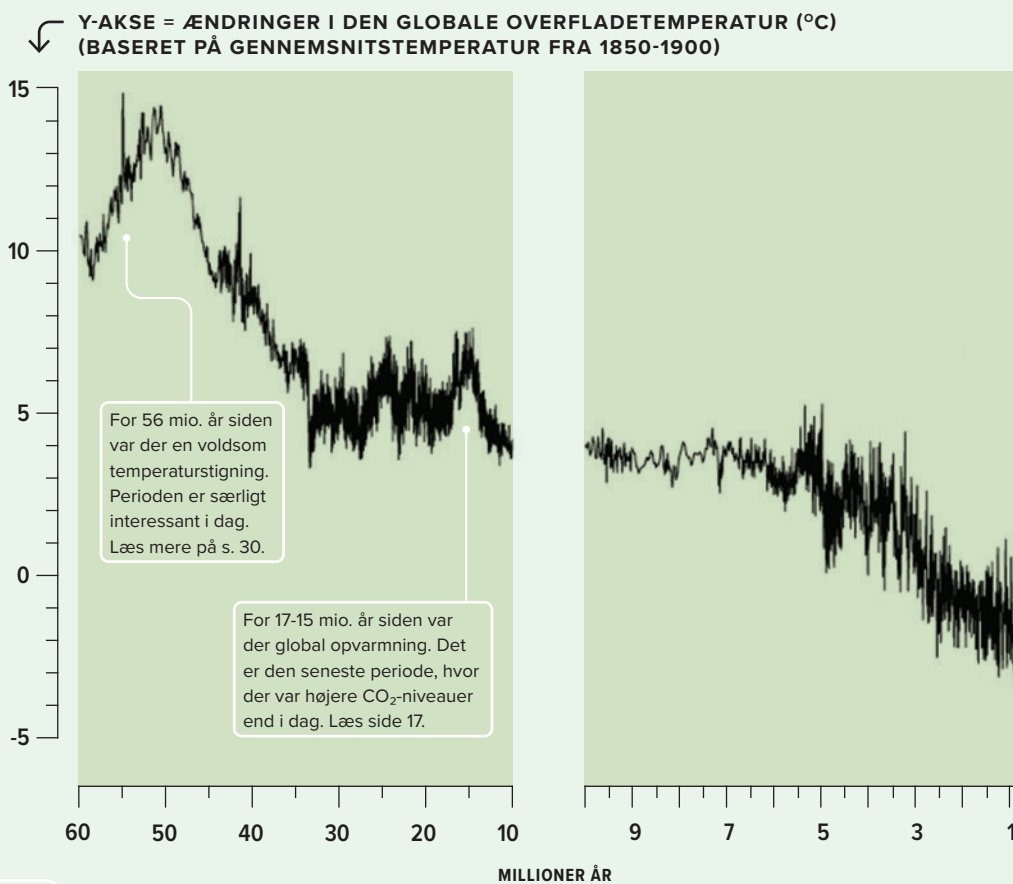
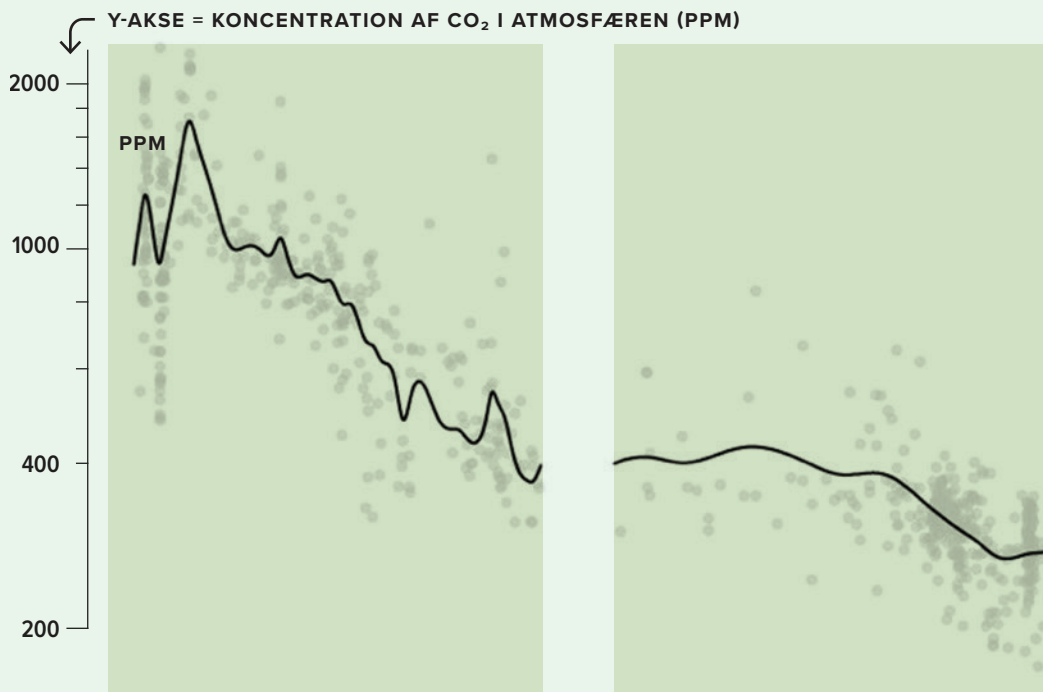
Forskning viser, at den globale gennemsnitstemperatur og atmosfærens koncentration af CO₂ har svinget op og ned i de seneste 60 millioner år. I øjeblikket stiger CO₂-koncentrationen dog hurtigere, end forskerne har fundet tegn på er sket tidligere. Graferne her viser udviklingen fra den palæocene epoke frem til nu.

Vær opmærksom på, at tidsintervallerne på x-akserne varierer: De to kolonner længst til venstre dækker millioner af år, den tredje kolonne fra venstre dækker tusind år, mens den fjerde kolonne dækker de seneste 174 år samt de kommende 300 år.

TEKST: ANNE RINGGAARD
LAYOUT: LYKKE SANDAL
FAGLIG KONSULENT: KASIA SLIWINSKA

TIDSLINJEN viser de geologiske perioder, som forskerne, der er med i dette nummer af Geoviden, arbejder med.

SEDIMENTKERNER



PALÆOC.	EOCÆN	OLIGOC.	MILOCÆN	PLIOCÆN
56 mio. år	34 mio. år	23 mio. år		5,3 mio. år 2,58 mio. år

METODER TIL AT STUDERE FORSKELLIGE PERIODER

Herunder kan du se, hvor langt tilbage i tid forskerne kan komme med forskellige metoder. Sediment bærer det ældste vidnesbyrd om fortidsklimaet, fordi det igennem millioner af år blevet aflejret i jordskorpen. Antarktis' indlandsis giver det næstældste vidnesbyrd med sine 800.000 år. Grønlands indlandsis er endnu yngre.

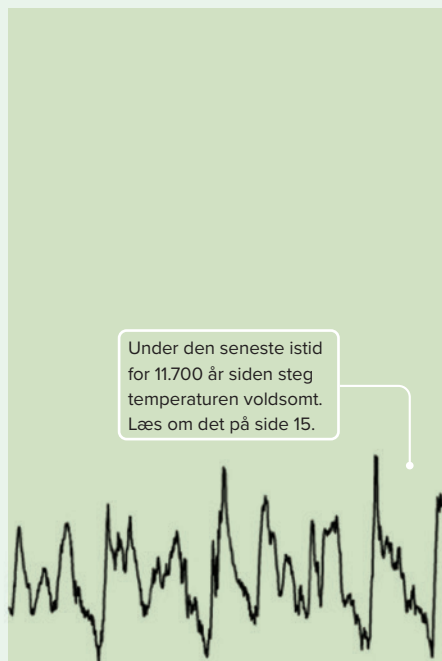
ISKERNER,
ANTARKTIS

ISKERNER, GRØNLAND

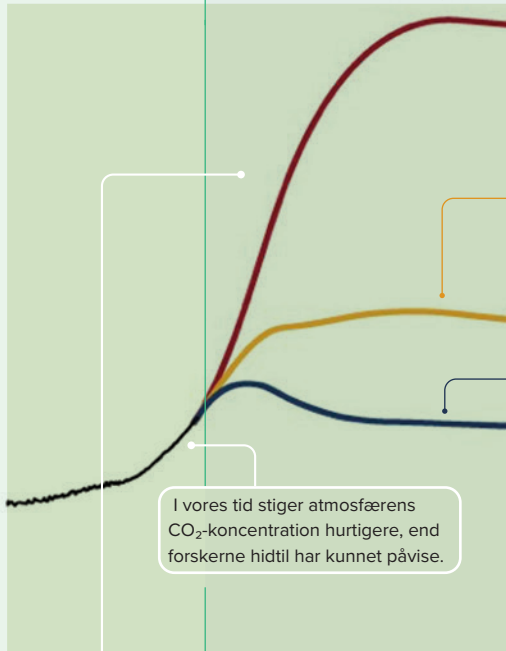
HISTORISK
DATA

SIMULERING

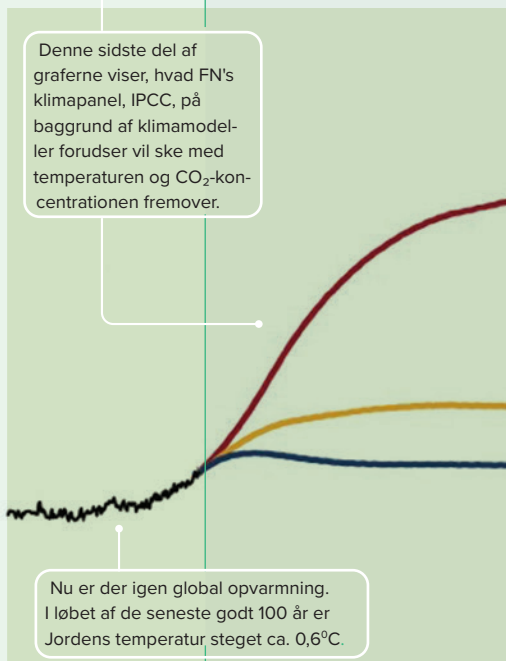
FREMTIDSSCENARIER



Under den seneste istid for 11.700 år siden steg temperaturen voldsomt. Læs om det på side 15.



I vores tid stiger atmosfærens CO₂-koncentration hurtigere, end forskerne hidtil har kunnet påvise.



Denne sidste del af graferne viser, hvad FN's klimapanel, IPCC, på baggrund af klimamodeller forudsiger vil ske med temperaturen og CO₂-koncentrationen fremover.

Nu er der igen global opvarmning. I løbet af de seneste godt 100 år er Jordens temperatur steget ca. 0,6°C.

SSP5-8,5:
Meget høj udledning af drivhusgasser. I dette scenarie er atmosfærens indhold af CO₂ mere end fordoblet i 2100. Den globale gennemsnitstemperatur er op til 5,7°C højere end i dag.

SSP2-4,5
Moderat udledning af CO₂. I dette scenarie når CO₂-udledningerne typisk et maksimum omkring år 2040-2050, hvorefter de langsomt begynder at falde. I 2100 er temperaturen steget med op til 3,5°C.

SSP1-2,6
CO₂-udledningerne falder markant. Verden overholder Parisaftalen, og den globale gennemsnitstemperatur stiger ikke mere end 2°C.

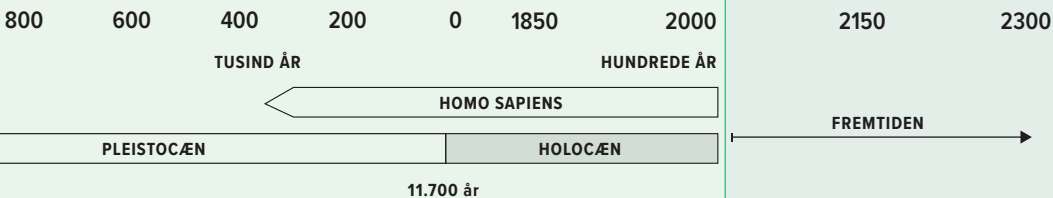
FN'S KLIMASCENARIER

FN's klimapanel, IPCC, har lavet forskellige udregninger af, hvor meget den globale gennemsnitstemperatur vil stige ved forskellige typer samfundsudvikling – herunder i hvor høj grad verden får nedbragt udledningen af blandt andet CO₂ fra fossile brændsler.

De fem scenarier betegnes SSP1-1,9, SSP1-2,6, SSP2-4,5, SSP3-7,0 og SSP5-8,5, og i grafen her til venstre markerer den røde, gule og blå streg tre af de fem scenarier.

SSP står for 'Shared Socioeconomic Pathways', som kan oversættes til 'fælles socioøkonomiske udviklingsbaner'. SSP beskriver mulige scenarier, hvor sociale og økonomiske faktorer på forskellig vis påvirker samfundet og klimaet. SSP5 (rød streg) er det mest pessimistiske scenarie, hvor udviklingen er baseret på fossile energikilder som olie og kul. Det mest optimistiske scenarie SSP1 (blå streg) er karakteriseret af bæredygtighed med CO₂-lagring og energi fra vedvarende kilder som sol, vind og vand.

Forudsigelser af fremtidens temperaturer er baseret på modelberegninger. Læs om klimamodeller på side 20.



HAVBUNDEN BUGNER AF SPOR EFTER FORTIDENS KLIMA

Rester af bakterier og plankton i sedimentet er mikroskopiske tidskapsler, der indeholder information om havets temperaturer for millioner af år siden.

TEKST: ANNE RINGGAARD · LAYOUT: LYKKE SANDAL

Klimaet efterlader spor i alt liv på jord: Temperaturer, vind, nedbør og fugtighed afgør, hvilke dyr og planter der kan leve. Noget liv bliver bevaret for eftertiden som fossiler, der bærer vidnesbyrd om, hvordan klimaet udviklede sig, millioner af år før mennesker kom til.

Selv de allermindste livsformer, mikroorganismene, er tilpasset det klima, de lever i. Pollen, plankton, bakterier og andre mikrober er igennem Jordens historie blevet aflejret i jorden under os. I dag finder palæoklimatologer de mikroskopiske fossiler i sedimentet, hvor de er som tidskapsler, hvis kemiske sammensætninger afspejler det klima, de blev dannet i.

Sedimentet borer forskerne for eksempel op fra havbunden.

”Når vi filtrerer sedimentet fra i en borekerne, er der organiske partikler tilbage, som ikke kan ses med det blotte øje.

Nogle af partiklerne har kemiske fingeraftryk, der fortæller noget om, hvordan fortidsklimaet var,” fortæller Kasia Sliwinska, der er seniorforsker ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS).

VI LÆRER AF FORTIDEN

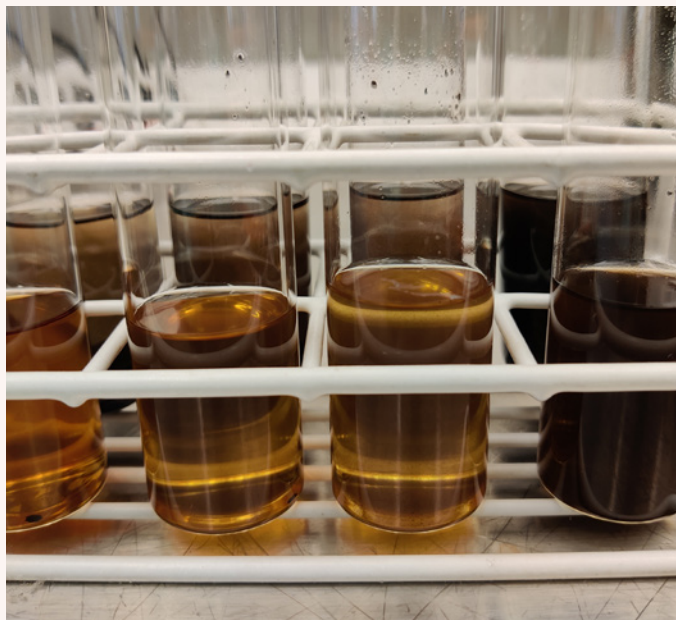
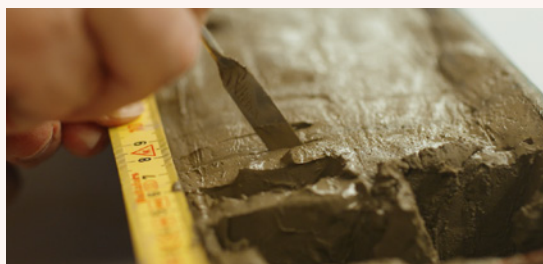
Kasia Sliwinska studerer kemiske sammensætninger af mikrofossiler fra havbunden for at finde ud af, hvordan klimaet forandrede sig i tre palæoklimatiske perioder:

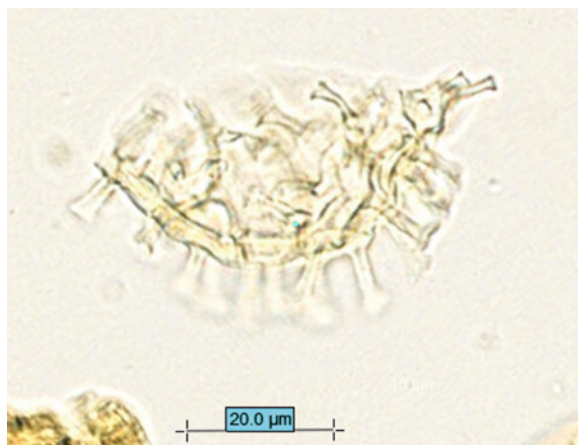
- Miocæn, der dækker en periode for cirka 23 til 5 millioner år siden
- Oligocæn, der dækker en periode for cirka 34 til 23 millioner år siden
- Eocæn, der dækker en periode for cirka 56 til 34 millioner år siden

SÅDAN ANALYSERES RESTER FRA BAKTERIER

A Kasia Sliwinska skærer en sedimentkerne i mindre stykker for at udskille mikrofossiler samt fedtstoffer (lipider), der stammer fra fortidige arkæer, som er en slags bakterier. (Læs om arkæer på side 5.)

B Lipiderne udskilles fra sediment: Små prøver af sediment puttes i organiske opløsningsmidler, der udtrækker lipiderne, når blandingen varmes op i en slags mikrobølgeovn. Når sedimentet efterfølgende filtreres fra, er lipiderne blevet opløst i væsken.





DINOCYSTE under et mikroskop. Den specifikke art har den latinske betegnelse *Polysphaeridium zoharyi*. I dag findes arten kun sydpå i varmere havvand end på vore breddegrader. Sidst, den var i Nordsøen, var for 15 millioner år siden, da den globale gennemsnits-temperatur var 7-8 grader højere end i dag (se side 4-5). Da temperaturen faldt, forsvandt *Polysphaeridium zoharyi* fra Nordsøen, viser sedimentanalyser.

Dinocyster er typisk 15-100 mikrometer (μm), svarende til 0,015-0,1 millimeter. De analyseres på samme måde, som forskerne analyserer pollen i sediment. Læs om metoden i Geoviden nr. 4, 2020, side 20-23.

I de tre epoker gennemgik Jorden meget varierede klimaforhold, fra istider til nutidens mellemistid. Indimellem var der korte perioder med ekstrem opvarmning – de perioder kaldes klimatiske optima (optima, bøjning af det latinske ord optimum = 'det bedste').

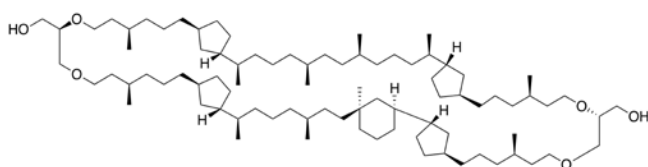
Fortidens klimatiske optima er særligt interessante i vores tid, hvor der sker en global opvarmning, og det er lærerigt for os at vide noget om, hvad der tidligere er sket med klimaet i perioder med opvarmning. Den information kan blandt andet bruges i modelleringer af fremtidens klima. Læs om klimamodeller på side 20.

Klimamodellerne giver os viden om, hvordan vi bedst indretter os i fremtiden. Kasia Sliwinkas og hendes fagfællers analyser af mikroskopiske fossiler kan altså være med til at kvalificere ganske store beslutninger.

SOM SNEFNUG, DER DALER

Kasia Sliwinka leder efter rester af plankton, bakterier og andre organismer, der er bevaret i havsedimenternes lag med de ældste nederst og de yngste øverst. Mikrofosillerne har den fordel, at de – i modsætning til større fossiler – findes i rigelige mængder. I mange tilfælde finder forskerne tusindvis i en sedimentprøve på størrelse med en spiseske. >

- C** Når opløsningsmidlet fordampes, er lipiderne tilbage i koncentreret form, som kan analyseres for deres kemiske sammensætning og koncentration. Herunder vises et eksempel på et lipids kemiske struktur. Men der findes flere tusinde forskellige. Den kemiske struktur beskriver bindinger, som holder atomer sammen, så der dannes molekyler og faste stoffer.

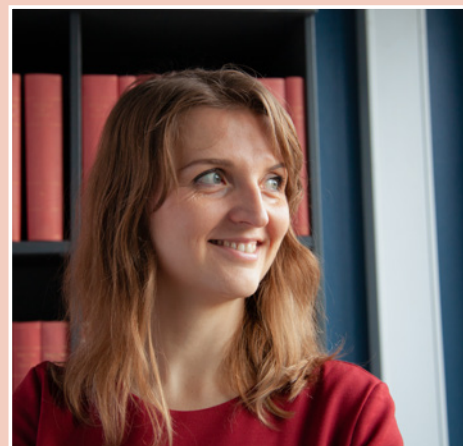


Dette specifikke lipid betegnes 'glycerol dialkyl glycerol tetraether' (GDGT).

Palæoklimatologer leder efter GDGT-lipider. Forholdet mellem forskellige typer GDGT'er kan nemlig bruges til med høj præcision at bestemme den årlige havtemperatur på det tidspunkt,

hvor lipiderne blev dannet.

Når lipider er blevet udskilt fra en sedimentprøve, bliver lipidmolekylerne analyseret ved hjælp af forskellige teknikker, blandt andet massespektrometri. Det er en metode, som bruges til at bestemme molekylers masse og kemiske strukturer.



KASIA SLIWINKA

Seniorforsker i Afdeling for Geoenergi og -lagring i GEUS. Ph.d. fra Afdeling for Geoscience, Aarhus Universitet. Uddannet geolog på Uniwersytet Warszawski i Polen.

Forsker i klimatiske overgangsperioder med store temperaturændringer for 65 til 5 millioner år siden.

Særligt fokus på fortidens temperaturer i havoverfladevand, som hun analyserer ved hjælp af mikrofosiler og lipider.

Kasia Sliwinska ved en af verdens største samlinger af sedimentkerner, som hører til på Bremen Universitt i Tyskland. Kernelageret i Bremen har sammenlagt mere end 188 kilometer kerner fra Atlanterhavet, Østersøen, Middelhavet og Sortehavet. Fra lageret kan forskere fra hele verden bestille sedimentprøver fra netop den lokalitet og tidsperiode, de er interesseret i.

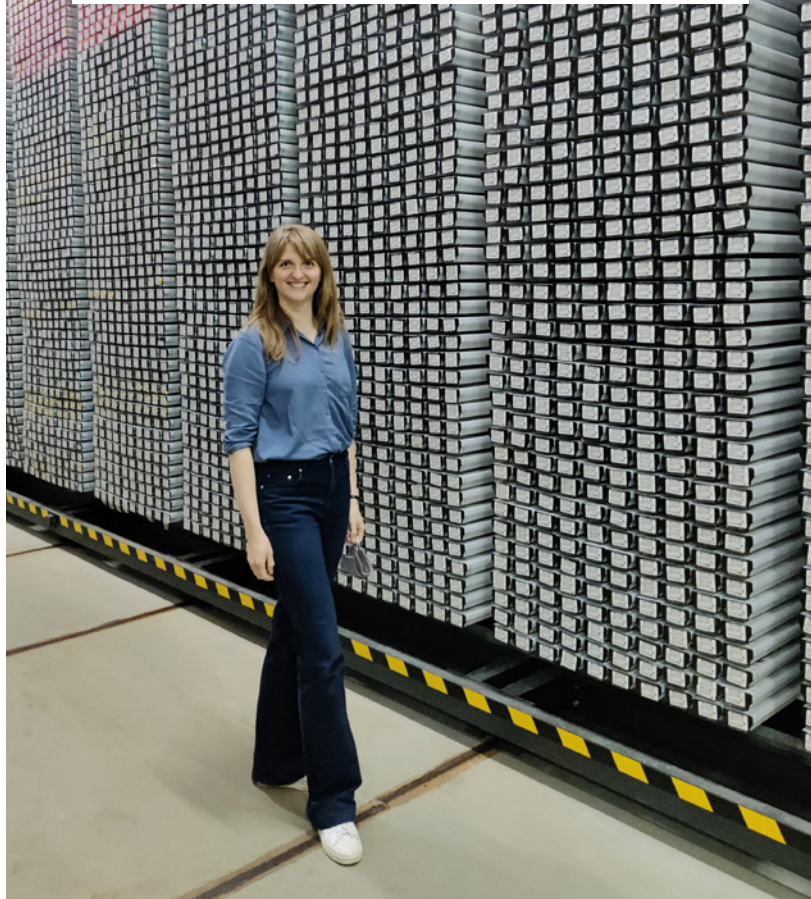


Foto: Privat

Et af de mikrofossiler, Kasia Sliwinska er specialiseret i, kommer fra dinoflagellater. Dinoflagellater er forskellige arter af plankton, der primært lever i havets overflade som encellede organismer med en helt særlig egenskab: Dinoflagellater danner skaller omkring sig for at beskytte sig. Skallerne

“Lipiderne er som fingeraftryk, der er meget velbevarede i sedimentet.”

KASIA SLIWINSKA
PALÆOKLIMATOLOG, GEUS

hedder dinocyster. Når dinoflagellater ikke længere har brug for deres dinocyster, smider de dem, som slanger skifter ham. Skallerne lander på bunden af havet og bliver med tiden til mikrofossiler.

”Det er som snefnug, der daler. De bliver begravet i sediment, og der bliver de bevaret i millioner af år,” fortæller Kasia Sliwinska.

Palæoklimatologen studerer dinocysternes skaller i laboratoriet. Hendes analyser fortæller noget om, hvor og hvornår palæoklimatiske forandringer har opvarmet eller afkølet havets overfladevand. Bestemte arter af dinoflagellater trives nemlig bedst i koldere vand, mens andre har brug for varmere omgivelser. S sammensætningen af dinocyster i sedimentet er derfor proxyer for temperaturen i fortidens havoverflade.

FINGERAFTRYK FRA FORTIDEN

Mens dinocysterne fortæller Kasia Sliwinska, hvordan temperaturerne har svinget op og ned, bringer en anden type marine fossiler hende på sporet af, præcis hvor varmt eller koldt havvandet var. Rester af arkæer, som er en type bakterier, bærer vidnesbyrd om de præcise temperaturer.

Arkæerne er omgivet af en hinde – en membran. Den består af fedtstoffer kaldet lipider. Når havets temperaturer stiger eller falder, ændres de kemiske bindinger i lipidmolekylerne.

”Ligesom menneskers hud beskytter kroppen, beskytter membranen bakteriens celle, så den kan overleve. Membranen gør alt, hvad den kan, for at optimere cellens livsbetingelser. Hvis havvandet bliver varmere eller koldere, ændrer den struktur for at holde cellen varm eller køle den ned,” forklarer Kasia Sliwinska.

Når arkæerne dør, falder deres membraner til bunds i havet og bliver begravet i sedimentet. Lipidmolekylerne er så stabile, at de holder i millioner af år. Kasia Sliwinska kan derfor bruge deres kemiske struktur som proxyer for havets temperaturer.

”Lipiderne er som fingeraftryk, der er meget velbevarede i sedimentkernerne,” fortæller Kasia Sliwinska.

ET KLIMATISK PUSLESPIL

Analyser af dinocyster og lipider fra arkæer er forbundet med usikkerhed, blandt andet fordi mikrofossilernes kemiske sammensætning ikke kun er bestemt af havvandets temperaturer, men også af andre forhold, såsom vandets indhold af salt og næringsstoffer. Derfor giver de enkelte analyser ikke i sig selv svar på, hvordan klimaet var i fortiden. Men de er vigtige brikker i det store palæoklimatiske puslespil.

”Vi har brug for en kombination af metoder og forskellige typer fossiler,” forklarer Kasia Sliwinska, som fortsætter arbejdet med at føje nye brikker til det store palæoklimatiske puslespil, så vi bedre kan forberede os på fremtidens klima. •

FREMTIDENS KLIMA KAN BLIVE VÅDT OG VARMT

På vores breddegrader regnede det voldsomt for 17 til 15 millioner år siden. Det er den seneste epoke, hvor atmosfæren indeholdt lige så høje CO₂-niveauer som i dag.

TEKST: ANNE RINGGAARD • LAYOUT: LYKKE SANDAL

Palmer og gigantiske sequoiatræer strakte sig mod himlen. Krokodiller dasede i den fugtige varme, og hvaler boltrede sig i havet. Sumpet moseskov dækkede det meste af landarealet.

Det lyder som en beskrivelse af lande i nærheden af ækvator. Men det er også palæoklimatologernes bedste bud på, hvordan der så ud i det område, vi i dag kalder Danmark, for 17 til 15 millioner år siden midt i den geologiske epoke, der kaldes Miocæn.

Klimaforskere har i stigende grad fået øjnene op for epoken som en mulig parallel til fremtiden. Det er særligt en periode på cirka to millioner år midt i epoken, som kan få betydning for forståelsen af nutidens klimaforandringer: Palæoklimatisk forskning viser, at det er den seneste periode i Jordens historie, hvor atmosfærens CO₂-koncentration var lige så høj som i dag – og højere.

Samtidig steg temperaturen. Jorden var i gennemsnit 7 til 8 grader varmere end i dag i de to millioner år, der bliver kaldt det miocæne klimatiske optimum, fordi det var epokens varmeste del.

”Det miocæne klimatiske optimum kan give os en bedre

forståelse af, hvad vi fremover kan forvente af klimaet. Hvis vi vil se ind i fremtiden, bør vi forske mere i, hvordan verden så ud dengang,” mener Kasia Sliwinska.

Årsagen til den høje CO₂-koncentration i det miocæne klimatiske optimum var højst sandsynligt en række vulkanudbrud, som frigav store mængder drivhusgasser. Koncentrationen af CO₂ i atmosfæren steg dog meget langsommere end i dag, hvor menneskers aktiviteter har stor indflydelse på udviklingen.

”CO₂-niveauet i atmosfæren er steget voldsomt i løbet af de seneste 200 år. I den miocæne epoke gik det meget langsommere – temperaturen steg over så lang tid, at dyr og planter kunne nå at tilpasse sig,” siger Kasia Sliwinska, forsker ved GEUS.

Opvarmningen i det miocæne klimatiske optimum førte til, at mere vand fordampede fra havene. Fordampningen blev til regn: I de vådeste måneder faldt der typisk 150 til 250 millimeter nedbør i det område, vi i dag kalder Danmark.

Parallellen til nutiden er tydelig: Regnen tager i øjeblikket til år efter år og slår den ene rekord efter den anden. I oktober 2023 faldt der næsten dobbelt så meget regn i Danmark som normalt for måneden, nemlig 150 millimeter ifølge Danmarks Meteorologiske Institut (DMI). Det svarer til nedbørmængden i Miocænen.

Læs hele historien om den miocæne epoke på geoviden.dk/fortidsklima.

Et nordeuropæisk landskab i det miocæne klimatiske optimum, hvor temperaturen på Jorden steg markant. Måske var der frodig skov, fortidselefanter og eksotiske fugle i det, vi i dag kalder Danmark. Perioden kan bruges til studier i nutidens klimaforandringer.

ATMOSFÆRENS CO₂-KONCENTRATION I MIOCÆN OG I DAG

- I det miocæne klimatiske optimum for 17 til 15 millioner år siden var atmosfærens CO₂-koncentration 375 til 600 parts per million (ppm).
- I slutningen af 1800-tallet var den 280 ppm.
- I 2022 var den cirka 420 ppm.

FORSTÅ JORDENS ENERGIBALANCE

TEKST: FIE KRØYER DAHL · LAYOUT OG ILLUSTRATION: LYKKE SANDAL

Balancen i Jordens klimasystem styres af en konstant udveksling af energi mellem Jordens overflade, atmosfæren og rummet. Når der kommer lige meget energi ind og ud af atmosfæren, er klimasystemet i balance – men når mængden af drivhusgasser i atmosfæren stiger, som vi oplever nu, opstår der ubalance. Konsekvensen er blandt andet klimaforandringer.

EN PLANET I BALANCE

Jordens klimasystem er i balance, når der kommer lige så meget energi ud i atmosfæren som ind.

1

SOLEN VARMER

Solen sender energi i form af kortbølgede stråler mod Jorden. Indstrålingen kan mærkes som varme, når strålingen absorberes – f.eks. af din hud.

2

SKYERNE ABSORBERER VARME

Cirka halvdelen af indstrålingen fra Solen reflekteres af skyer. En hel del reflekteres af partikler eller absorberes af især vanddamp.

3

SOLEN OPVARMER JORDOVERFLADEN

Den solindstråling, som ikke absorberes af skyer eller reflekteres af partikler, rammer Jorden. Her absorberes en del af strålingen af havet og landjorden. Is og sne reflekterer også noget og sender det tilbage i atmosfæren.

STØRST KONCENTRATION

Koncentrationen af drivhusgasser er størst i de nederste 15-20 km. af atmosfæren.

KORTBØLGET STRÅLING

SOLEN

ATMOS

JORDEN



ET MENNESKEVENLIGT KLIMA

Du og alle andre levende væsener kan leve på Jorden takket være drivhuseffekten. Atmosfæren beskytter os og ligger rundt om vores planet som et cirka 100 kilometer tykt tæppe af blandt andet drivhusgasser. Det smarte ved atmosfæren

er, at den fungerer lidt ligesom en glasrude i et drivhus. Atmosfæren sørger nemlig for, at Solens stråler kan komme ind, mens hovedparten af varmen fra Jorden bliver holdt tilbage. Drivhuseffekten sørger for, at vores planet har en gennemsnitstemperatur

på 15 grader celsius og dermed er beboelig for mennesker. Uden drivhuseffekten og atmosfærens beskyttende kappe ville temperaturen på Jorden være mindst 15 grader celsius under frysepunktet, og Jorden ville dermed være som en snebold i verdensrummet.

ATMOSFÆREN

LANGBØLGET STRÅLING

5

DRIVHUSGASSER HOLDER PÅ VARMEN

Det meste af varmen fra Jorden – det vil sige den langbølgede stråling – bliver indfanget af drivhusgasserne i atmosfæren. Derfor opstår det, vi kalder drivhuseffekten. Den er grunden til, at vi kan leve på Jorden (se boksen herover).

4

VARME DIREKTE FRA JORDEN

Jorden udsender også energi i form af langbølget stråling. Ligesom Solens kortbølgede stråling kan du mærke den langbølgede stråling som varme. En lille del af denne varme går direkte gennem atmosfæren, især når det er skyfrit.

ATMOSFÆRENS SAMMENSÆTNING
Hop hen på side 22 og læs mere.

6

DRIVHUSEFFEKTENS STYRKE

Atmosfæren og skyerne udsender selv varme i form af langbølget stråling både opad ud i rummet og nedad mod jordoverfladen. Mængden af den stråling er en god indikator for drivhuseffektens styrke: Jo mere stråling der kommer ned oppefra, jo stærkere er drivhuseffekten, og jo varmere får vi det på Jorden – og omvendt.

FEEDBACK-EFFEKTER FORSTÆRKER KLIMAFORANDRINGER

Den opvarmning af Jordens atmosfære, som vi oplever lige nu, skyldes især menneskets udledning af drivhusgasser som f.eks. CO₂. Den øgede udledning forstærkes voldsomt i atmosfæren, fordi koncentrationen af drivhusgassen vanddamp stiger, når temperaturen stiger. Dette kaldes en feedback-effekt.

På grund af dens voldsomme feedback-effekt er vanddamp den vigtigste årsag til

opvarmningen af atmosfæren. Det understreges af målinger af atmosfærens indhold af vanddamp fra de seneste 50 år, og det samme viser klimamodellerne.

Der kommer også feedback-effekter fra aftagende mængder sne og is på Jorden, og nye studier viser, at nogle af de samme mekanismer gælder for lavtliggende skyer over verdenshavene.

Kilde: Eigil Kaas

EN PLANET I UBALANCE

Når mængden af drivhusgasser i atmosfæren stiger, som det er tilfældet nu, kommer der ubalance i Jordens systemer. Det medfører klimaforandringer.



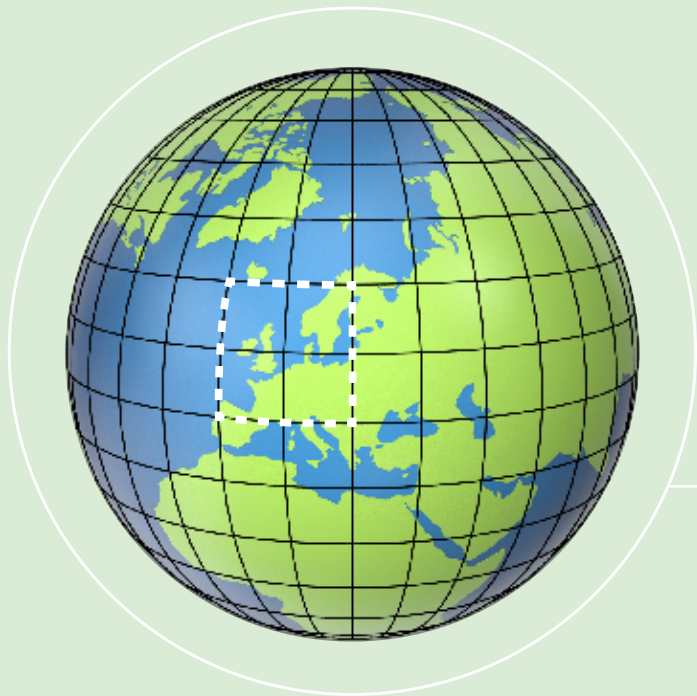
MERE VARME FORBLIVER I ATMOSFÆREN

Når mængden af drivhusgasser stiger, vil der være mere af varmen fra Jorden, som bliver indfanget og forbliver i atmosfæren.



DRIVHUSEFFEKTEN FORSTÆRKES

Resultatet af den øgede mængde drivhusgas er, at drivhuseffekten forstærkes, og gennemsnitstemperaturen på Jorden stiger.



KLIMAMODELLER

En klimamodel er kort sagt en computersimulering af Jordens klimasystem, inklusive atmosfære, oceaner, landjord og iskapper. Klimamodeller kan bruges til at genskabe fortidens klima og fremskrive scenarier for klimaet i fremtiden.



LÆS MERE om de største og mest anvendte klimamodeller i Danmark og Europa på geoviden.dk/fortidsklima.

1

En klimamodel er bygget op omkring et tredimensionelt gitter, hvor opløsningen – det vil sige, hvor finmasket gitteret er – varierer fra model til model. I denne figur er opløsningen ekstremt høj for at fremme forståelsen.

HVORDAN KAN LIGNINGER LAVET KUNSTIGE ORKANER?

Klimaforandringer får temperatur og hav til at stige, og det giver store problemer for natur og mennesker. Derfor forsøger forskere ved hjælp af avancerede computerprogrammer kaldet klimamodeller at blive klogere på de komplekse dynamikker og sammenhænge, som styrer Jordens klima. Men hvordan fungerer en klimamodel egentlig? Det svarer professor ved Niels Bohr Institutet Eigil Kaas på her.

TEKST: FIE KRØYER DAHL · LAYOUT: LYKKE SANDAL

En klimamodel er en matematisk efterligning af de processer, som styrer Jordens klima. Hvis man skal forsøge at tegne en klimamodel, ville den – meget forsimplet – se ud som grafikken herover: et tredimensionelt net af gitterpunkter, som inddeler vores fysiske verden i rumlige kvadrater.

Kort sagt er klimamodeller avancerede computerprogrammer, der hurtigt kan lave mange meget komplicerede matematiske analyser – i fagsprog kaldet modellering. Modellen udregner interaktionerne mellem forskellige dele af Jordens klimasystem, herunder landjorden, oceanerne og atmosfæren, som omgiver vores planet.

ET VIGTIGT VÆRKTØJ

For at kunne lave udregningerne skal klimamodellen bruge nogle faste input i form af grundlæggende klimadata. Den vigtigste faktor er Solens stråler, som styrer hele Jordens energibalance – den kan du læse om på side 18.

Derudover er input om atmosfærens kemiske

sammensætning, Jordens rotation, topografi og tryk også essentielle, og på baggrund af de mange forskellige udregninger kan klimamodellen komme med bud på, hvordan det globale klima vil udvikle sig.

Netop klimaets udvikling er der stor opmærksomhed på verden over, og en af forskerne på området er meteorolog og fysiker Eigil Kaas. Han er professor ved Niels Bohr Institutet

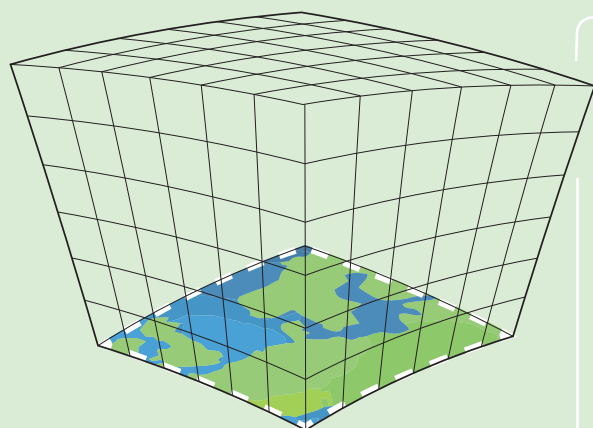


EIGIL KAAS

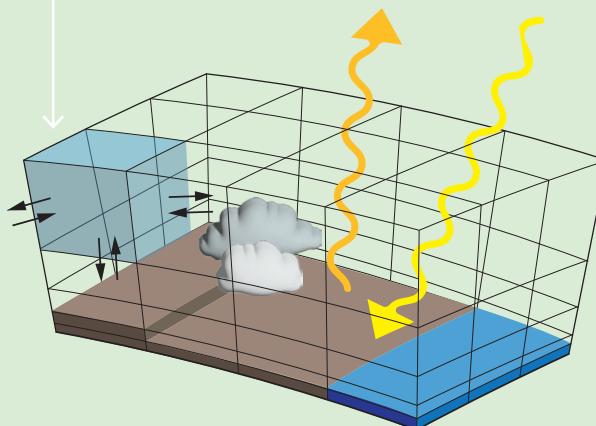
Professor og leder af sektionen for Klima og geofysik ved Niels Bohr Institutet (NBI) på Københavns Universitet.

Uddannet meteorolog fra Københavns Universitet og ph.d. i meteorologi fra samme sted.

Arbejder med at analysere målinger og resultater fra beregninger med klimamodeller.



Klimamodellens tredimensionelle gitter dækker **atmosfære, oceaner og landjord**. De nederste lag i gitteret er egentlig ikke vandrette, men følger formen på bjerge, dale osv. (kaldet topografi).



Alle processer i Jordens klimasystem er internt afhængige af hinanden. Det efterligner klimamodellen, så når der sker en ændring i en af firkanterne i gitteret, påvirker det nabo-firkanterne.

I samtlige firkanter i det tredimensionelle gitter løser klimamodellen konstant ligninger, der f.eks. beskriver temperatur, tryk, vind og luftfugtighed.

på Københavns Universitet, hvor han arbejder med at analysere målinger og resultater fra beregninger med klimamodeller.

”Klimamodeller er et vigtigt værktøj til at fortælle os noget om klimaets udvikling. Derfor arbejder vi hele tiden på at forbedre og optimere dem, blandt andet ved at se på, hvordan modellerne kan blive endnu hurtigere til at regne, fortæller han.

EN MILLIARD VARIABLE

I princippet skal en moderne klimamodel ifølge Eigil Kaas kun modtage relativt få informationer, og så skal computeren selv kunne regne resten ud.

Men mere om det senere.

Inden du læser videre, er der nemlig først nogle helt grundlæggende principper, som skal være på plads. På side 18 kan du læse om, hvordan Jordens energibalance og drivhuseffekten fungerer, og det er fint at vide noget om, når man skal forstå klimamodeller.

Allerførst ser vi nærmere på, hvordan man laver en matematiske modellering af klodens klima. Det kan gøres på forskellige niveauer, fortæller Eigil Kaas:

HVAD ER MODELLERING?

En matematisk model er en overførsel af nogle virkelige forhold til en beskrivelse, som kan analyseres med matematik i form af ligninger. Typisk vil de virkelige forhold være forsimplet, for at det bliver muligt at beskrive dem matematisk. Matematiske modeller anvendes inden for de fleste naturvidenskabelige fagområder. Kilde: Wikipedia

”Du kan sætte dig ned og skrive en lille ligning baseret på helt grundlæggende fysik. Her har du en variabel, f.eks. temperatur, og et input, som er den indstråling, der kommer fra Solen. Ud

fra det helt simple regnestykke kan du faktisk sige noget om, hvordan temperaturen på Jorden er.”

Derfra kan man fylde mere og mere på regnestykket. Det øger kompleksiteten, og derfor er det smart at få hjælp fra computere, som kan levere den nødvendige regnekraft. Det kræver nemlig ret meget at lave de udregninger, som skal bruges til det, der i dag kaldes en fuldt dynamisk klimamodel. Det er sådan nogle, som for eksempel FN’s klimapanel, IPCC, baserer deres udregninger og fremskrivninger af klimaet på (se figur side 12).

Institutioner som Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) og De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) bruger en tilsvarende fuldt dynamisk klimamodel, når de skal lave vejrudsigter og forske i blandt andet fortidsklima, som magasinet her handler om.

INTERN AFHÆNGIGHED

En dynamisk klimamodels fornemmeste opgave er at simulere, altså efterligne, processerne i virkelighedens klimasystem. Det indebærer blandt andet atmosfærens udvikling med skyer, vanddamp og drivhusgasser, mekanismerne i vindsystemer, effekten af overfladetryk og nedbør, udviklingen af oceaner og havis, påvirkningen af planter, kulstofkredsløbet

“Det hele ligger i ligningerne, der beskriver naturvidenskabens love.”

EIGIL KAAS

PROFESSOR VED NIELS BOHR INSTITUTET



AI SKAL NEDBRINGE ENERGIFORBRUGET
 En klimamodel er grundlæggende et meget avanceret computerprogram, og det er der en ret betydelig ulempe ved: De kæmpestore computere bruger utrolig meget strøm. Derfor er der stort fokus på, hvordan energiforbruget kan mindskes. Forskere er i fuld gang med at undersøge, hvordan man ved hjælp af AI kan gøre dele af modellens computersystem hurtigere og bedre med mindre energi.

til opvarmning af havet. Et varmere hav giver varmere luft – og så videre.

TAK TIL NATURVIDENSKABSFOLK GENNEM TIDEN

For at kunne efterligne virkelighedens klimasystem og den interne afhængighed mellem alle naturlige processer skal klima-

– kort sagt alle mulige naturvidenskabelige processer. Geologi er dog ikke med i beregningerne – læs hvorfor i boksen på side 23.

Alle de mange processer er internt afhængige af hinanden. Sker der en ændring et sted i klimasystemet, har det en effekt andre steder: Mere CO₂ i atmosfæren giver højere temperaturer. Højere temperaturer medfører et større indhold af vanddamp i atmosfæren, og det forstærker drivhuseffekten, som holder på varmen. Højere temperatur får is og sne både på hav og land, f.eks. Grønland, til at smelte – og mindre is er lig med mindre refleksion af solens stråler, som igen bidrager

modellen fodres med noget mad, som kan hjælpe den på vej. Den mad består af en masse fysiske, kemiske og biologiske love, der udtrykkes i matematiske ligninger. Ligningerne har dygtige videnskabsfolk igennem tiden stillet op for at kunne beskrive verden omkring sig, f.eks. solarkonstanten, som beskriver Solens indstråling på en flade.

Det er deres solide arbejde, som forskere i dag kan trække på:

”Nutidens klimamodeller er i den grad et udtryk for, at naturvidenskabelige discipliner arbejder sammen tværfagligt. Det er et bevis på, hvad videnskaben er i stand til som helhed,” siger Eigil Kaas.

De naturlige processer på Jorden er altså beskrevet i ligninger, og når ligningerne bygges ind i et computerprogram, kan beregningerne gå meget hurtigt. Forskerne kan få rigtig mange parametre med i beregningerne – temperatur, luftfugtighed, vindhastighed, CO₂-indhold og trykket ved havets overflade for bare at nævne nogle af dem – og en fuldt dynamisk klimamodel består af op til en milliard forskellige variable.

Det er her, at det tredimensionelle gitternet, som du læste om i starten af artiklen, kommer ind i billedet. Beregningerne foregår nemlig i alle de mange krydsende gitterpunkter, og der er en konstant interaktion mellem alle rum i gittersystemet. Det er, fordi alle Jordens processer som nævnt tidligere er internt afhængige.

”Hver firkant er totalt afhængig af, hvad der sker i firkanten ved siden af den. Der sker en konstant vekselvirkning, og det gør, at de mange variable i ligningerne hele tiden ændrer sig,” forklarer Eigil Kaas.

Et eksempel er vind. Når det blæser, skubbes luften fra en firkant over i anden – og det påvirker blandt andet luftfugtigheden i nabofirkanten. Den falder, og dermed er der et parameter, som har ændret sig. Det betyder, at variabelen i ligningen, der udregner luftfugtighed i netop den pågældende firkant, ændres. Og sådan kører det derudad.

UD AF DET BLÅ

Når man skal sætte klimamodellen i gang med at regne, sætter man ifølge Eigil Kaas typisk parametrene, som de var for et par hundrede år siden. Parametrene vil være faktiske målinger fra starten af 1800-tallet og af f.eks. atmosfærens



SÅDAN ER JORDENS ATMOSFÆRE OPBYGGET

Rundt om Jorden ligger de luftlag, som vi kalder atmosfæren. Den strækker sig cirka 100 kilometer ud i rummet, men de nederste 30 kilometer rummer 99 procent af dens samlede masse. De fysiske og kemiske processer, som betyder noget for livet på Jorden, foregår især i de nederste 15 kilometer.

Jordens atmosfære består af 78 procent kvælstof, også kaldet nitrogen (N₂), samt en

række andre gasser. En del af dem kaldes drivhusgasser:

- Vanddamp (H₂O)
- Kuldioxid (CO₂)
- Lattergas (N₂O)
- Metan (CH₄)
- Ozon (O₃)
- Halocarbener

Drivhusgasserne udgør kun cirka en procent af atmosfæren, men de har stor betydning for klimaforandringer.

Kilde: Eigil Kaas og lex.dk

(NÆSTEN) HELE VERDEN I ÉN MODEL

De nyeste klimamodeller kaldes Earth System Models (ESM) og simulerer stort set alle fysiske, kemiske og biologiske processer på Jorden.

ESM giver forskerne et endnu stærkere kort på hånden, når de skal 'se' ind i fremtiden. I forhold til mindre avancerede klimamodeller, som "kun" omfatter de fysiske processer i atmosfæren og havet, giver ESM et mere holistisk billede, idet det simulerer stort set alle fysiske, kemiske og biologiske processer på Jorden. Den medtager alle aspekter af det enorme økosystem, som udgør Jorden og giver forskerne mulighed for i endnu højere grad at forstå, hvordan det hele fungerer.

Der er dog også en del af Jordens økosystem, som EMS ikke omfatter, nemlig geologiske processer. F.eks. indgår der ikke vulkansk aktivitet og forvitring af bjergarter.

Det skyldes, at de geologiske processer foregår på en tidsskala, der strækker sig over flere millioner år, og ESM laver beregninger på processer, der foregår over meget kortere perioder.

Kilde: Eigil Kaas og lex.dk

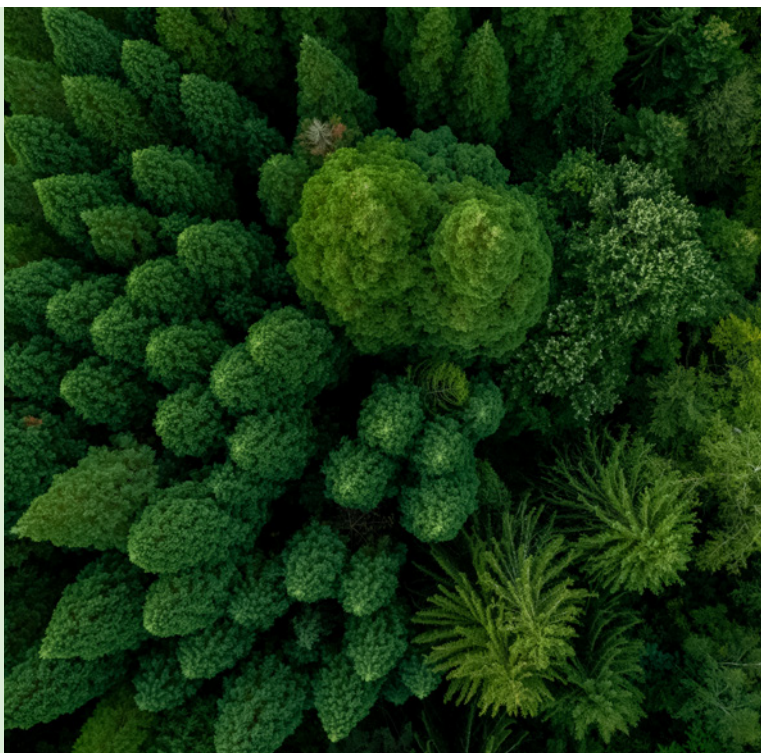


Foto: Envato

indhold af CO₂, udledningen af fossile brændsler, temperaturer på forskellige havstrømme, luftfugtighed og lignende.

"Man giver så at sige klimamodellen et snapshot af en helt tilfældig dag og bruger den dag som 'starttilstand'. Når så modellen er i gang, sker udviklingen af klimaet helt af sig selv," forklarer Eigil Kaas.

Det kan måske være lidt svært at forstå, så han uddyber:

"Det hele ligger i ligningerne, der beskriver naturvidenskabens love. Når først man har defineret nogle parametre og givet klimamodellen et udgangspunkt, så sørger matematikken for, at det simulerede klima udvikler sig – nærmest ud af det blå, kan det føles som."

De mange forskellige ligninger, som computeren hele tiden regner på, gør altså, at der f.eks. skabes højtryk og lavtryk i det simulerede klima, og at der kommer skub i de store havstrømme.

SIN EGEN BALANCE

Efterhånden som klimamodellen kører, danner den sit ' eget' klimasystem. Modellens tid er speedet gevaldigt op i forhold til virkeligheden, og afhængig af, hvilken klimamodel man bruger, skal den bruge nogle måneder på at nå ind i sin egen balance. Her simulerer den nutidens klima og dets naturlige variationer fra dag til dag, år til år og århundrede til århundrede.

Når klimamodellen er nået ind i sin egen balance, kan man vurdere, hvor nøjagtig den er. Her ser man på de større variationer i klimaet og vurderer gennemsnitsklimaet. Man ser også på, om modellen laver tilstrækkeligt med tropiske

orkaner, og om den f.eks. har formået at skabe havstrømmen El Niño.

"Kvaliteten vurderes på, om klimamodellen eftergør virkelighedens klima på alle mulige parametre. Det er ikke et forsøg på at simulere en bestemt dag, f.eks. juleaften 2050, men hvis statistikken fra klimamodellen ligner virkelighedens statistik, så er det en god klimamodel," forklarer Eigil Kaas.

Det kan man undersøge ved lave et 30-års gennemsnit af modellens klima, eksempelvis for CO₂-indhold, og vurdere, om det passer med gennemsnittet af virkelige data fra samme periode.

"Det gør det ikke altid – men det er tæt på. Man skal nærmest sidde med en lup for at se forskellene," siger Eigil Kaas.

RET SÅ PRÆCISE

De bedste klimamodeller er altså efter Eigil Kaas' vurdering ret så præcise, når man laver den type sammenligninger. Kvaliteten skyldes især, at satellitdata nu er så gode, at man f.eks. kan se temperaturforskellene hele vejen ned igennem atmosfæren og ikke kun i den yderste del af atmosfæren.

Faktisk er de mest anvendte klimamodeller så nøjagtige, at en meteorolog ikke nødvendigvis vil kunne se forskel på en computersimulering og virkelighedens klima, hvis man viste vedkommende en enkelt del af modellens udregninger – f.eks. atmosfærens udvikling set fra satellit. Og klimamodellerne forbedrer sig konstant. Nogle af dem omfatter også hele biosfæren, det vil sige de processer, som blandt andet planter står for. Derfor er man gået over til at bruge betegnelsen Earth System Models (ESM). Det kan du læse mere om i boksen her på siden.

INDLANDSISEN ER OVERRASKENDE FØLSOM

Når temperaturen stiger, går der ikke lang tid, før Indlandsisen kaster flere isbjerge og mere smeltevand af sig, end den plejer. Afsmeltingen kan få store konsekvenser for Jordens klimasystem.

TEKST: ANNE RINGGAARD · LAYOUT: LYKKE SANDAL

Plastikæsker med håndskrevne mærkater er stablet på hylderne i en stigereol, der når fra gulv til loft på professor Camilla S. Andresens kontor i København. Æskerne indeholder små prøver af sediment. Geologen har siddet i vuggende både på grønlandske fjorde og hevet det op i meterlange rør. Dato og sted for borerne er nøje noteret.

”Nogle gange, når jeg har været på ekspedition, kan jeg komme hjem med 20 borekerner. Så ved jeg, at ærmerne skal smøges op, for det tager lang tid at komme igennem alle analyserne. Jeg bliver ved med at opdage nye ting i dem og få forskningsresultater ud af dem, mange år efter at jeg har hentet dem,” fortæller hun om de rør med sediment, hun har i årenes løb har fået transporteret fra Grønland til De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønlands

(GEUS) kernelager i Taastrup. Sediment er mineraler og partikler, der gennem Jordens historie er blevet aflejret som lag i jordskorpen og på bunden af søer, fjorde, floder og have.

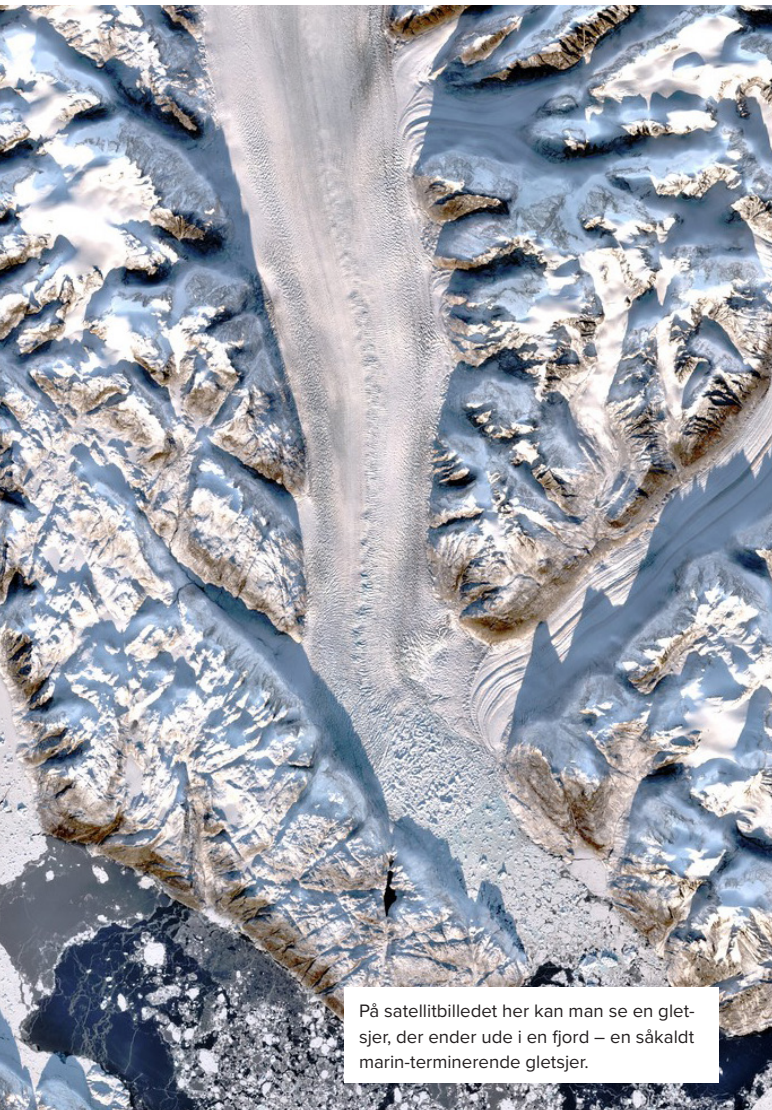
VIGTIG VIDEN

Camilla Snowman Andresen er professor i Afdeling for Glaciologi og Klima i GEUS. Hun er en af de få palæoklimatologer i verden, der er specialiseret i at bruge sediment fra bunden af grønlandske fjorde. Det bruger hun til at få viden om, hvordan Indlandsisen historisk set har reageret på klimaændringer.

CAMILLA SNOWMAN ANDRESEN

Professor i Afdeling for Glaciologi og Klima ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) og professor ved Universitetet i Bergen (UiB). Ph.d. i geologi fra Københavns Universitet.





På satellitbilledet her kan man se en gletsjer, der ender ude i en fjord – en såkaldt marin-terminerende gletsjer.

Den viden er vigtig, fordi den igangværende globale opvarmning medfører, at større mængder indlandsis smelter.

Indlandsisen består af frossent ferskvand. Når den smelter, fosser det ud i de omkringliggende fjordes salte vand. De to vandmasser blandes og løber videre ud i det nordatlantiske hav.

Afsmeltningen kan påvirke vigtige havstrømme, som har betydning for klimaet på Jorden – heriblandt Golfstrømmen. Camilla S. Andresen håber, at hendes forskning kan bidrage med viden om konsekvenserne, så vi bedre kan forberede os på fremtiden:

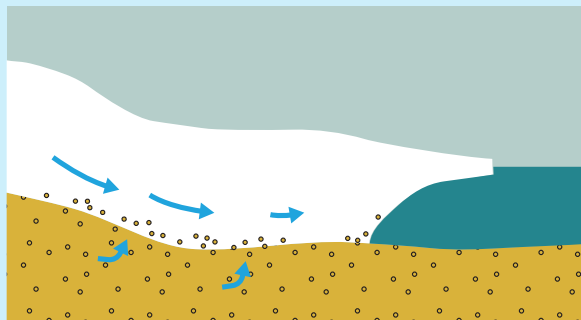
”Det handler grundlæggende om at få en forståelse for, hvilke mekanismer det sættes i gang, når Indlandsisen smelter. Der er mange af de processer, vi ikke forstår endnu”.

SAND ER TEGN PÅ ISBJERGE

Indtil for 20 år siden opfattede klimaforskere Indlandsisen som en ekstremt robust klods, der kun meget langsomt i løbet af tusindvis af år lader sig påvirke af små ændringer i klimaet.

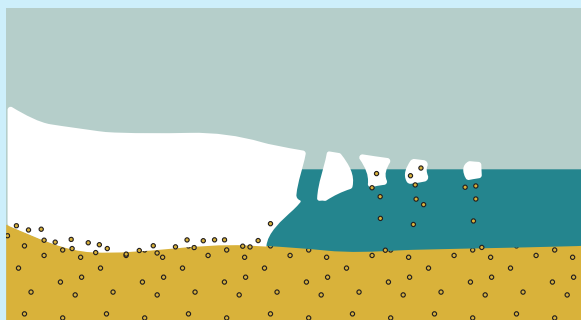
Men Camilla S. Andresen og andre forskere har efterhånden

SÅDAN ENDER SEDIMENT I FJORDENE

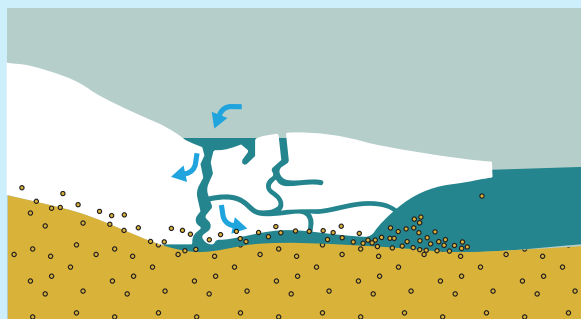


Sediment bestående af sand, grus og fint ler fra grundfjeldet trænger op i Indlandsisen, når iskappen bevæger sig hen over klipper og jord.

Efterfølgende ender sedimenterne i fjorden på to måder:



Når isbjerge brækker af og smelter ude i fjorden, synker sand og grus til bunds. Nogle gange finder forskerne endda store sten fra grundfjeldet i borekerner fra fjordene.



Smeltevand dannet på iskappens overflade trænger ned til isens underside via naturligt skabte kanaler og tunnelsystemer. Når smeltevandet fosser ud ved gletsjerfoden, fører det store mængder af fint ler fra grundfjeldet med sig.

Den sediment-rige vandmasse bevæger sig videre ud i fjorden, hvor det fine ler langsomt drysser ned på bunden.

vist, at det er en forkert antagelse: Historisk har de dele af iskappen, der smelter ud i fjorde og have, reageret hurtigt selv på små og midlertidige temperaturstigninger. Det viser professorens analyser af boreprøver fra grønlandske fjorde. Flere af resultaterne er citeret i rapporter fra FN's klimapanel, IPCC.



SÅDAN ANALYSERES BOREKERNER FRA GRØNLANDSKE FJORDE

Camilla Snowman Andresen og hendes kollegaer tager jævnligt på feltarbejde i Grønland, hvor de henter borekerner i grønlandske fjorde. Borekerne indeholder sediment, som er blevet aflejret i løbet af de seneste cirka 10.000 år. De sendes i lange rør til Danmark, hvor de analyseres på forskellig vis.

RØNTGENFOTOGRAFERING

Røntgenbilleder giver forskerne en tredimensionel forståelse af, hvilken struktur og type af sediment borekerne består af.

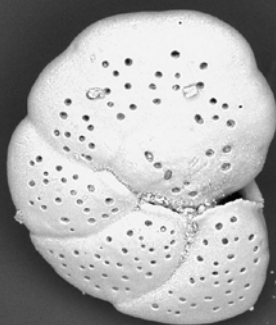
Billederne viser, om sedimentet egner sig til klimaundersøgelser, eller om der har været forstyrrelser i sedimentet – for eksempel et undersøisk jordskred – som har ødelagt historietællingen.

Røntgenbillede af en borekerne bestående af smeltevandssedimenter. De lysere lag er en smule grovere sediment, der kan dannes, når der er mere fart på smeltevandet.

FOSSILANALYSER

Forskerne kortlægger fortidige klimaændringer ved at studere sedimentets indhold af biologiske efterladenskaber fra organismer, der levede i vandsøjlen eller på havbunden, for eksempel foraminiferer. Foraminiferer er encellede organismer, der danner en beskyttende kalkskal omkring sig.

Ved at studere skallerne under et mikroskop afgør forskerne, hvilke arter af foraminiferer der er aflejret i forskellige perioder. Nogle arter foretrækker for eksempel varmere vand end andre. Artssammensætningen er derfor en proxy for temperaturer. Foraminifererne bruges til at datere sedimentet med kulstof-14-metoden, som du kan læse mere om på geoviden.dk/fortidsklima.



Elektronfoto af en foraminifer af arten *Cibicides lobatulus*. Finder man den i en borekerne fra havbunden i en grønlandsk fjord, indikerer det, at der har været en relativt stærk strøm ved havbunden. Størrelsen er 200 mikrometer.

ME SDA test 0001 10.5mm X250 07/30/2024

200µm

Foto: Matt Hunt

TILBAGE TIL FORTIDENS HAV

I sommeren 2024 var geolog og professor Camilla Snowman Andresen og andre forskere på togt med forskningsskibet Sir David Attenborough. Fra skibet bo-



rede de bl.a. sedimentkerner op af havbunden i en række fjorde i Østgrønland. Kernerne består af mudder og sand fra Indlandsisens gletsjere samt spor efter skaller og biologisk materiale. Ved at analysere kernerne på forskellige måder kan geologerne få et indblik i, hvordan havet påvirkede gletsjerafsmeltning i fortiden.

Det er sand i sedimentkernerne, der fortæller Camilla S. Andresen, at Indlandsisen er skrøbelig. Sandet kommer fra grundfjeldet under Indlandsisen.

Isbjerge bringer sandet med sig, når de knækker af Indlandsisens gletsjere og flyder ud på fjordene. Når bjergene smelter, synker sandet hurtigt til bunds.

På fjordbunden adskiller sandet fra Indlandsisens grundfjeld sig markant fra det mudder, det bliver begravet i. Derfor kan sandet bruges som en proxy – det vil sige indikator – for, hvor meget is der i tidens løb er knækket af iskappen.

”Forsimpelt sagt er konceptet: Jo mere sand vi finder i en prøve fra en bestemt periode, desto flere isbjerge må der have været,” forklarer hun.

HVORFOR KÆLVEDE HELHEIM-GLETSJEREN?

I et af sine studier har Camilla S. Andresen analyseret sediment, der op gennem det 20. århundrede er blevet aflejret i den østgrønlandske fjord Semilik. Det er her, Grønlands tredjestørste gletsjer, Helheim-gletsjeren, kælver.

Professoren studerede, hvor meget sand fra Indlandsisen der i forskellige perioder er sunket til bunds. Formålet var at finde ud af, hvorfor Helheim-gletsjeren og andre udløbsgletsjere pludselig begyndte at kælve meget mere end normalt i starten af 00'erne.

Når Indlandsisens gletsjere kælver, betyder det, at store flager knækker af som isbjerge, der flyder ud på fjorde og have.

Analyserne af sediment fra Semilik-fjorden afslørede, at Helheim-gletsjerens øgede kælving i starten af

00'erne ikke var usædvanlig. Op gennem 1900-tallet har isen flere gange reageret hurtigt på små, midlertidige temperaturudsving.

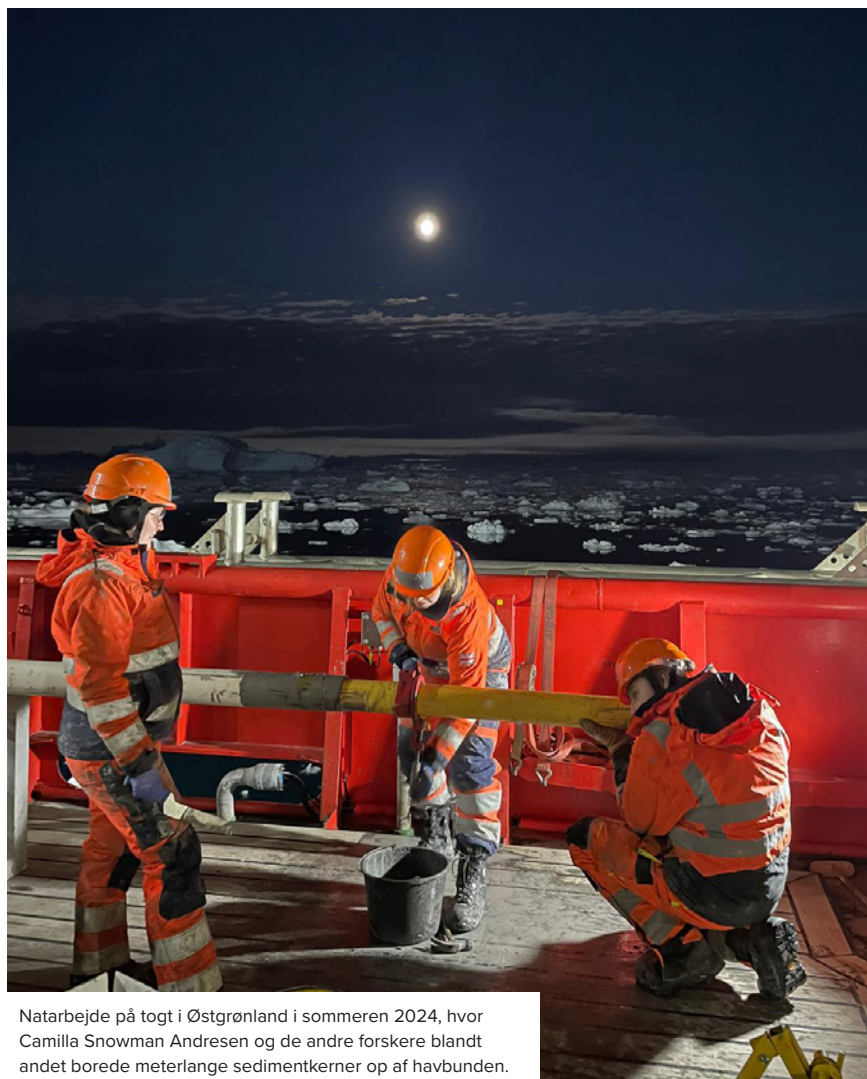
Da gletsjerne begyndte at kælte meget mere end normalt i 2000 til 2005, skyldtes det højst sandsynligt, at isen reagerede på den globale opvarmning og et klimatisk fænomen kendt som den Nordatlantiske Oscillation (NAO), forklarer Camilla S. Andresen.

NAO er forårsaget af svingninger i det atmosfæriske tryk ved havoverfladen i Nordatlanten. I starten af 00'erne medførte fænomenet, at vandtemperaturen omkring Grønland midlertidigt steg en smule.

Indlandsisens gletsjere reagerede altså prompte på temperaturstigningen ved at kælte mere, ligesom de har gjort flere gange tidligere.

FORSKNING BLIVER BRUGT AF FN'S KLIMAPANEL

Studiet er ikke det eneste, Camilla S. Andresen har lavet, som viser, at Indlandsisen reagerer prompte på temperaturændringer.



Natarbejde på togt i Østgrønland i sommeren 2024, hvor Camilla Snowman Andresen og de andre forskere blandt andet borede meterlange sedimentkerner op af havbunden.

“Vi kender endnu ikke de fulde konsekvenser, men én ting er sikkert: Indlandsisens afsmeltning vil have betydning for klimaet langt væk fra Grønland.”

CAMILLA SNOWMAN ANDRESEN

PROFESSOR, GEUS

Igennem årene har hun samlet borekerner fra adskillige udløbsgletsjere. Analyserne viser, at:

- et varmt klima samtidig med Romertiden (0-300 AD) og i Middelalderen (900-1200 AD) fik nogle af Indlandsisens udløbsgletsjere til at smelte hurtigere end normalt.
- mange af de grønlandske gletsjere var mere stabile og fremskredne før den globale opvarmning. Før i tiden producerede gletsjerne slet ikke så mange isbjerger som i dag.

”Vi har dokumenteret, at udløbsgletsjere reagerer hurtigere på temperaturforandringer, end man havde regnet med,” siger Camilla S. Andresen.

Palæoklimatologi bidrager på den måde med vigtig og samfundsrelevant forskning, som er nødvendig for at forstå konsekvenserne af den nuværende globale opvarmning, mener hun:

”Vi kender endnu ikke de fulde konsekvenser, men én ting er sikkert: Indlandsisens afsmeltning vil have betydning for klimaet langt væk fra Grønland. Vi ved fra andre palæoklimatiske studier, at smeltevand i meget store mængder påvirker overfladetemperaturen og saltholdigheden i Nordatlanten.”

Små temperaturændringer i det nordatlantiske hav kan forplante sig til større klimatiske forandringer, der har betydning andre steder i verden.

”Lige nu prøver vi at finde ud af, hvor meget og hvor hurtigt smeltevand fra Indlandsisen skal fosse ud i havet for at igangsætte ændringer i klimaet,” afslutter Camilla S. Andresen. •

AFLÆSER FORTIDENS KLIMAFORANDRINGER SOM MUSIK

Istiders kommen og gåen skyldes kosmiske fænomener, der medfører, at Jorden gradvist ændrer afstand til Solen over tusindvis af år. I sedimenterne sætter de medfølgende klimaforandringer aftryk, der kan aflæses som rytmer i musik, siger palæoklimatologen Nicolas Thibault.

TEKST: ANNE RINGGAARD · LAYOUT: LYKKE SANDAL

I boreprøver fra dybhavet har palæoklimatolog Nicolas Thibault fundet op til 500 millioner år gamle aftryk efter kosmiske cyklusser, der styrer de naturlige udsving i Jordens

klima, såsom istiders begyndelse og afslutning.

”Cyklusserne er meget tydeligt udtrykt. Det er smukt. Jeg forventede ikke, at de ville være så velbevarede i så gamle sedimenter,” fortæller Nicolas Thibault, der er professor i geologi på Københavns Universitets Institut for Geoviden-skab og Naturforvaltning.

Aftrykkene efter klimaforandringer i dybhavets sedimenter skyldes, at Jordens bane rundt om Solen ændrer sig gradvist i cyklusser på tusindvis af år.

Det medfører, at mængden af varme fra Solen varierer, så temperaturen på Jorden gradvist stiger og falder, uanset om der er drivhusgasser, vulkaner eller tektonisk aktivitet.

Temperaturændringerne påvirker sammensætningen af mineraler og materialer i sedimenternes lag.

Nogle palæoklimatologer beskriver de cykliske udsving og de aftryk, de sætter, som et klassisk orkestres symfoni, hvor hver tone og takt bestemmes af kosmiske rytmer.

”At forske i orbitale cyklusser er som at aflæse musik. Vi inddeler klimaets musik i frekvenser,” forklarer Nicolas Thibault, mens han banker en kuglepen rytmisk ned i sit skrivebord.

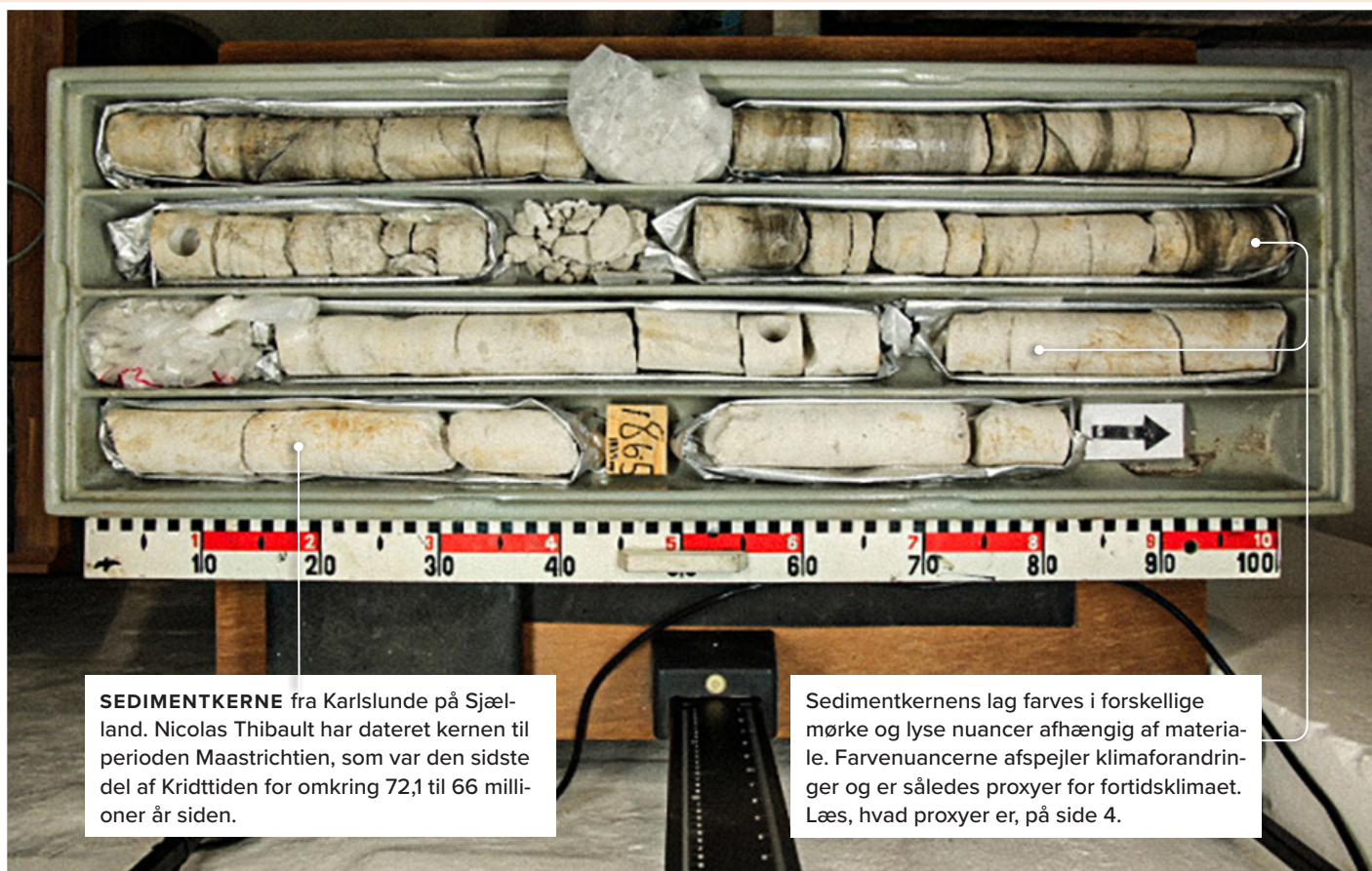
78 MIO. ÅR GAMLE AFTRYK

Nicolas Thibault bruger de aftryk, cyklusserne sætter, til at datere sedimenters lag og kortlægge fortidens klimaforandringer. Han har blandt andet været med til at rekonstruere klimaet og årstidernes skiften på vores breddegrader, da dinosaurerne levede for 78 millioner år siden. Rekonstruktionen viste, at den gennemsnitlige overfladetemperatur i havet omkring den sydsvenske ø Ivö dengang var 27°C om sommeren og 12-15°C om vinteren.



Foto: Carsten E. Thiesen

Professor Nicolas Thibault ved mikroskopet på sit kontor på Københavns Universitet. Nicolas Thibault er geolog med speciale i orbitale klimaændringer og kalkholdige fossiler.



SEDIMENTKERNE fra Karlslunde på Sjælland. Nicolas Thibault har dateret kernen til perioden Maastrichtien, som var den sidste del af Kridttiden for omkring 72,1 til 66 millioner år siden.

Sedimentkernens lag farves i forskellige mørke og lyse nuancer afhængig af materiale. Farvenuancerne afspejler klimaforandringer og er således proxyer for fortidsklimaet. Læs, hvad proxyer er, på side 4.

I dag er den gennemsnitlige temperatur i havet i det samme område 3°C om vinteren og 17°C om sommeren.

Palæoklimaets temperaturer og de orbitale cyklusser aflæser Nicolas Thibault i de lag af sediment, der gennem millioner af år er blevet aflejret under havet.

PROFESSORENS FREMGANGSMÅDE

”I første omgang er det nyttigt simpelthen at kigge på farverne i boreprøverne,” forklarer Nicolas Thibault.

DYBHAVET er en betegnelse for områder i havene, hvor havdybden er over 1.000 meter.

Borekerner fra dybhavet er særligt gode til at datere klimaforandringer. Det skyldes, at sedimenterne så dybt nede har været stort set uforstyrrede i millioner af år.

”Tættere på kysterne er der et meget mere dynamisk miljø, så sedimenterne bliver udsat for forstyrrelser over tid. I dybhavet er der langt større chancer for at få sammenhængende optegnelser med færre huller,” siger Nicolas Thibault.

Sedimenter fra havbunden består af materialer i forskellige farver, for eksempel kalk, sand, ler og jern.

- Kalk er hvidt
- Sandkorn er gule, pink eller gennemsigtige.
- Ler er brunt eller sort
- Jern er rødt

Sammensætningen af materialerne og dermed farven på sedimentet afhænger af klimaet.

I fugtige perioder, hvor det regner og blæser meget, bliver ler, jern og sand skyllet ud i havet fra kontinenter og fjorde. I de perioder farves sedimentet derfor i grålige eller brunlige nuancer.

I koldere og tørrere perioder er sedimentet hvidere, fordi det indeholder en højere koncentration af kalk. Kalken stammer fra skaller, der falder af forskellige arter af havdyr og plankton. I perioder, hvor det ikke regner ret meget, daler skallerne uforstyrret ned og lægger sig i lag på havbunden uden at blive blandet med farverige mineraler og sandkorn.

MAGNETISME SLADRER OM KLIMAET

Farverne i sedimentet er ikke den eneste proxy – det vil sige indikator – for fortidens klima, som Nicolas Thibault kigger efter. Han måler også sedimentets grad af magnetisk modtagelighed.

Magnetisk modtagelighed beskriver, hvor let et materiale kan blive magnetiseret, når det udsættes for et magnetfelt. Magnetiske mineraler som hæmatit og magnetit bliver dannet på landjorden af magma, som er smeltet klippemateriale dannet i Jordens indre.

”Hvis der er meget magnetisk modtagelighed i sediment fra havbunden, ved vi, at det formentlig er aflejret i en fugtig periode med meget erosion. For jo mere forvitring der er på land, desto flere magnetiske mineraler bliver skyllet ud i havet. Det er en god, hurtig og billig palæoklimatisk proxy, som jeg bruger meget i min forskning,” siger Nicolas Thibault.

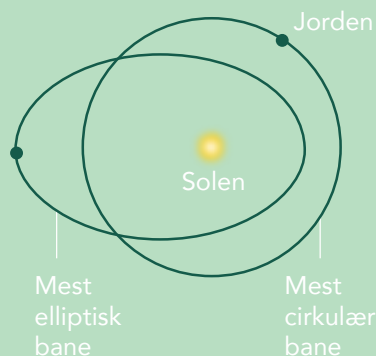
ORBITALE CYKLUSSE I SEDIMENT

Graden af magnetisk modtagelighed og sedimentets farvesammensætning afspejler således klimaforandringer,

DE TRE MILANKOVIĆ-CYKLER:

CYKLUS 1

EXCENTRICITET



1. Excentricitet: Jordens bane om Solen er ikke en perfekt cirkel. Det er en ellipse, som ændrer form fra at være næsten cirkelformet til at blive mere og mere elliptisk over en periode på cirka 100.000 år. Jo mere elliptisk banen er, desto større er forskellen på, hvor meget lys og varme Jorden får i løbet af et år – dvs., at der er størst kontrast mellem årstiderne, når banen er mest elliptisk.

som blandt andet skyldes, at Jorden langsomt over 100.000 år ændrer bane om Solen fra at kredse i en let aflang cirkel – en ellipse – til at bevæge sig i en mere cirkulær rute og tilbage igen.

Planetens hældning og rotation om sig selv ændrer sig samtidig i cyklusser over tusindvis af år.

De tre forhold – Jordens bane, hældning og rotation – er afgørende for, hvor meget energi Jorden får fra solen.

De orbitale cyklusser bestemmer derfor grundlæggende temperaturerne på Jorden og kontrasterne mellem årstiderne. Og disse forhold er afgørende for, hvor fugtigt klimaet er.

Cykluserne kaldes også Milanković-cykler efter den serbiske ingeniør og matematiker Milutin Milanković, som oprindeligt beskrev dem i starten af 1900-tallet. Milanković-cykluserne er årsag til, at Jorden igen og igen skal igennem millioner af år lange istider, der med jævne mellemrum bliver afløst af varmere mellemistider, som den vi nu befinder os i.

AFTRYK KAN BRUGES TIL AT DATERE SEDIMENTER

Når Nicolas Thibault finder aftryk efter de tre Milanković-cykler i sedimentets sammensætning, kan han datere lagene i en boreprøve.

”Vi kender længden på cyklusserne, så vi kan bruge de aftryk, de har sat i sedimenterne, til at tælle tiden,” forklarer han og uddyber:

”Vi ved, at der er cyklusser på omkring 20.000, 40.000, 100.000 og 405.000 år. Så vi kan datere sedimentet meget præcist og placere klimaforandringer tidsmæssigt. Så bliver det interessant, for så kan vi underindele sedimentkerner i små bidder af tid og få et billede af, hvor hurtigt klimaet har forandret sig i fortiden.”

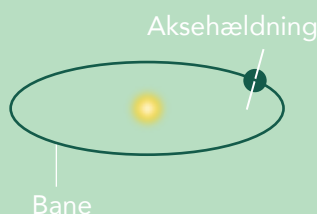
Når Nicolas Thibault har fundet Milanković-cykluserne i en boreprøve, kan han afkode, om der er tegn på

2. Aksens hældning (inklination):

Mens Jorden følger banen, drejer den rundt om sig selv. Rotationsaksen hælder. Hældningen varierer mellem cirka 22,1 og 24,5 grader over en periode på omkring 41.000 år. Når hældningen er mindst, er der mindst kontrast mellem årstiderne.

CYKLUS 2

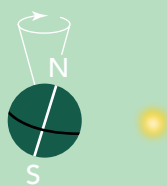
INKLINATION



3. Præcession: Jorden roterer samtidig rundt om sig selv som en snurretop, der tilter i slowmotion. Akseretningen ændres langsomt over en periode på cirka 26.000 år. Det påvirker tidspunktet for, hvornår forskellige årstider indtræffer.

CYKLUS 3

PRÆCESSION



Aksens orientering

“At forske i orbitale cyklusser er som at aflæse musik. Vi inddeler klimaets musik i frekvenser.”

NICOLAS THIBAUT

PROFESSOR, KU

klimaforandringer, som skyldes andre forhold end Jordens afstand til solen.

Hvis sedimentet for eksempel pludselig er brunt og meget magnetisk modtageligt i en periode, hvor klimaet på grund af de orbitale cyklusser burde være koldt, kan det være et tegn på, at andre faktorer – for eksempel vulkanudbrud eller tektoniske bevægelser – har ført til temperaturstigninger.

KLIMAET ÆNDRES I REKORDFART

Ingen af de fortidige klimaændringer, Nicolas Thibault og hans fagfæller

har sporet, er sket så hurtigt som den nuværende globale opvarmning.

”Vi har tidligere haft perioder med voldsomme opvarmninger, for eksempel i det palæocene-eocæne termale maksimum, hvor temperaturen steg med 5 til 8°C på mindre end 10.000 år,” siger Nicolas Thibault.

Det palæocene-eocæne termale maksimum (PETM) er en periode for omkring 56 millioner år siden, hvor temperaturen på Jorden steg dramatisk. Det skyldtes formentlig vulkanisme, der

OPVARMNING FOR 56 MIO. ÅR SIDEN

Da temperaturen på Jorden steg voldsomt for 56 millioner år siden i det palæocene-eocæne termale maksimum (PETM), skyldtes opvarmningen i første omgang sandsynligvis vulkaner, som frigav store mængder CO₂ og metan til Jordens atmosfære.

Det højere niveau af drivhusgasser kan have ført til yderligere opvarmning på grund af:

Nedbrydning af metanhydrater: Store mængder metan fanget under havet i iskrystaller (metanhydrater), kan være blevet frigivet, da havvandet blev varmere. Det kan have medført et højere niveau af metan i atmosfæren og dermed øget global opvarmning.

Biologisk nedbrydning: Opvarmningen kan have medført, at organisk materiale i jord og sedimenter er blevet nedbrudt. Når organisk materiale nedbrydes, bliver der frigivet CO₂ og metan til atmosfæren.

førte til en massiv udledning af drivhusgasser, især CO₂.

Perioden er blevet studeret grundigt, blandt andet af Nicolas Thibault, fordi den måske kan gøre os klogere på konsekvenserne af nutidens klimaforandringer.

I løbet af PETM skyldtes den høje udledning af CO₂ naturlige processer, og opvarmningen skete meget langsommere, end den gør i dag.

I det seneste århundrede er den globale gennemsnitstemperatur steget med cirka 1°C. Det forventes, at den kan stige med yderligere 2-4°C indenfor det næste århundrede, hvis drivhusgasudledningerne fortsætter uformindsket.

Det betyder, at temperaturen vil stige 5-8°C på få hundrede år – under PETM tog det flere tusinde år. •

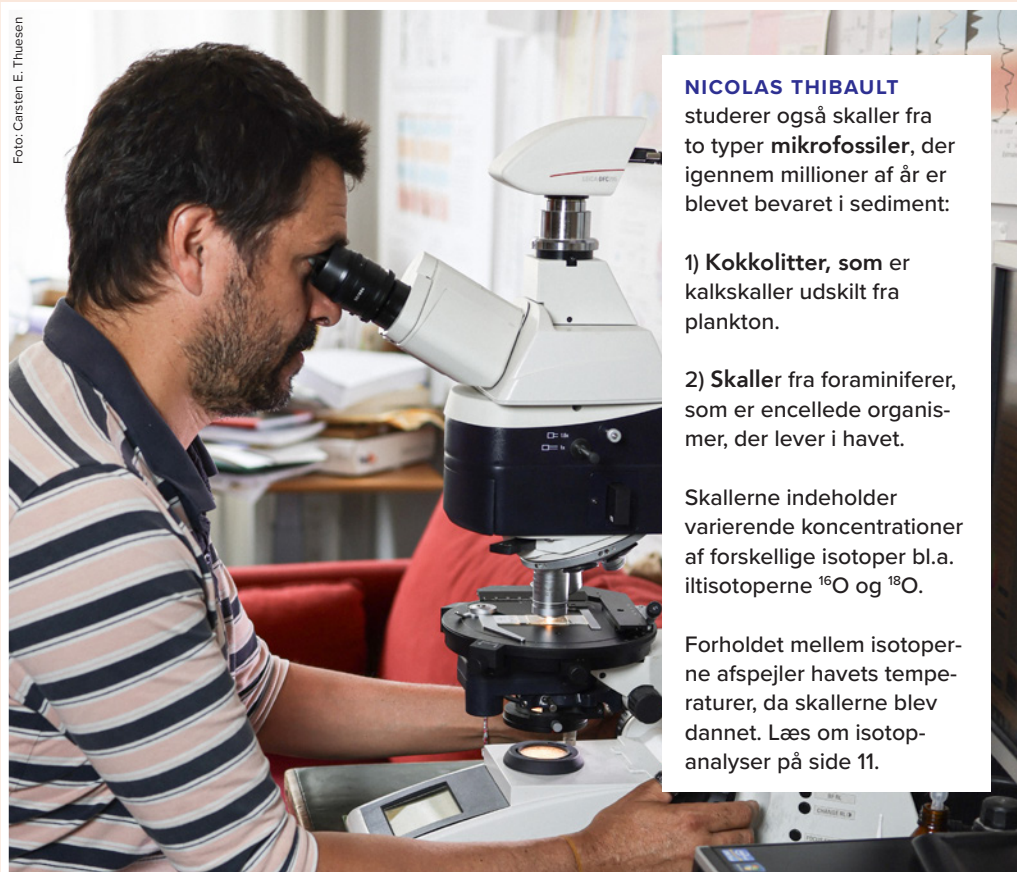


Foto: Carsten E. Thuesen

NICOLAS THIBAUT

studerer også skaller fra to typer **mikrofossiler**, der igennem millioner af år er blevet bevaret i sediment:

1) **Kokkolitter**, som er kalkskaller udskilt fra plankton.

2) **Skaller** fra foraminiferer, som er encellede organismer, der lever i havet.

Skallerne indeholder varierende koncentrationer af forskellige isotoper bl.a. iltisotoperne ¹⁶O og ¹⁸O.

Forholdet mellem isotoperne afspejler havets temperaturer, da skallerne blev dannet. Læs om isotopanalyser på side 11.



SOFIA RIBEIRO

Professor i Afdeling for Glaciologi og Klima ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS). Tilknyttet Sektion for Geogenetik, Globe Institut, Københavns Universitet. Ph.d. i Biologi fra Københavns Universitet.



FORHISTORISK DNA:

EN GAMECHANGER FOR KLIMADETEKTIVERNE

TEKST: ANNE RINGGAARD · LAYOUT: LYKKE SANDAL

Havbunden er fyldt med DNA, der kan give viden om fortidens klimaforandringer, og hvordan de har påvirket havets økosystemer.

Havbunden er en gravplads. Gennem millioner af år er fisk, plankton, bakterier og andre organismer blevet begravet i muddret dybt under vandet. Organismerne har efterladt DNA, og takket være moderne genteknologi kan palæoklimatologer nu gå på opdagelse i det skatkammer af information, de genetiske spor fra fortiden indeholder.

”Nye genteknologiske metoder er en komplet gamechanger i palæoforskning,” siger Sofia Ribeiro, der er professor i afdeling for Glaciologi og Klima i GEUS – De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland.

Analyser af fortidig DNA i sedimentet kan give viden om, hvordan klimaforandringer før i tiden har påvirket havets

“Havisen forsvinder ekstremt hurtigt i øjeblikket. Vi har brug for at forstå, hvilke konsekvenser det har for økosystemet.”

SOFIA RIBEIRO
PROFESSOR, GEUS



økosystemer. Dermed bliver forskerne klogere på, hvilke konsekvenser den nuværende globale opvarmning fremover kan få for havets liv.

Det er vigtigt, ikke kun fordi marine organismer indgår i menneskers og andre dyrs fødekæder. Men også fordi havets planter, dyr og mikrober optager og lagrer CO₂, som ellers bliver frigivet til atmosfæren, hvor det bidrager til global opvarmning. Ændringer i havets økosystemer kan altså medvirke til at forstærke eller bremse klimaforandringerne.

”Havets økosystem er et komplekst netværk af arter. I øjeblikket uddør de hurtigere, end vi kan nå at beskrive dem. På verdensplan står vi midt i den sjette masseuddød. Når en art uddør, er den væk for evigt. Vi ved ikke, hvilke konsekvenser det får i det lange løb,” siger Sofia Ribeiro.

ET STØRRE VINDUE TIL FORTIDEN

Med de nye genteknologiske metoder er Sofia Ribeiro og >

DNA SOM PROXY FOR FORTIDSKLIMA

Sofia Ribeiro og hendes fagfæller sejler ud på store ekspeditioner, hvor de borer sedimentkerner op fra havbunden i Arktis.

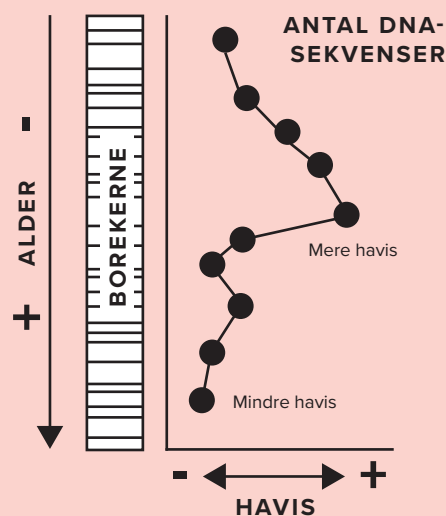
Sedimentkernerne sendes til forskernes laboratorier, hvor de bruger forskellige genteknologiske metoder til at udskille DNA-sekvenser fra organismer, der i tidens løb er begravet i havbunden.

Nogle gange analyserer forskerne al den DNA, der er i sedimentet. Det er gavnligt, hvis de vil kortlægge hele økosystemet.

Andre gange bruger de en metode, der kan udtrække DNA fra bestemte arter. Det er gavnligt, hvis de vil kortlægge fortidens klima:

Forestil dig, at forskerne vil undersøge, om der var havis i en bestemt periode, og at de ved, at en bestemt organisme kun kan leve i vandet, når der er havis på overfladen. Så kan de gå målrettet efter at udtrække DNA fra netop den organisme. Hvis der ikke findes DNA fra organismen i et lag i sedimentet, er det et tegn på, at der ikke var havis i den periode, hvor laget blev aflejret i havbunden.

Sofia Ribeiro og hendes kollegaer har fundet ud af, at en bestemt art plankton med det latinske navn *Polarella glacialis* kan bruges til netop det formål, fordi den kun findes i havet, når der er havis. Ved at opgøre, hvor mange sekvenser af *Polarella glacialis*' DNA der er i sedimentlagene, kan de estimere, hvor meget havis der har været i forskellige perioder.



Figuren her viser helt forsimplet, hvordan antallet af DNA-sekvenser i sedimentlag i en borekerne kan variere alt efter alderen på det pågældende lag – og hvordan det hænger sammen med mængden af havis.

DNA FRA 234 METERS DYBDE

Sofia Ribeiro og hendes kollegaer forsøger at få fat i DNA fra sediment, der er blevet aflejret i havbunden for millioner af år siden. Så gammelt sediment ligger ofte meget dybt nede, og det kræver store skibe med særligt boreudstyr at nå ned til det.

Ekspeditionerne med dybhavsboringer er omkostningstunge og gennemføres af store internationale initiativer såsom det internationale havforskningsprogram IODP (International Ocean Discovery Programme).

I 2023 var flere forskere fra De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) med



om bord på en af IODP's ekspedition til Nordvestgrønland. De hentede meget gamle sedimentprøver, som var begravet ned til 234 meter under havbundens overflade.

GEUS-forskerne analyserer nu de værdifulde sedimentprøver i samarbejde med forskere fra Københavns Universitet.

DNA-forsker Heike Zimmermann tager prøver fra en sedimentkerne ombord på den internationale IODP-ekspedition.

hendes fagfæller begyndt at kortlægge fortidens marine økosystemer i Arktis.

Hidtil har palæoklimatologernes værktøjskasse bestået af efterladenskaber fra ganske få marine arter, primært mikrofossiler med navne som foraminiferer, dinoflagellater og kokkolitter. (Se side 4-5.)

Fossilerne vidner om fortidens temperaturer og klimaforandringer. Men de giver ikke det fulde billede, og de fortæller ikke noget om, hvordan temperaturændringer har påvirket hele økosystemet, eller hvilke konsekvenser det har, når arter uddør på grund af klimaforandringer.

”DNA-analyser åbner et meget større vindue til fortiden. I havsedimenter omkring Grønland finder vi typisk omkring 20 til 50 arter af mikrofossiler. Dertil kan vi nu pludselig føje

DNA-sekvenser fra tusindvis af arter. En enkelt boreprøve fra bunden af havet er fyldt med fragmenter af DNA fra bakterier, plankton, fisk – alt, hvad der har levet i vandet,” siger Sofia Ribeiro.

DNA GIVER INFO OM PALÆOKLIMAET

Den nye metode går i korte træk ud på, at Sofia Ribeiro og hendes fagfæller borer lange kerner af sediment op fra bunden af oceaner og fjorde. De trækker DNA-sekvenser ud af sedimentet, analyserer dem og tilføjer dem til en international database (se boksen på side 32). I øjeblikket finder Sofia Ribeiro og hendes fagfæller konstant DNA-sekvenser, der ikke er opført i databasen i forvejen.

”Det er ret fantastisk, at der er så meget nyt at udforske,” siger professoren.

Forskerne er også begyndt at bruge DNA fra havbunden til at rekonstruere fortidens klima. Det kan de gøre, hvis de opdager, at der i tidligere perioder er sket store ændringer i sammensætningen af genetisk materiale i sedimentet, samtidig med at mængden af havis, temperaturen og andre klimamarkører er forandret. I så fald er det et tegn på, at klimasvingninger kan aflæses i sammensætningen af DNA i sedimentet. (Se faktaboksen herunder.)

Sofia Ribeiro bruger selv de nye teknologier til at udtrække og analysere DNA-sekvenser fra sediment hentet i farvand med havis omkring Grønland. Målet er at kortlægge havisens udbredelse i løbet af Holocæn, som er den geologiske epoke, der strækker sig fra i dag og cirka 11.700 år tilbage i tiden.

”Hvis vi i et lag finder arter, som kun kan leve i is, har der sandsynligvis været havis i den periode, hvor de blev deponeret i sedimentet,” forklarer Sofia Ribeiro.

På sigt håber professoren, at hendes forskning giver viden om, hvor følsom havisen er over for klimaforandringer, og hvad der sker med de marine økosystemer, når havisen smelter, som det sker i øjeblikket.

Derudover tester hun og hendes kollegaer, hvor langt tilbage i tid de kan komme med metoden: Det er endnu usikkert, om de i sediment fra Arktis kan opsamle DNA, der er flere millioner af år gammelt. En af udfordringerne er, at varme fra Jordens indre – det kaldes geotermisk varme – nedbryder DNA. Jo dybere i sedimentet det er begravet, desto større risiko er der for, at det er nedbrudt.

”Forskningsfeltet er stadig relativt nyt, og vi ved endnu ikke, hvor langt tilbage i tid vi kan finde DNA fra fortidige organismer i marine sedimenter. Det bliver spændende at finde ud af,” afslutter Sofia Ribeiro. •

I UBERØRT FARVAND:

FORHISTORISK DNA DYBT UNDER VERDENS TYKKESTE HAVIS

HVAD ER HAVIS?

Havis er frossent havvand, der dannes på havoverfladen, især i polare regioner som Arktis og Antarktis.

Havis spiller en vigtig rolle for Jordens klima. Det skyldes, at de store hvide isflager på havoverfladen reflekterer Solens energi tilbage til rummet – det kaldes albedo-effekten.

Når havis smelter, absorberer det mørkere havvand mere solenergi, hvilket bidrager til, at havvandet og Jordens atmosfære varmes yderligere op.

Havis er også afgørende for økosystemer i polare regioner, fordi isen er levested for arter som isbjørne, sæler og pingviner.

En canadisk isbryder trængte i 2023 igennem isen på Nares Strædet mellem Grønland og Canada. Ombord var Sofia Ribeiro sammen med 36 kollegaer fra Canada, Frankrig og USA. Forskerne skulle blandt andet hente DNA og andre palæoklimatiske spor i det isdækkede farvand.

Ekspeditionen var en af de første forskningstogter, der nåede helt op i den nordlige del af strædet. Det er en ekstremt ufremkommelig passage, som året rundt er dækket af noget af den tykkeste havis i verden. Isbryderen CCGS Amundsen brød tilmed igennem isdækket på Archer Fjord i Nordgrønland.

”Næsten ingen forskere har været på den fjord før os. Vi kiggede på kort over havbunden, og pludselig blev de bare helt blanke,” husker Sofia Ribeiro.

Professoren var med på isbryderen for at hente boreprøver i sedimentet under det 800 meter dybe isdækkede farvand.

Netop Nares Strædet spiller en vigtig rolle for klimaet og det marine økosystem i Nordatlanten: Strædet løber ud i Lincoln Havet, som er dækket af den tykkeste havis i verden og derfor forventes det at være det sted på kloden, hvor

isen længst kan modstå den globale opvarmning. Lincoln Havet betragtes derfor også som det sidste tilflugt for økosystemer, som er afhængige af havis.

”Havisen forsvinder ekstremt hurtigt i øjeblikket. Vi har brug for at forstå, hvilke konsekvenser det har for økosystemet i dette område. Ekspeditionen var vigtig og nervepirrende: Først spændingen over, om vi overhovedet kunne komme derop, og derefter, om vi kunne få boreprøverne op,” husker professoren.

Det lykkedes at få de første prøver fra Nares Strædet med hjem til Danmark. Prøverne har Sofia Ribeiro sidenhen fordelt blandt de anerkendte forskere rundt omkring i verden. De analyserer sedimentet for DNA for at få et samlet billede af, hvilke dyr og mikroorganismer der har levet i vandet i løbet af den Holocæne epoke.

I sommeren 2024 sejler isbryderen CCGS Amundsen igen mod Nares Strædet med blandt andre ph.d.-studerende Anna Kvorning fra GEUS ombord for at hente flere prøver. Bag ekspeditionerne står en international sammenslutning af forskere fra forskellige videnskabelige discipliner.

Udgiver: Geocenter Danmark

Ansvarshavende:
Anja Fonseca, GEUS

Redaktør og skribent:
Fie Krøyer Dahl, GEUS

Design: Lykke Sandal, GEUS

Korrektur:
Caroline Dea Rutter, GEUS

Forsidefoto: EUMETSAT

Tryk: Strandbygaard

Eftertryk: Tilladt med kildeangivelse, videresalg ikke tilladt. Læs mere på geoviden.dk/copyright

Kontakt: geoviden@geus.dk

www.geoviden.dk

ISSN: 1604-6935 (papir)

ISSN: 1604-8172 (elektronisk)

GEOCENTER D A N M A R K

Geoviden udgives af Geocenter Danmark og er målrettet undervisningen i gymnasierne. Der udkommer to blade og en plakat om året. Abonnement er gratis og tegnes på geoviden.dk. Her kan man også læse bladet og finde ekstrap materiale, bl.a. video.

Geocenter Danmark, der udgiver Geoviden, er et samarbejde mellem De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet samt Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning og Statens Naturhistoriske Museum, begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidenskabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.



Den danske professor og fysiker Willi Dansgaard opdagede, at man kan bruge forholdet mellem ilt-isotoper i nedbør til at blive klogere på klima.

FORSØG MED ØLFLASKER BANEDE VEJEN FOR KLIMAFORSKNING

Det var den danske professor og fysiker Willi Dansgaard, som i 1950'erne på en lidt utraditionel måde fandt ud af, at man kan bruge forholdet mellem ilt-isotoper til at få viden om fortidens temperaturer. Isotoper er varianter af det samme grundstof.

Willi Dansgaard var ansat på Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet, da han lavede en række hjemmestrikkede eksperimenter med ølflasker og regnvand i sin have.

Professoren ville undersøge, om isotoper i nedbør varierer med temperaturen. Det gjorde han ved at opsamle regnvand i ølflasker over en periode. Derefter analyserede han regnvandets indhold af isotoper.

Analyserne viste, at der er en klar sammenhæng mellem temperaturen ved nedbørens dannelse og forholdet mellem de to ilt-isotoper ^{16}O og ^{18}O i regnvandet. Denne opdagelse lagde grunden for at bruge ilt-isotoper til at få viden om fortidens temperaturer.

Willi Dansgaards arbejde har siden været en hjørnesten i studierne af fortidens klima – også kaldet palæoklimatologi. Hans metoder bruges den dag i dag af forskere i hele verden til at kortlægge fortidens klimaforandringer.

Læs mere om Willi Dansgaards vigtige arbejde i Geoviden nr. 3/2019. Det ligger på geoviden.dk/indlandsisen.



DE NATIONALE GEOLOGISKE
UNDERSØGELSER FOR DANMARK
OG GRØNLAND (GEUS)
www.geus.dk



INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB
OG NATURFORVALTNING (IGN)
www.ign.ku.dk

STATENS NATURHISTORISKE
MUSEUM (SNM)
www.snm.ku.dk



AARHUS
UNIVERSITET

INSTITUT FOR GEOSCIENCE (IG)
AARHUS UNIVERSITET
www.geo.au.dk