

DNA i havbunden under Arktis er økosystemernes historiske hukommelse

Om få årtier vil Arktis efter alt at dømme opleve somre helt uden havis for første gang i menneskehedens historie. For at forstå, hvilke konsekvenser det vil få, graver danske forskere ned i havbundens mudder, hvor flere tusind års klimahistorie ligger gemt i gammelt DNA.

■ Af Kristian Sjøgren, videnskabsjournalist. ksjoegren@gmail.com



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

■ Sofia Ribeiro står her med en cirka 5 meter lang borekerne fra den nordvest-grønlandske havbund. Her repræsenterer 5 meter sediment cirka 12.000 år.
Foto: Frederik W. Teglbjærg / Underground Channel



SOFIA RIBEIRO

Sofia Ribeiro er professor ved Glaciologi og Klimaafdelingen i De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS. Hun er også tilknyttet Globe Institutet ved Københavns Universitet. Sofia Ribeiro er uddannet fra Lissabon Universitet og Københavns Universitet, hvor hun forsvarede sin ph.d. i 2011. Derefter arbejdede hun som postdoc ved GEUS og Lund Universitet, inden hun blev forsker og senere seniorforsker ved GEUS.

Hun har altid haft en forskningsmæssig interesse i samspillet mellem klima, havmiljø og økosystemer i Arktis og søger gennem sin forskning at belyse, hvordan viden om fortidens klima- og miljøforandringer kan bidrage til at forstå og forudsige fremtidens udvikling. Hun er medlem af den danske, grønlandske og færøske komité for FN's *Tiår for havet* og er for nylig blevet optaget som medlem af Videnskabernes Selskab.

sri@geus.dk

■ ■ ■ ■ ■

Artiklen er sponsoreret af
Danmarks Frie Forskningsfond
| Natur og Univers.
Se mere på www.dff.dk

Der kommer en dag, hvor der om sommeren ligger åbent hav helt op til Nordpolen, uden så meget som en isflage i sigte. Blandt forskere er spørgsmålet efterhånden ikke længere, om det sker, men hvornår. Klimaforandringerne er ikke overraskende forklaringen. Havisen fungerer nemlig som et låg på det arktiske ocean. Den lægger sig mellem den kolde luft og det forholdsvis varme havvand som et isolerende lag, lidt ligesom låget på en termokande. Samtidig kaster den hvide overflade en stor del af solens stråler tilbage ud i rummet, så strålerne ikke har mulighed for at varme havet nedenunder op.

At havisen allerede er smeltet, er en af grundene til, at Arktis i dag varmer op tre til fire gange hurtigere end resten af kloden. Forandringerne helt oppe mod nord rækker langt ud over polaregnene og helt ned til vejret og fiskeriet ved vores egne kyster. Det arktiske og det atlantiske ocean hænger nemlig sammen via store havstrømme, der konstant flytter rundt på varme, salt og næring på hele den nordlige halvkugle. Netop der, hvor de to vandmasser mødes, er havet også aller mest produktivt, og en stor del af de fiskebestande, vi lever af i Nordatlanten, hviler på den balance. Rykker den sig, kan det i sidste ende mærkes helt ind på middagsbordet.

Men hvad sker der egentlig med dyr, planter og havstrømme, når isen trækker sig tilbage? Det er sværere at svare på, end man skulle tro. For selvom Arktis i dag bliver overvåget tæt med satellitter, bøger og målestationer, har forskere sjældent noget at holde tallene op imod. De ved, hvordan havet ser ud lige nu, men ikke hvordan det så ud, før vi mennesker for alvor begyndte at varme kloden op. Vi bevæger os med andre ord ind i ukendt territorium.

Danske forskere arbejder med at gøre dette territorium mindre ukendt, og det gør de blandt andet ved at analysere ældgammelt DNA dybt nede i havbunden. På den måde kan de se tilbage i tiden for bedre at kunne spå om fremtiden.

»I dag overvåger vi hele tiden et system, efter forandringen er sket. Vi opdager, at noget er galt, men vi ved ikke, hvordan det så ud før, eller hvad der egentlig er normalt. Derfor er vi nødt til at tage de lange briller på og gå tilbage i tiden for bedre at forstå nutiden og fremtiden,« fortæller professor Sofia Ribeiro fra Glaciologi og Klimaafdelingen i De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS. Sofia Ribeiro er også

tilknyttet Globe Institutet ved Københavns Universitet.

Havbunden er klodens største arkiv

De lange briller, som Sofia Ribeiro taler om, finder hun på bunden af havet. Hvert år drysser rester af døde alger, dyr og mineraler ned gennem vandsøjlen og lægger sig som et nyt, tyndt lag af mudder på havbunden. Fordi lagene stables pænt oven på hinanden over årene, årtierne, århundrederne og sågar årtusinderne, kan man læse dem nedefra og op som siderne i en meget lang dagbog. Med radioaktivt carbon (kulstof) kan forskerne også sætte årstal på de enkelte sider.

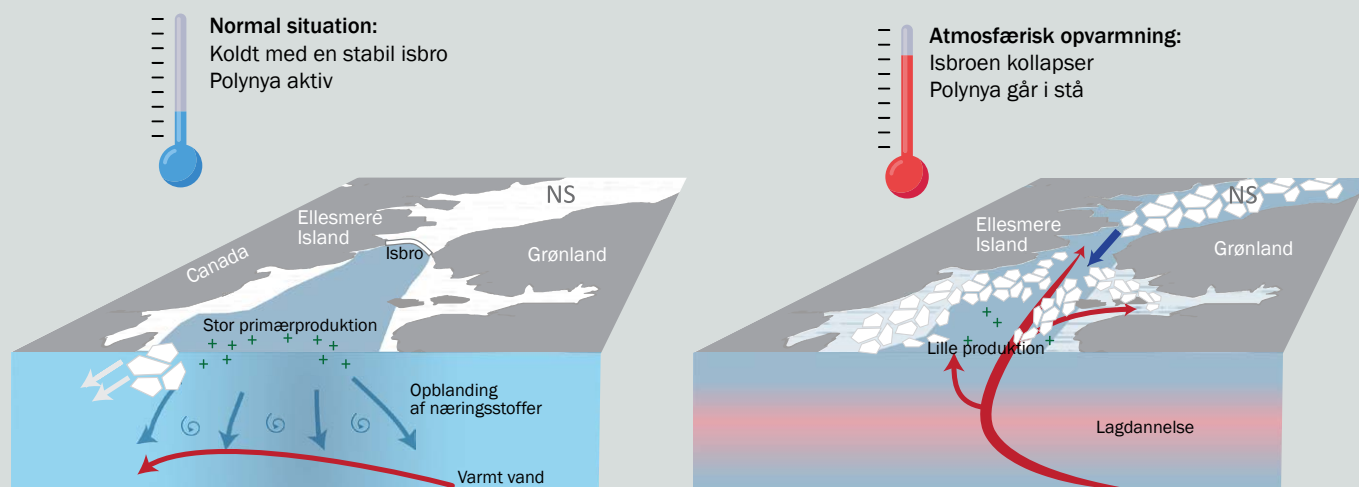
I årtier har forskere kunnet aflæse fortidens hav ved at studere mikroskopiske skaller og særlige fedtstoffer, som visse isalger efterlader sig i lagene af sediment (mudder). Men det helt store spring kom for ikke så lang tid siden, da de lærte at trække gammelt DNA ud af selve sedimentet. Når en organisme dør og synker til bunds, kan små stumper af dens arvemateriale nemlig overleve i tusinder af år, fordi havbunden er kold og iltfattig. Det betyder, at forskerne i dag kan tage prøver af sedimentet og se, hvilke dyr og planter der har levet i vandet omkring Arktis for tusinder af år siden.

»Havbunden er vores største arkiv over, hvad der er sket i fortiden. Da vi begyndte at kunne aflæse det gamle DNA i aflejringerne, var det som at finde en Rosetta-sten. Pludselig kunne vi læse hele økosystemet og se, hvilke arter der levede her for eksempel 5.000 år siden, og hvordan havet så ud,« siger Sofia Ribeiro.

Og der er langt mere at hente i sedimentet, end forskerne hidtil har nået. Hver eneste lille prøve rummer millioner af DNA-stumper fra et mylder af organismer, og forskerne er kun lige begyndt at læse dem. Det særlige ved metoden er desuden, at den også fanger de bløde og sarte organismer, som aldrig bliver til fossiler, og som derfor ellers ville være usynlige for eftertiden. Et halvt gram sediment kan på den måde rumme sporene af et helt økosystem.

Et halvt gram sediment afslører fortidens is

Et af de smukkeste eksempler på, hvad metoden kan bruges til indenfor forskningen, handler om selve havisen og dens udbredelse. Is er nemlig noget af det allersværeste at spore i geologien, for når den smelter, efterlader den sig stort set ingen spor. Derfor har forskere længe manglet en pålidelig måde at måle, hvornår og hvor meget is der lå på havet i for-



Figuren viser, hvordan Nordvandet er aktiv under normale (kolde) forhold, men går i stå, når temperaturen stiger og isbroen kollapser. Tilpasset fra Jackson et al. 2021.

POLYNYAER

En polynya er et område med åbent vand, der er omgivet af havis. Polynyaer er økologisk vigtige, fordi det åbne vand slipper lys ned i havet og skaber store opblomstringer af planteplankton.

Planktonet danner bunden af fødekæden, og det tiltrækker fisk og derfor også større dyr som sæler, hvaler, hvalrosser og havfugle. For isbjørne og havpattedyr fungerer polynyaerne som vigtige steder at jage og trække vejret.

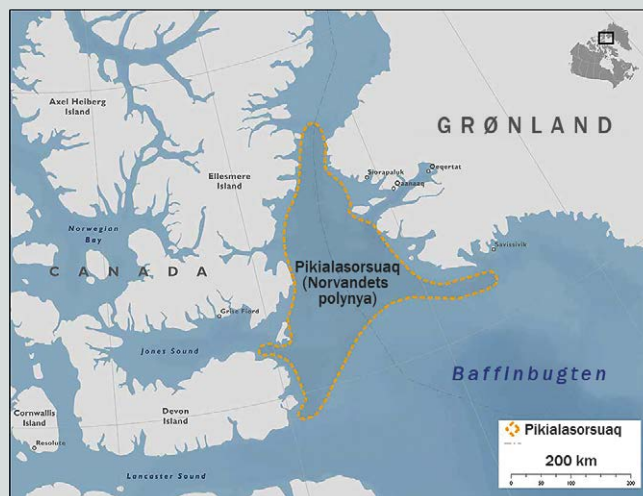
De største kendte polynyaer er:

Weddellhavspolynyaen

Weddellhavspolynyaen i Antarktis åbnede sig tre vintre i træk fra 1974 til 1976 midt ude i havisen i det sydlige ocean. På sit højeste dækkede den omkring 250.000 km² og regnes for den største kendte polynya i verden. Den dannes på åbent hav over det undersøiske plateau Maud Rise, hvor varmt vand fra dybet stiger op og holder isen væk. Da den kom igen i 2017, var den langt mindre, blot omkring 50.000 km².

Rosshavspolynyaen

Rosshavspolynyaen er den største kystpolynya i Antarktis og ligger i det vestlige og centrale Rosshav øst for Ross Island ved Ross-iskanten. Polynyaen har et gennemsnitligt areal på omkring 27.000 km², men kan vokse til op mod 50.000 km², når forholdene er gunstige. Den åbner sig hvert år sidst i november, når faldvinde fra indlandsisen presser havisen væk fra kysten, og når sin største udstrækning i januar.



Nordvandet

Norvandet i den nordlige Baffinbugt mellem Grønland og Canada er den største og mest produktive polynya på den nordlige halvkugle. Den holdes åben af en bro af is, der hver vinter bygger sig op tværs over Nares Strædet og forhindrer pakisen i at presse ned i området, mens vind og havstrømme samtidig skubber den nydannede is væk. Mere end 80 procent af verdens søkonger yngler ved Nordvandet, og området er også afgørende for hvalros, narhval og isbjørn. Samtidig har polynyaen i årtusinder forsynet nogle af verdens nordligste mennesker med mad. ■

tiden, og om der har været perioder uden is, sådan som det vil være i den fremtid, vi ser ind i.

Løsningen blev en lillebitte alge ved navn *Polarella glacialis*. Den lever kun de steder, hvor der dannes ny havis hver vinter, og hvor isen smelter væk igen om sommeren. Ligger isen for tykt og permanent, kommer der ikke lys nok ned til algen, men er havet til gengæld helt åbent, mangler den sin is. *Polarella glacialis* trives udelukkende i det smalle vindue midt imellem, og netop derfor er den så præcis en målestok.

Sammen med sin gruppe af forskerkolleger har Sofia Ribeiro målt mængden af algens DNA i muddret og fundet det i 45 ud af 48 prøver fra havbunden rundt om Grønland. I en lang boreprøve fra Baffinbugten, der rækker 12.000 år tilbage, følger DNA-signalet smukt, hvordan isen er kommet og gået gennem årtusinderne. På den måde kan forskere med målinger af *Polarella glacialis* sige, om der har været havis i Arktis om sommeren i fortiden, ligesom de med undersøgelser af andet DNA i sedimentlagene kan afgøre, hvad tilstedeværelsen eller manglen på havis har haft af betydning for resten af økosystemet. En ekstra gevinst er, at algen lever ved begge poler, så den samme metode kan bruges både i Arktis og Antarktis.

Da Grønland blev affolket, kollapsede et helt økosystem

Nogle af de mest dramatiske og relevante historier i muddret handler dog ikke om alger, men om mennesker. Mellem Grønland og Canada ligger Nordvandet, der er en kæmpe plet åbent hav, som bliver holdt isfri hele vinteren, mens pakisen ligger tæt rundt om. Det er det største og mest produktive område af sin slags på den nordlige halvkugle, og på grønlandsk bærer det det smukke navn Pikialasorsuaq, "det store opstrømningssted".

Mere end 80 procent af verdens søkonger, en lille buttet polarmåge, yngler ved Nordvandet, og tilsammen er over 60 millioner fugle afhængige af de fedtrige vandlopper, som det åbne vand myldrer med. Fuglenes efterladenskaber gøder til gengæld kysterne, så de står som grønne oaser i et ellers goldt landskab, og gennem årtusinder har stedet været selve livsgrundlaget for nogle af verdens nordligste mennesker.

Da Sofia Ribeiro og en stor international forskergruppe gravede sig ned i fortiden ved at se på sedimentlagene, viste der sig et tankevækkende mønster. For omkring 4.400 år siden lå der et stabilt og frodigt Nordvand, præcis på det tidspunkt, hvor de første mennesker og de første store fuglekolonier indfandt sig på Nordgrønland. Senere, for mellem 2200 og 1200 år siden, blev området ustabil, produktiviteten faldt, og livet svandt langsomt ind.

Denne ustabile periode faldt påfaldende tæt sammen med, at menneskene forlod Grønland og lod landet ligge næsten mennesketomt i omkring tusind år. Først for cirka 800 år siden stabiliserede Nordvandet sig igen, og næsten samtidig ankom Thulekulturen, som er de nuværende grønlanderes direkte forfædre. Et økosystem i forandring kan altså meget vel have været med til at affolke et helt land, og det er en tænkepause værd, nu hvor isen igen er ustabil.



Algen *Polarella glacialis* set i mikroskop. Den måler cirka 0,015 mm.

GAMMELT DNA – ET NYT VÆRKTØJ TIL STUDIER AF HAVBUNDEN

Når forskere studerer havbundens "arkiv" af lag afsat i fortiden, har de traditionelt tolket klimaudvikling og økosystemer ud fra mikrofossiler og særlige fedtstoffer, som visse alger efterlader sig, når de dør. De seneste år er et nyt værktøj føjet til værktøjskassen, nemlig studier af gammelt DNA, altså arvemateriale, der har overlevet i muddret, fordi der er koldt og fattigt på oxygen.

DNA-stumperne kan enten aflæses ved at sekventere dem, så man kan bestemme, hvilke arter de stammer fra, eller tælles meget præcist med en teknik kaldet dråbe-digital PCR, hvor man måler, hvor mange kopier af et bestemt gen, der findes i prøven. På den måde kan forskerne ikke blot se, hvilke arter der var til stede, men også få et mål for populationsstørrelsen.

Den store fordel er, at DNA også finder organismer, der aldrig bliver til fossiler. Faktisk kan man genskabe et helt økosystems artssammensætning på et givet tidspunkt i fortiden ud fra blot et halvt gram mudder.

DNA fra algen *Polarella glacialis* er særligt velegnet til at fortælle om de klimatiske forhold i fortiden, fordi algen kun lever, hvor der dannes sæsonbestemt havis. Da algen lever ved begge poler, er den blevet den første målestok for havis, der virker både i Arktis og Antarktis. Den slags metoder gør det muligt at sætte præcise tal på fortidens klima- og økosystemer på en helt ny måde. ■



Billedet viser en borekerne fra havbunden, hvor der er blevet udtaget prøver til analyser. Hvert lag i borekernen repræsenterer et øjeblikbillede af fortiden, der venter på at blive afsløret. Foto: Anna B. Kvorning.



Når forskerne skal udtage prøver fra borekernen til analyser af gammelt DNA, foregår det i et særligt rent laboratorium og iført beskyttelsesdragt. Det er for at undgå at forurene prøverne med nutidigt DNA. Foto: Heike H. Zimmermann.

»Det paradoksale er, at det her åbne, livgivende område eksisterer, fordi der dannes is. Forsvinder vinterens isbro, forsvinder Nordvandet, som vi kender det, og så kommer fødegrundlaget for millioner af fugle, pattedyr og for de mennesker, der lever af dem, også til at ændres markant,« siger Sofia Ribeiro.

Det omtalte studie var med til at få Nordvandet skrevet ind i den seneste store FN-klimarapport som et særligt klimafølsomt område, og Canada og Grønland arbejder nu på at gøre det til et beskyttet havområde.

Hvaler dukker op i muddret før i knoglerne

Havpattedyr som hvaler og sæler er notorisk svære at studere i fortiden. De fleste af dem lever og dør til havs og synker til bunds, så de optræder næsten ikke i de fossiler, forskere ellers bruger til at kortlægge fortidens dyreliv. Men deres DNA ender i sedimentet ligesom algerne, og det har åbnet en helt ny dør ind til fortiden.

I fire boreprøver fra havet rundt om Nordgrønland har ph.d.-studerende Lennart Schreiber vejledt af Sofia Ribeiro og hendes kollega fra Globe Institutet, Eline Lorenzen, fulgt hvaler og sæler 12.000 år tilbage i tiden. For flere arter dukker DNA-sporet op flere tusind år tidligere, end de ældste knoglefund overhovedet antyder. De allertidligste spor stammer fra ringsælen, der dukkede op for omkring 11.600 år siden, altså lige da indlandsisen slap sit tag i havet ved istidens slutning, og senere fulgte arter som klapmys, grønlandssæl og hvidhval.

I den varme periode for mellem 10.000 og 6.000 år siden rykkede arter, der normalt hører til i lunere vande, langt mod nord. Et af de mest slående eksempler er finhvalen, som blev sporet helt oppe omkring 75 grader nordlig bredde for 7.800 år siden, altså længere mod nord end nogen kender den fra i dag. Da forskerne regnede på det, var det netop temperaturen og mængden af alger i og under isen, der afgjorde, hvilke dyr der kunne være der.

»Den varme periode for 8.000 år siden er noget af det tætteste, vi kommer på et kig ind i en varmere fremtid. Dengang rykkede arter, vi normalt forbinder med varmere vande, langt mod nord, og det er præcis den slags omrokering, vi kan vente os igen. Det samme gælder også arter, der kun kan leve i de allerkoldeste egne. De bliver presset

længere og længere mod nord, indtil de ikke kan komme længere,« siger Sofia Ribeiro.

En fortid uden sidestykke i nutiden

Netop den varme periode bliver ofte trukket frem som en trøst, når snakken falder på klimaforandringerne. Vi har jo prøvet at have det varmere før, lyder ræsonnementet, så det går nok. Men da Sofia Ribeiros gruppe undersøgte Godthåbsfjorden ved Nuuk, den største fjord i Sydvestgrønland, fik den beroligende fortælling en alvorlig revne.

For mellem 7.000 og 3.000 år siden, da indlandsisen var skrumpet ind til sit mindste og lå bag sin nuværende kant, strømmede der varmt vand af atlantisk oprindelse ind i fjorden på en måde, vi ikke har set i nyere tid. Forskerne kalder det ligefrem en tilstand uden sidestykke i den moderne verden. Den behagelige, genkendelige varme fortid var altså slet ikke så genkendelig endda, og netop varmt atlantisk vand, der presser sig nordpå, er noget af det, forskerne holder allerskarpest øje med i dag, fordi det kan ændre de havstrømme, som er med til at skabe klimaet i Europa og resten af den nordlige halvkugle.

Hvad varmen gør ved livet i havet, afhænger i øvrigt af, hvor isen smelter. Gletsjere, der ender ude i havet, smelter nedefra og sender næringsrigt vand op mod overfladen, hvilket faktisk er gode nyheder for de mikroskopiske alger, der udgør bunden af hele fødekæden. Men trækker gletsjerne sig op på land, breder smeltevandet sig i stedet som et ferskt låg hen over havet og slæber samtidig sediment med, der skygger for lyset. Og det er desværre den vej, udviklingen går.

At det ikke er en fjern bekymring, kan måles allerede nu. Mængden af ferskvand, der løber fra Grønland ud i havet, er ifølge forskerne steget med 21 procent på bare et årti. Og uanset hvor meget vi skærer ned på udledningerne, ventes indlandsisen at miste flere procent af sin samlede masse alene i løbet af dette århundrede.

»Vi kigger på fortiden for at forstå, hvordan naturen reagerer og tilpasser sig over lange perioder. Men vi er på vej ud i ukendt land. I virkeligheden laver vi et eksperiment med hele jordsystemet, og konsekvenserne kommer til at vare ved i hundredvis, måske tusindvis af år,« siger Sofia Ribeiro.

For at finde en tid, der bare nogenlunde minder om den varme, vi nu styrer imod,

må forskerne helt tilbage til den seneste mellemistid for omkring 125.000 år siden, og skal man finde tilsvarende mængder CO₂ i atmosfæren, skal man millioner af år tilbage. Og selvom Arktis altså har været isfrit om sommeren før, ligger det så langt tilbage, at der slet ingen mennesker var til at opleve det. Sidste gang var for 8.000 til 6.000 år siden, før der overhovedet fandtes samfund i det høje nord, og derfor er det også så svært at sige, hvad et isfrit Arktis vil betyde for os.

»Sidste gang der ikke var sommerhavis i Arktis, var der slet ingen mennesker i Grønland, så vi ved reelt ikke, hvad det vil betyde for det lokale samfund. Jeg tror ikke, en dommedagsstemning hjælper nogen, men det her er nyt, og det er en forandring, vi ikke bare kan stoppe. Det er som et tog i fart, og selv hvis vi prøver at bremse, kører det et godt stykke endnu. Derfor er vi nødt til at forstå, hvor det er på vej hen,« siger Sofia Ribeiro. ■

VIDERE LÆSNING

Kvorning, A.B., Heikkilä, M., Pearce, C. et al. A Holocene fjord record from Greenland reveals exceptional Atlantic water influence during minimum ice-sheet extent. *Commun Earth Environ* 6, 326 (2025).

Schreiber, L., Ribeiro, S., Jackson, R. et al. Holocene shifts in marine mammal distributions around Northern Greenland revealed by sedimentary ancient DNA. *Nature Commun* 16, 4543 (2025).

Harðardóttir, S., Haile, J.S., Ray, J.L. et al. Millennial-scale variations in Arctic sea ice are recorded in sedimentary ancient DNA of the microalga *Polarella glacialis*. *Commun Earth Environ* 5, 25 (2024).

Ribeiro, S., Limoges, A., Massé, G. et al. Vulnerability of the North Water ecosystem to climate change. *Nature Commun* 12, 4475 (2021).