

Fronten af Nordaustfonna, Svalbard. Nordaustfonna er med sine 8.400 km² den største af de tilbageværende iskapper på Svalbard og en af de få med en front i direkte kontakt med havet. Den lodrette frontvæg er cirka 20 m høj. Foto: Tine Rasmussen.

ISKOLLAPS VED ISTIDENS SLUTNING LIGNER NUTIDENS

Da isen smeltede bort fra kontinentalsoklen i Barentshavet syd for Svalbard ved afslutningen af sidste istid, foregik det i markante ryk under kraftig opvarmning, viser ny forskning. Det ligner det, vi ser omkring Arktis og Antarktis i dag.

Om forfatterne



Tine L. Rasmussen er professor ved CAGE, Centre for Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate, Institutt for geovitenskap, UiT Norges Arktiske Universitet, Tromsø, Norge.
tine.rasmussen@uit.no



Erik Thomsen er lektor emeritus ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet.
erik.thomsen@geo.au.dk

I dag skrumper shelf-isen omkring både Antarktis og Grønland med stadig større hastighed. Ofte brækker store bidder af på forbløffende kort tid. I tre omgange mellem 1995 og 2017 kollapsede det meste af Larsen-ishylden ved Antarktis, og næsten 13.000 km² is forsvandt. Den hastige tilbagetrækning af isen omkring Antarktis skyldes mange steder, at det stadig varmere havvand trænger ind under isen, og smelter den nedefra. Vores undersøgelser fra kontinentalsoklen syd for Svalbard viser, at der er forbløffende mange ligheder mellem det, der sker ved Antarktis i dag, og det, der skete i Nordatlanten for mellem 15.000 og 10.000 år siden ved slutningen af istiden, da jordens temperaturer steg med stor hastighed. Dengang forsvandt gigantiske iskapper på den nordlige halvkugle i løbet af få tusinde år.

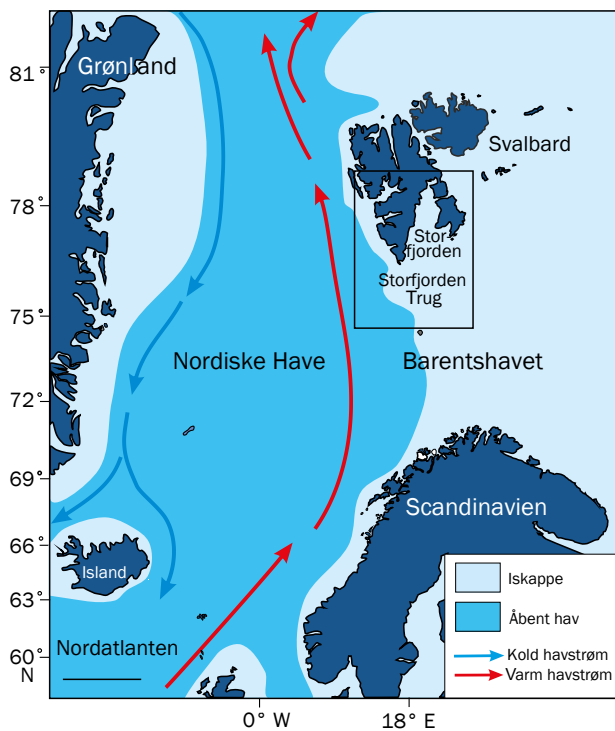
Rykvis afsmeltning

For 22.000 år siden var Skandinavien dækket af en enorm, kilometer-tykk iskappe. Nordpå fortsatte isen ud over Barentshavet, hvor den forenede sig med en tilsvarende iskappe over Svalbard. Nordamerika og Sibirien var sæde for lignende eller endnu større iskapper. For cirka 10.000 år siden var alle disse iskapper forsvundet med undtagelse af indlandsisen på Grønland og mindre isskjolde på Svalbard og Island. Tilbagerykningen var dog rykvis og ujævn. Talrige undersøgelser har vist, at en stor del af afsmeltningen foregik i to korte faser. Den første indtraf for 14.700 år siden ved begyndelsen af den geologiske varmeperiode, vi kalder Bølling, og den varede cirka 500 år. Den anden afsmeltningsfase udspillede sig for cirka 11.600 år siden i begyndelsen af Holocæn, den nuværende mellemistid. Ind

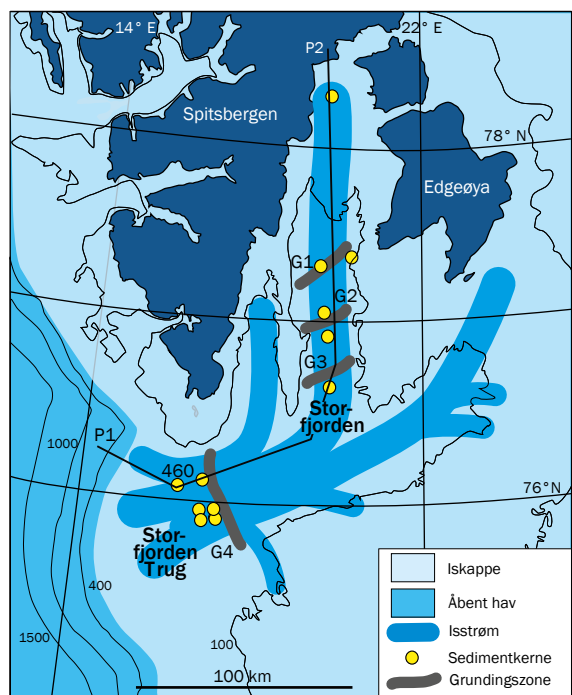
imellem disse særlig varme perioder var afsmeltningsraten mere beskeden, og nogle gange voksede iskapperne ligefrem. Smeltevandet fra isen ender i havet, og derfor kan afsmeltningshastigheden måles i den hastighed, hvormed havniveauet stiger. Fra istidens maksimum for 22.000 år siden og indtil for 7.000 år siden steg havniveauet cirka 120 meter. Siden har det været nogenlunde stabilt, men hvis den resterende indlandsis på Grønland og Antarktis smelter, vil havet stige yderligere cirka 65 meter.

Ishylden mod Norskehavet

Isens afsmeltning på land op igennem Danmark, Sverige og Norge er forholdsvis velbelyst. Derimod har man hidtil vidst meget lidt om tilbagerykningen langs med Norskehavet og Barentshavet, hvor isranden lå på kontinentalsoklen, og isen var i direkte kontakt med



Kort med placeringen af undersøgelsesområdet: For 22.000 år siden var den skandinaviske iskappe tværs over Barentshavet forbundet med iskappen over Svalbard. Isranden fulgte nogenlunde kontinentalsoklens kant og var i direkte kontakt med havet. Storfjorden er navnet på den sydvestvendte bugt lignende indskæring i Svalbard mellem Spitzbergen og Spitzbergen Banke. Storfjorden Trug er navnet på Storfjordens forlængelse ud over kontinentalsoklen. Isens udstrækning baseret på Hughes o.a. (2016).



Kort over Storfjord-området for 22.000 år siden før iskappen begyndte at smelte. Igennem Storfjorden løber tre kraftige isstrømme. Det er områder, hvor indlandsisens bevægelse mod havet går særlig hurtigt. I Storfjorden er fundet fire såkaldte grundingszoner (G1-G4). Disse består af sedimentophobninger dannet i en periode, hvor isen under sin tilbagerykning, har stået stille i længere tid. De undersøgte sedimentkerner er vist med gule prikker. Den vigtige kerne 460 ligger nærmest kanten på kontinentalsoklen. P1-P2 er en profilinje.

Kort modificeret efter Rasmussen & Thomsen, 2021.

havet. Forholdene her har på mange måder lignet forholdene omkring ishylderne langs Antarktis' kyst i dag.

Vores undersøgelsesområde er Storfjorden og Storfjorden Trug, der som en stor bugt strækker sig sydvest fra Svalbard helt ud til kanten af kontinentalsoklen. Vores første mål var at fastslå, med hvilken hastighed indlandsisen trak sig tilbage fra Storfjorden – fra den for 22.000 år siden stod ved kanten af kontinentalsoklen til i dag, hvor næsten al is er forsvundet fra kysten. Det andet mål var at undersøge, om der er en tæt sammenhæng mellem isens bevægelsesmønstre og den globale klimaudvikling i perioden. Flere nyere studier har nemlig sat spørgsmålstegn ved dette punkt. Endelig ønskede vi at sammenligne isens tilbagetrækning i Storfjorden efter istiden med de tilbagetræk-

ningsmønstre, vi ser i nutiden som følge af den globale opvarmning.

Kunsten at studere bevægelserne af forsvunden is

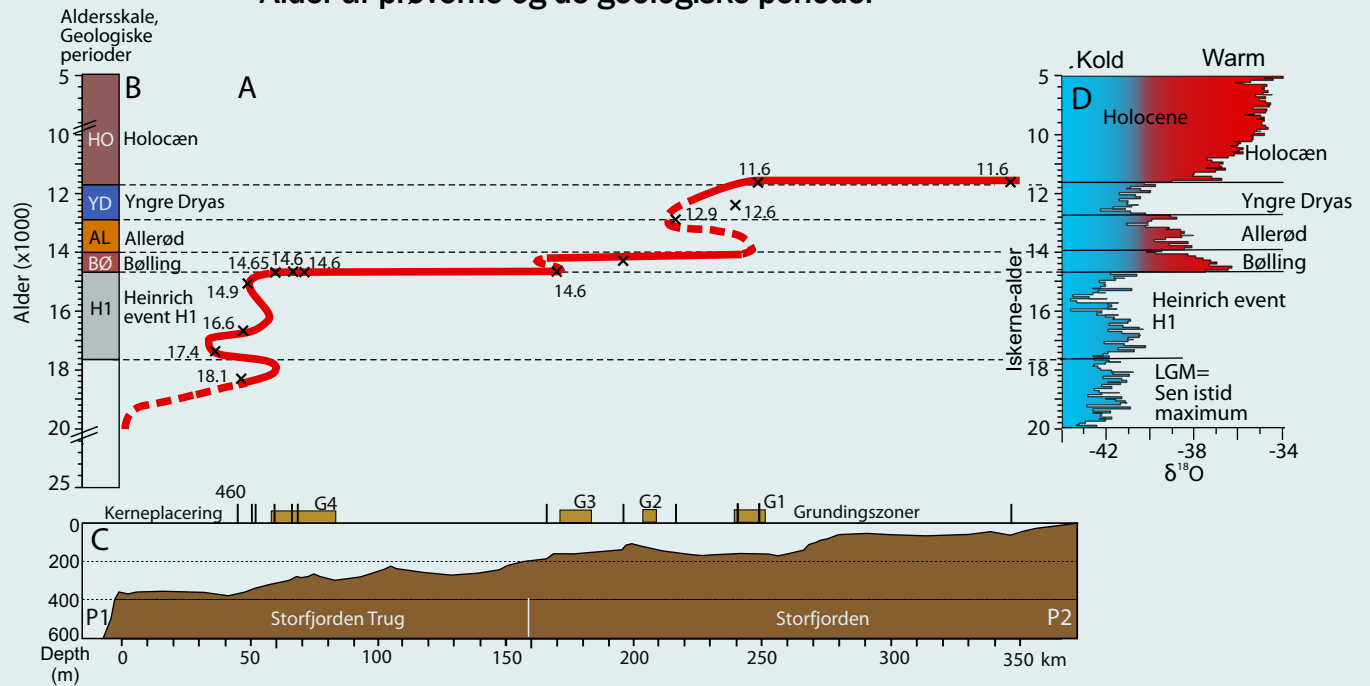
Under istiden var Storfjorden og det foranliggende trug fyldt med tre strømme af gletsjeris. Isen bevægede sig fra Svalbards indre hen over fjordbunden, hvor den afsatte et blandet sediment af ler, sand, grus og store sten. Denne type aflejring kaldes en till, og den ligner det sediment, der udgør hovedparten af istidens morænelandskab på land. Lag af till på kontinentalsoklen vidner om, at indlandsisen på dannelsesetidspunktet var i direkte kontakt med havbunden.

I nutiden er Storfjorden isfri om sommeren og dækket af havis om vinteren. På bunden aflejres der fint mudder året rundt. Muddret består af en blanding ler og silt, der

føres ud fra land og ganske langsomt afsættes på havbunden som sedimentlag. Muddret indeholder som regel et rigt marint dyreliv, og gammelt mudder er næsten altid fyldt med talrige skaller af store og små marine organismer samt dropsten fra passerende isbjerge.

Den sikreste måde at fastlægge, hvornår isens forsvandt fra en region, er at bestemme alderen på de ældste normale marine sedimenter i området. Det kan gøres ved hjælp af lange sedimentkerner, som udtages af havbundens aflejringer. Kernerne må i dette tilfælde trænge igennem de marine lag og ned i den underliggende till. Vi må her kræve, at overgangen fra de marine til de ikke-marine lag er kontinuert. Kernerne må desuden indeholde daterbart materiale og rigeligt med fossiler. Fossilerne er den vigtigste kilde til økologisk information.

Alder af prøverne og de geologiske perioder



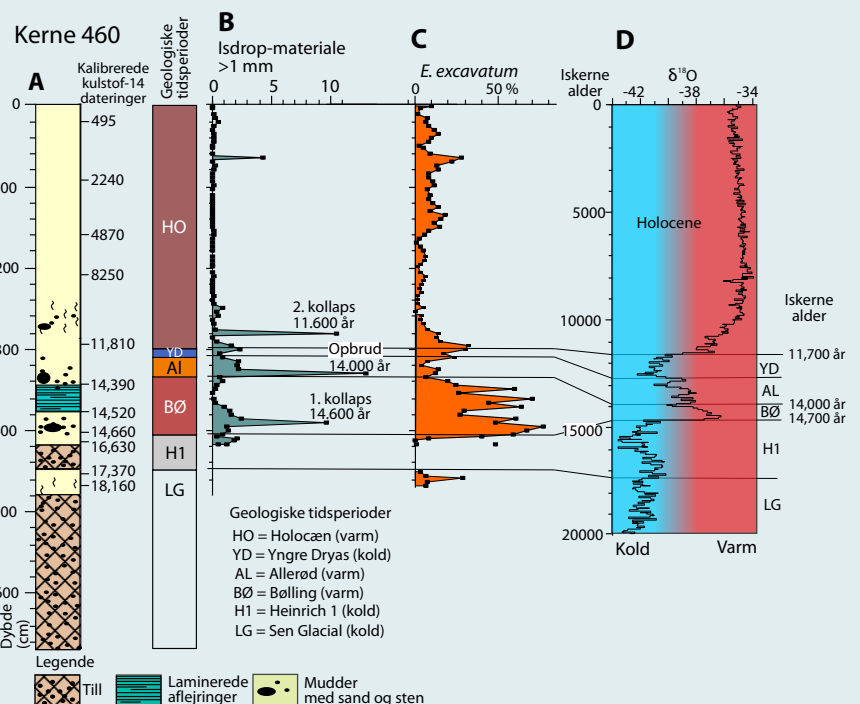
En vigtig kerneprøve

(A): Aflejringstype, alder og geologiske tidsperioder for kerne 460. Kerne 460 ligger yderst i Storfjord-området og var tidligt isfri. Smeltende isbjerger produceret længere inde i fjorden har måttet passere området. De har efterladt isdrop-materiale på havbunden.

(B): Variation i mængden af isdrop-materiale, der stammer fra smeltende isbjerger. Bemærk tre markante stigninger dateret til 14.600, 14.000 og 11.6000 år.

(C): Variation i procenten af den bundlevende foraminifer *Elphidium excavatum*. I de Nordiske have er denne art knyttet til koldt vand og særlig hyppig tæt ved isfronter.

(D): Korrelation til iltisotopkurven for grønlandske NGRIP-iskerne (for forklaring: se i figuren ovenfor).



Sådanne kerner er ikke nemme at skaffe, da isen bevægelse hen over havbunden giver erosion, og derfor er der ofte huller i sedimentrækkefølgen.

Det lykkedes os at skaffe 12 kerner, der opfyldte de opstillede kriterier. De er taget fra kontinentalsoklen til fjordens inderste forgreninger. Kernerne, der er mellem 3 og 10 m lange, er nøje undersøgt for en lang række biologiske, geologiske og geokemiske parametre. Halvfjerds prøver er aldersbestemt ved hjælp af kulstof-14 metoden.

Isens opbrud i Storfjorden

Aldersdateringerne af prøverne viste, at alderen på de ældste marine lejringer i de tolv undersøgte kerner bliver yngre og yngre indadtil i fjorden, hvilket afspejler havets indtrængning og isen afsmeltning i området. Men det stod også klart, at havets fremtrængning ikke var gradvis, men forløb i spring vekslende mellem hurtig og langsom indtrængning eller ligefrem tilbagerykning. For bedre at forstå udviklingen kan vi sammenholde dette bevægelsesmønster med udviklingen i den kerne, der er taget yderst på kontinentalsoklen (kerne 460) og derfor fra det område, der først blev isfrit.

Nederst i denne kerne veksler finkornede og grove lag, men fra cirka 16.700 år og fremefter er alle lag finkornede og fossilrige, og det er tydeligt at fra dette tidspunkt har isen været langt væk fra stedet. Vand og sedimenter fra Storfjorden har dog måttet passere stedet, og kernens sedimenter vidner derfor om begivenhederne længere inde i fjorden.

Når isen står stille i længere tid ophobes der som regel store mængder af groft materiale på havbunden foran isen. Disse opkobninger kaldes grundingszoner. Seismiske undersøgelser har påvist fire grundingszoner i Storfjorden-systemet. Den ældste af disse, G4, er uden tvivl et resultat af de små frem- og tilbagerykning-

Fotos: Tine Rasmussen, 2002.



Kerneoptager på det norske forskningsskib Helmer Hanssen. Til højre klargøres optageren, der i dette tilfælde er 12 m lang. Bagerst ses blylodderne, der medvirker til at presse kerneoptageren ned i havbunden. Til venstre hænger optageren i sin kran klar til nedsænkning til havbunden, hvor den udløses og ved hjælp af de cirka 2 tons bly presses ned i sedimentet.

Sedimentkernen med en diameter på 10 cm splittes på langs i to halvdele. Øverst ses et cirka 30 cm langt udsnit af en kerne fra Svalbard-området. Overgangen mellem det nederste mørke lag og det lyse lag er aldersbestemt med kulstof-14-metoden til cirka 14.600 år. Det lyse lag repræsenterer således begyndelsen af Bølling-varmepereoden.

ger for mellem 18.000 og 14.600 år siden.

Første iskollaps (14.600 år)

År 14.600 repræsenterer tydeligvis et vendepunkt i Storfjordområdet historie. Ikke blot er de ældste marine lag i en række borer omkring grundingszone G4 dateret til cirka 14.600, men vi finder samme alder på de ældste marine lag i en boring ved grundingszone G3 125 km længere inde i munden af Storfjorden. De ældste foraminifer-faunaer ved G3 er fuldmarine og typiske for åbne forhold foran en isfront, så der er ikke blot tale om en sporadisk marin indtrængning under isen. Mindst 11.000 km² gletsjeris mellem G4 og G3 må være forsvundet på et "geologisk splitsekund".

Denne voldsomme tolkning bekræftes af udviklingen i kerne 460, hvor opbruddet falder sammen med en pludselig og kortvarig forøgelse af mængden af grovkornet isdropmateriale fra passerende isbjerge. Isdropmateriale er grove korn og fragmenterede bjergarter, som isen har samlet op fra havbunden og over land. Det afleveres til havet, efterhånden som isen eller isbjergene smelter. Den pludselige forøgelse viser, at et stort antal smeltende isbjerge meget hurtigt må have passeret stedet. I kerne 460 og i de andre kerner fra grundingszone G4 er isdrop-lagene fulgt af et markant lag med fint lagdelte lerlag stort set uden fossiler dateret til slutningen af Bølling (14.520-14.390 år). Lignende lag med samme alder kendes fra kontinentalsoklen over-

Afgørende kalkskaller fra foraminifer

Sedimentkernerne, vi har undersøgt i dette studium, er optaget på forskellige forskningsekspeditioner i årene fra 2002 til 2016. Kernerne er nøje undersøgt for sedimentære aflejringspor og derefter skåret op i 1 cm tykke skiver. De mere end 1000 prøver er analyseret for en lang række biologiske, geologiske og geokemiske parametre, herunder målinger af ilt- og kulstof-isotoper. Halvfjerds prøver er aldersbestemt ved hjælp af kulstof-14 metoden.

I undersøgelsen har en gruppe af skalbærende mikroskopiske encellede dyr kaldet foraminiferer været helt afgørende. Ofte finder vi flere hundrede foraminiferskaller per gram sediment. Gruppen indeholder talrige arter, hvoraf mange er tilpasset ganske specifikke økologiske forhold. Fossile fauner er derfor nyttige ved tolkning af fortidens miljøer, da vi ved at studere

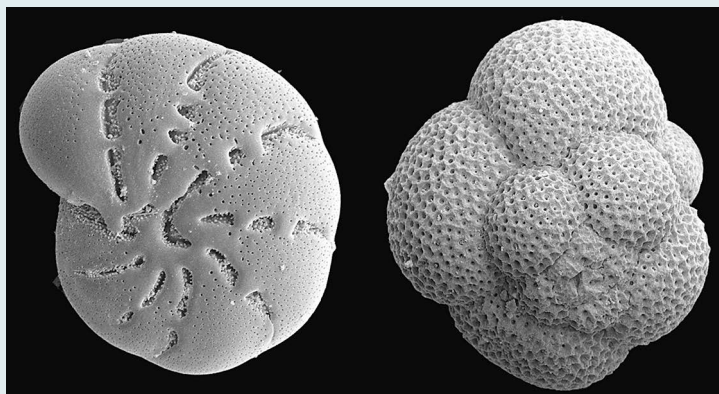


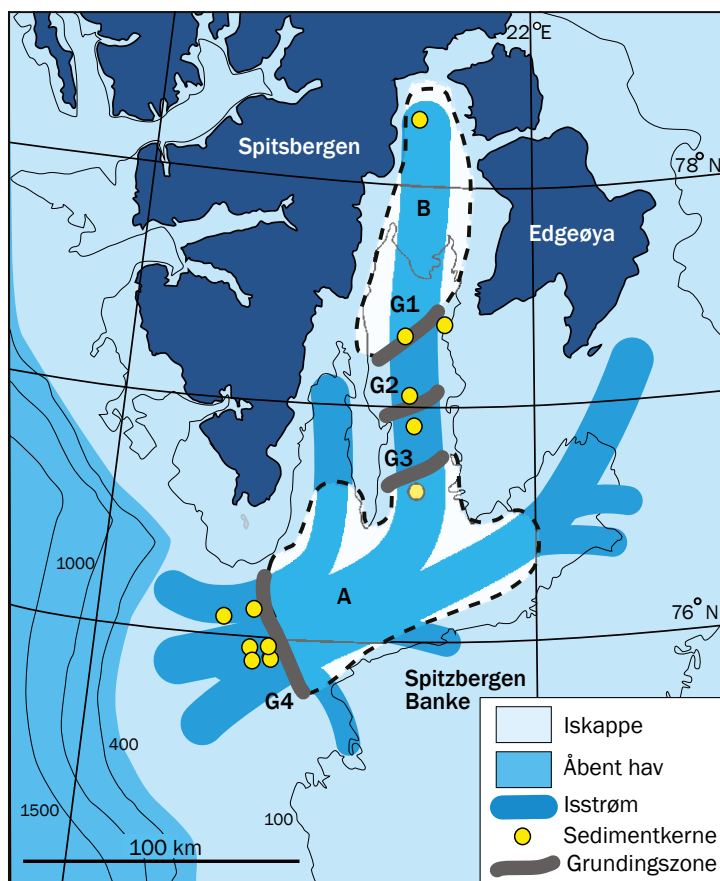
Foto: Erik Thomsen.

Foraminiferer er encellede dyr i slægt med amøber, men med skal. De er uhyre almindelige både ved havbunden og ved havoverfladen. Til venstre ses den bundlevende art *Elphidium excavatum*, der omkring Svalbard er knyttet til koldt vand nær isfronter. Til højre ses *Neogloboquadrina incompta*, der lever ved havoverfladen og er knyttet til varmt vand. Begge foraminiferer er cirka 0,2 mm store.

samfundenes artssammensætning ofte kan få ganske præcise oplysninger om en lang række vigtige miljøparametre som temperatur, saltholdighed, bundstrømsforhold, samt ilt- og føde-forsyning.

Foraminiferer lever både på og i

havbunden og ved havoverfladen, og de kan derfor give oplysninger om både bund og overfladeforhold. Foraminiferskaller består af kalk (CaCO_3), og gruppen er den vigtigste kilde til ilt- og kulstofisotop-analyser samt til kulstof-14 dateringer af havaflejringer.



Kort over Storfjorden og Storfjorden Trug med angivelse af isstrømme og områder med abrupt iskollaps. Område A (cirka 11.000 km²) brød sammen for cirka 14.600 år siden. Område B (cirka 4000 km²) disintegrerede for cirka 11.600 år siden. Disse begivenheder minder om nutidens kollaps af Larsen-ishylden ved Antarktis.

alt i det nordvestlige Barentshav. De er vidnesbyrd om en periode med kraftig afsmeltning, stor sediment-tilførsel til havet og en artsfattig havbund.

Når vi sammenligner med klimaudviklingen, som denne afspejles i de grønlandske iskerner, kan vi se, at iskollapset i Storfjordområdet falder sammen med den første temperaturstigning efter sidste istid (Bølling). Især den første tredjedel af Bølling var varm, og det globale havniveau steg cirka 18 meter på bare 350 år.

Andet iskollaps (11.600 år)

I perioden fra cirka 14.500 år og til 11.600 år gik isens tilbagerykning langsommere. Vor viden om denne periode i Storfjorden er dog ringere især på grund af dårlige opbevaringsforhold for kalkskal-lede fossiler. Tilstedeværelsen af en markant top af isdroppet materiale i kerne 460 dateret til cirka 14.000 (begyndelsen af Allerød-varmeproduktionen) tyder på, at vi også i denne periode har haft et større isopbrud.

Det sidste store iskollaps indtraf ved begyndelsen af Holocæn for cirka 11.600 år siden. Dateringerne af de ældste marine sedimenter i kernerne fra den indre fjord viser, at opbruddet var brat, kortvarigt og omfattende (minimum 4000 km²) omend noget mindre end kollapset i Bølling-perioden. Kollapset bekræftes af den abrupte top af isdroppet materiale i kerne 460.

Iskollapsene i begyndelsen af Bølling-tidsperioden for 14.600 år og i begyndelsen af Holocæn for 11.600 år siden falder begge sammen med kraftige og meget bratte temperaturstigninger i de grønlandske iskerner. Der kan derfor ikke være tvivl om, at klimaændringer har været den afgørende faktor for ishyldernes pludselige forsvinden. Det samme må gælde for det noget mindre opbrud i begyndelsen af Allerød-tidsperioden for 14.000 år siden.

Parallel til nutidens Antarktis

Nedbrydningen af ishylderne og gletsjerne i Storfjorden udviser mange ligheder med disintegrati-

onen af Larsen-ishylden ved Antarktis i nutiden. Denne kollapsede i flere omgange mellem 1995 og 2017, og i alt 10.600 km² ishylde forsvandt. De forsvundne dele var flydende, således at varmt vand kunne trænge ind under isen og nedbryde den nedefra.

Vi forestiller os, at noget lignende skete i Storfjordsystemet. Indtrængningen af varmt vand her må dog være sket umiddelbart før, isen brød op, og måske som følge af de kraftige stigninger i det globale havniveau. Disintegrationen i Storfjordens kan have været næsten øjeblikkelig, således som dateringerne antyder. Men dateringsusikkerheden taget i betragtning kan opbruddene også have været længere, måske helt op til 50 eller 100 år. Halvtreds år svarer til en tilbagerykningshastighed på 2,5 km/år for Bølling-overgangen og 2 km/år for Holocæn-overgangen. Disse værdier ligner i høj grad nuværende målte tilbagerykningshastigheder for Antarktis og Grønland, som ligger fra 0,6 km/år til >2 km/år. ■

Litteratur

Hogg, A.E., Gudmundsson, G.H., 2017. *Impacts of the Larsen-C ice shelf calving event*. Nature Climate Science 7, 541–542, www.nature.com/articles/nclimate3359.

Hughes, A.L.C., Gyllenkretz, R., Lohne, Ø.S., Mangerud, J., Svendsen, J.I. (2016). *The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction*, DATED-1. Boreas 45, 1–45, doi: [10.1111/bor.12142](https://doi.org/10.1111/bor.12142).

Rasmussen, T.L., Thomson, E. (2021). *Climate and ocean forcing of ice-sheet dynamics along the Svalbard-Barents Sea Ice Sheet during the deglaciation 20,000–10,000 years BP*. Quaternary Science Advances 3, 1–13, doi: [10.1016/j.qsa.2020.100019](https://doi.org/10.1016/j.qsa.2020.100019).

Svensson, A., Andersen, K.K., Bigler, M., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Davies, S.M., et al. (2008). A 60 000 year Greenland stratigraphic ice core chronology. *Climate of the Past* 4(1), 47–57, doi: [10.5194/cp-4-47-2008](https://doi.org/10.5194/cp-4-47-2008).



[sdu.dk/ing](https://www.sdu.dk/ing) #sduing

Skal dine elever prøve at være ingeniørstuderende for en dag? – NU ONLINE!

På grund af COVID-19 situationen kan vi for tiden desværre ikke modtage fysiske besøg på vores campusser og ingeniøruddannelser på SDU.

Men det er stadigvæk muligt at møde vores ingeniørstuderende. Dine elever har nu mulighed for at mødes med vores uddannelsesambassadører online, så de kan få svar på deres spørgsmål om vores ingeniøruddannelser og høre om hverdagen som ingeniørstuderende på SDU.

Målet er at give dine elever forudsætningerne for at tage et kvalificeret studievalg. Vores studievejleder står ligeledes til rådighed, hvis dette ønskes.

Dine elever kan booke deres online møde med ingeniørstuderende her: www.sdu.dk/tek/studerendeforendag