

2015

geoviden

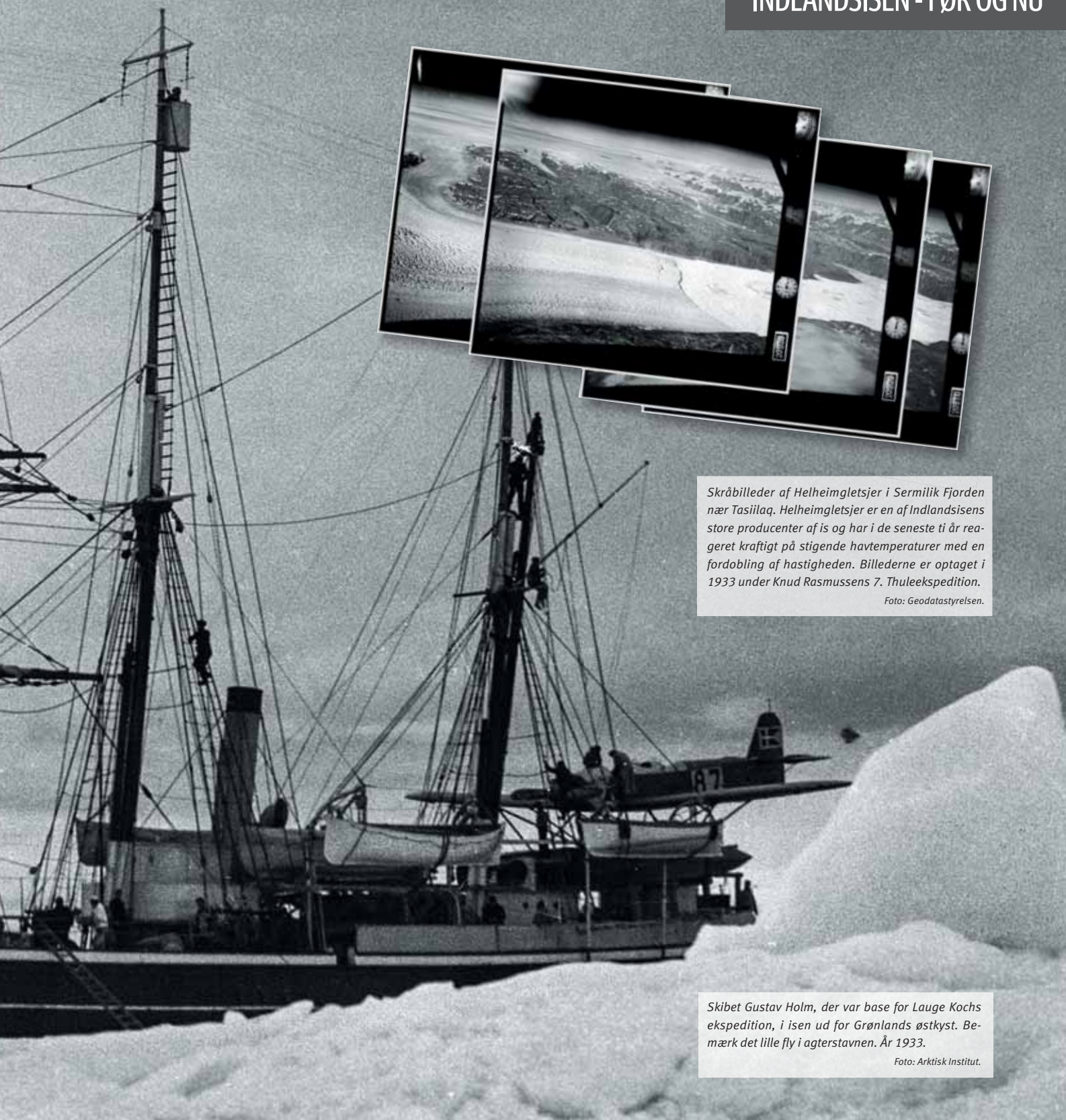
GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 04

Indlandsisen - før og nu



1930'ernes polarhelte indsamlede uvurderligt og uerstatteligt materiale til nutidens klimaforskere

Sommetider sker det, at gammelt arkivmateriale bliver yderst værdifuldt for nutidens forskere. Det skete, da gamle flybilleder fra Knud Rasmussens og Lauge Kochs ekspeditioner dukkede op hos Geodatastyrelsen for nylig. Billederne, der er de første flyfotos fra Grønland, har givet klimaforskerne et unikt indblik i, hvordan gletsjerne blev påvirket af klimatiske ændringer i en periode, hvorfra observationer er yderst sjældne.



Skråbilleder af Helheimgletsjer i Sermilik Fjorden nær Tasiilaq. Helheimgletsjer er en af Indlandsisens store producenter af is og har i de seneste ti år reageret kraftigt på stigende havtemperaturer med en fordobling af hastigheden. Billederne er optaget i 1933 under Knud Rasmussens 7. Thuleekspedition.

Foto: Geodatastyrelsen.

Skibet Gustav Holm, der var base for Lauge Kochs ekspedition, i isen ud for Grønlands østkyst. Bemærk det lille fly i agterstavnen. År 1933.

Foto: Arktisk Institut.

Gletsjere i hele Grønland har i løbet af de seneste år været udsat for et stort massetab i takt med stigende hav- og lufttemperaturer. Da de smeltende ismasser i sidste ende fører til et stigende havniveau, er det af stor vigtighed at have informationer om gletsjernes reaktion på klimaændringer – og helst gen-

nem så lang tid, som muligt. Langt de fleste informationer forskerne får, kommer fra satellitter, som blandt andet giver viden om gletsjernes højde; hvor hurtigt de bevæger sig og om massetab. Begrænsningen ved denne type data er den forholdsvis korte årrække, satellitterne har været i brug. I 1970'erne be-

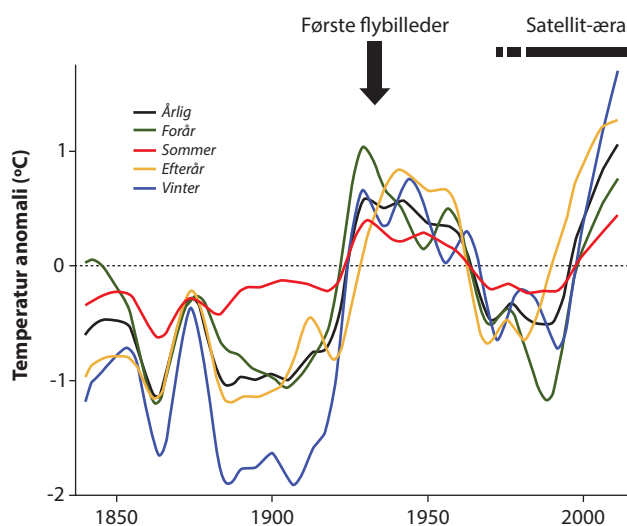
gyndte satellitterne for alvor at komme i brug, og først de seneste 10–20 år er datakvaliteten blevet tilstrækkelig god til at mindre ændringer kan observeres fra år til år. Fra tiden før satellitterne har man været afhængig af observationer fra felten eller fra flybilleder – hvor disse har været tilgængelige.

Et nyt værk om de gamle flybilleder

I sommeren 2013 fløj forskere fra Statens Naturhistoriske Museum og Aarhus Universitet i slipstrømmen af de historiske flyvninger fra 1930'erne. Med sig havde de luftfotograf Hans Henrik Tholstrup som genfotograferede de selvsamme gletsjere – nu mere end 80 år efter Knud Rasmussen og Lauge Koch fotograferede dem for første gang. Resultatet blev bogen "Indlandsisen – 80 års klimaændringer set fra luften".

En flyver kigger tilbage – ca.
3 km over Nuup Kangerlua.

Foto: Arktisk Institut.



Temperaturudvikling for Sydøstgrønland – vist som afvigelser (anomali) fra gennemsnittet for normalperioden 1951–1980. Der ses en kraftig temperaturstigning i 1920'erne, der matcher den stigning, vi har oplevet de seneste 20 år. De nuværende temperaturer er dog højere, end hvad der tidligere har været observeret i Grønland. Imellem de to varmeperioder har temperaturen været faldende. Øverst er angivet perioden med satellit-observationer, der har givet forskere information om gletsjernes tilstand. Ligeledes er angivet tidspunktet for de første flybilleder, der tydeligvis er meget ældre.

Kilde: Temperaturudviklingen er modificeret fra Box et al. (2009).

Et svingende grønlandsk klima

Den klimatiske udvikling gennem de seneste 100 år viser en stigende temperatur i begyndelsen af 1900-tallet, som blev afløst af mere stabile og faldende temperaturer i midten af århundredet. I de seneste 20 år har temperaturen igen været støt stigende. Det er også i denne periode, at man finder de varmeste, målte temperaturer fra den tid, der har været temperaturmålinger i Grønland. Det er netop også inden for de seneste 20 år, at langt de fleste gletsjerobservationer findes.

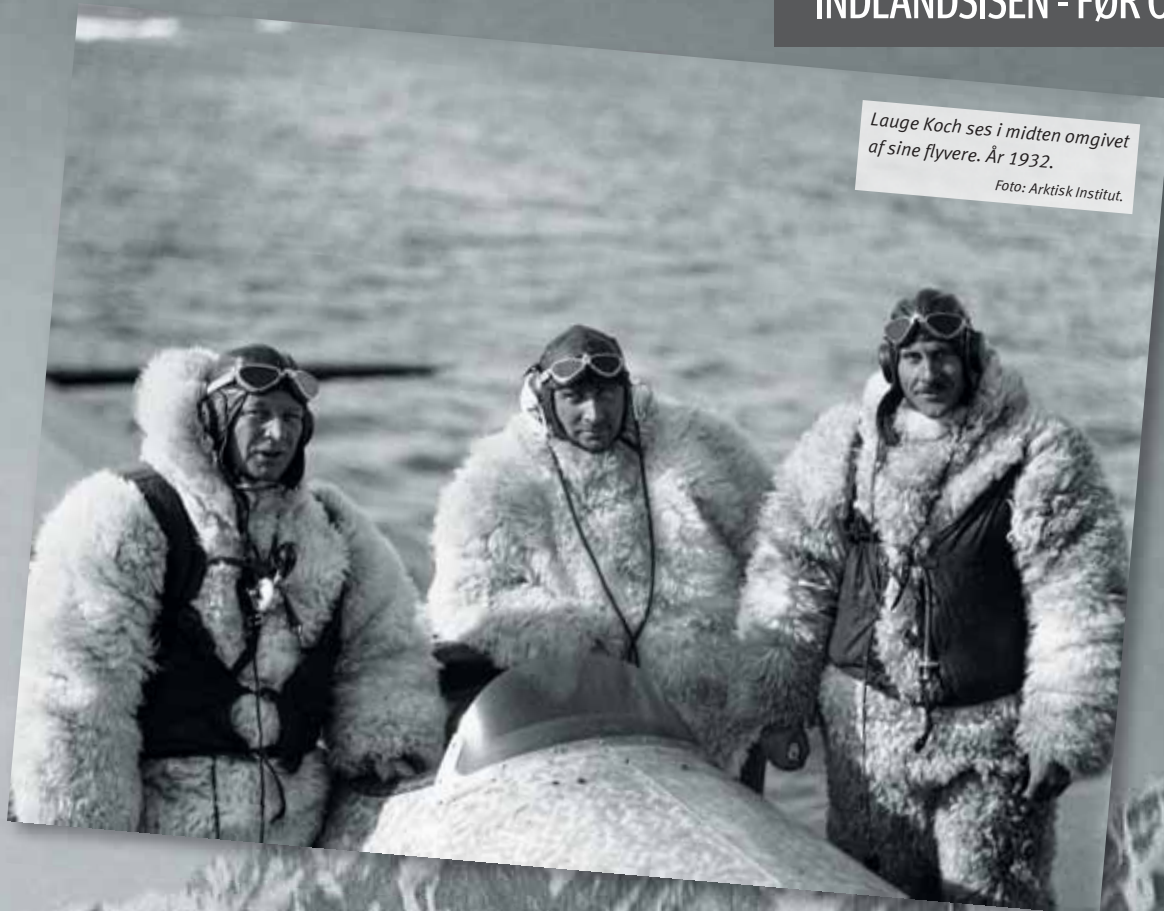
At temperaturen steg i 1920'erne med lignende intensitet, som den har gjort de seneste 20 år, gør de gamle flybilleder endnu mere interessante. De kan nemlig vise os, hvordan gletsjerne blev påvirket i en periode, som klimatisk ligner vores nuværende.

De gamle billeder af gletsjerne fortæller historien om gletsjernes stabilitet under skiftende klima og kan give nutidens forskere en idé om gletsjernes fremtid under de stadigt skiftende klimatiske forhold. Det vakte derfor stor begejstring, da flybilleder fra 1930'erne duk-

kede op hos Geodatastyrelsen efter at have ligget hengemt i årtier. Især fordi temperaturen i begyndelsen af århundredet – særligt i 1920'erne – steg kraftigt og nærmede sig de temperaturer, vi ser i dag. Billederne kunne således vise en analog til de gletsjerændringer, vi ser nu som følge af den globale opvarmning.

Lauge Koch ses i midten omgivet af sine flyvere. År 1932.

Foto: Arkisk Institut.



En vandflyver af mærket Heinkel over Staunings Alper (Scoresby Land, Østgrønland).

Foto: Statens Naturhistoriske Museum.

Nye tider for arktiske vovehalse

Flybillederne fra Geodatastyrelsen blev optaget under Knud Rasmussens 7. Thule-ekspedition til Sydøstgrønland i 1932–1933 og Lauge Kochs Treaarsekspedition længere mod nord på østkysten. Det er de første direkte observationer af gletsjerne i den del af Grønland, da området altid har været svært fremkommeligt og derfor forblev uudforsket,

mens store dele af vestkysten allerede var koloniseret og kortlagt.

Knud Rasmussen og Lauge Koch valgte at tage et nyt transportmiddel i brug til de storstilede ekspeditioner. Året forinden havde briterne under The British Arctic Air Route Expedition vist, at det var muligt at bruge vandflyvere som et pålideligt transportmiddel i den arktiske sommer. Med flyvere ombord på

ekspeditionsskibene kunne Rasmussen og Koch nu rekognoscere og kortlægge langt større områder, ligesom flyene hjalp med at guide skibene gennem de ofte besværlige is-situationer. Ekspeditionerne i begyndelsen af 1930'erne udnyttede fuldt ud disse nye muligheder, samtidig med at mindre motorbåde blev anvendt til flere forskellige hold, der drog ud fra moderskibet.



Karale Gletscher på Grønlands sydøstkyst er smeltet mere end 6 kilometer tilbage siden det første billede blev optaget i 1933. Farvefotografiet er fra 2013.

Fotos: S/H: Geodatastyrelsen
Farve: Statens Naturhistoriske Museum.

Her kan du læse mere:

Bjørk, A. A. et al. 2012.

An aerial view of 80 years of climate-related glacier fluctuations in southeast Greenland. *Nature Geoscience*. 5, s. 427–432.

Indlandsisen – 80 års klimaændringer set fra luften.

Kjær, Kurt H. (red). Statens Naturhistoriske Museum, København, 2013. 180 s.

Hvad viste Knud Rasmussens billeder fra Sydøstgrønland?

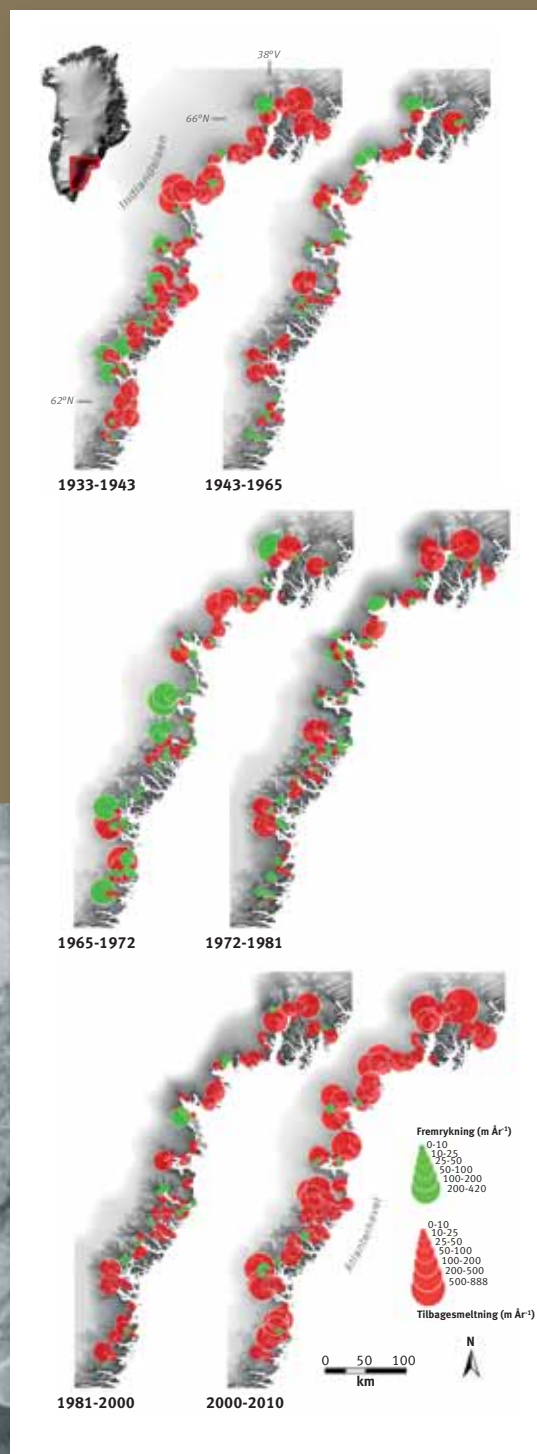
Efter billederne er blevet geo-oprettede og har fået geografiske koordinater, kan der måles, hvor gletsjerfronterne stod, og med tilstrækkelig mange observationer tegner der sig et billede af, hvordan gletsjerne påvirkes af den globale opvarmning. Resultaterne fra sydøstkysten viser, at der er sket store ændringer med gletsjerne siden de første flybilleder blev optaget. Billederne viser også, at gletsjerne påvirkes forskelligt af klimatiske ændringer afhængigt af gletsjertype, og om fronten står på land (landterminerende) eller i vand (marinterminerende).

I den tidligste periode, 1933–1943, var tilbagesmeltningen stor og udbredt over hele kysttrækningen. I denne periode var temperaturen generelt høj, og den fulgte efter en tidligere kraftig temperaturstigning - endda kraftigere end hvad der er blevet observeret i perioden 2000–2010. I den efterfølgende tid faldt temperaturen, og interessant er det, at gletsjerne reagerer hurtigt ved at stoppe den omfangsrige tilbagesmeltning. For mange gletsjeres vedkommende begyndte isfronten endda at rykke frem. Denne observation er overraskende, da man har ment, at gletsjerne var længere tid om at omstille sig efter temperaturændringer. Det har givet håb om, at gletsjerne kan gendannes i tilfælde af, at temperaturen skulle falde igen i fremtiden.

Fra 1972 og fremefter ses en accelerering i tilbagesmeltningen blandt størstedelen af gletsjerne samtidig med, at temperaturen er stigende.

Ændringer i Sydøstgrønlands gletsjerfronter. Ændringer er angivet som cirkler, hvor cirkelstørrelsen viser størrelsen på ændringerne i meter pr. år. Røde cirkler viser en tilbagesmeltning og grønne cirkler viser en fremrykning. Der er vist resultater fra både lokale gletsjere og gletsjere fra Indlandsisen. Der ses en stor andel af gletsjere med tilbagesmeltning i den tidlige periode (1933–1943), herefter skifter flere og flere gletsjere til at rykke frem, hvorefter langt de fleste igen smelter tilbage i perioden 2000–2012.

Figuren er modificeret efter Bjørk et al. (2012).





Midgaard Gletscher er blandt de gletsjere i Grønland, der har oplevet de største ændringer. Hele 30 kilometer er gletsjeren smeltet tilbage og en helt ny fjord er opstået.

Fotos: S/H: Geodatastyrelsen
Farve: Statens Naturhistoriske Museum.



Flyfotos – vigtige historiske vidnesbyrd

Flybillederne står i dag som et uvurderligt og eneste vidnesbyrd om gletsjernes position i begyndelsen af 1930'erne. Der skulle gå 10

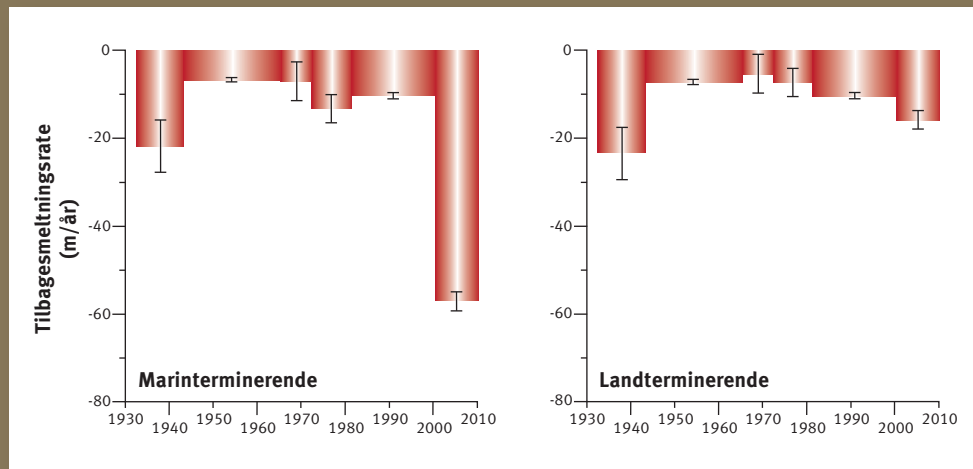
år, før der kom endnu en overflyvning og fotografering af sydøstkysten af Grønland. Denne gang var det det amerikanske militær, der fotograferede Grønland under 2. Verdenskrig. De første satellitbilleder stammer fra midten

af 1960'erne – men de har ikke altid været tilgængelige. De var nemlig optaget fra spion-satellitter, opsendt af amerikanerne under den kolde krig. De var første generation af satellitbilleder, og de blev optaget på alminde-

Ikke alle gletsjere reagerer ens

Når man sammenligner de landterminerende gletsjere med de marinterminerende, kan det ses, at gletsjerne har reageret forskelligt på temperaturændringerne. De landterminerende gletsjere smeltede hurtigere tilbage i 1930'erne, end de har gjort de seneste 10 år. En forklaring på dette kan være, at gletsjerfronterne har befundet sig forskellige steder i løbet af de to varmeperioder. I den tidlige varmeperiode var gletsjerne langt fremme, og fronten befandt sig ofte langt nede i dalen. Dette skyldtes den lange kuldeperiode, der netop var afsluttet et par årtier inden (den lille istid, sluttede ca. 1880–1900). Når man bevæger sig rundt i det grønlandske landskab, ser man ofte en randmoræne og en vegetationsløs zone i nærheden af nutidige gletsjere, der begge markerer gletsjerens maksimale udbredelse under den lille istid. Enkelte gletsjere har dog senere haft fremstød, der har overgået den lille istids maksimale isudbredelse. Efter afslutningen af den lille istid befandt gletsjerne sig altså langt fremme og langt nede i landskabet. Efter den kraftige afsmeltning i 1920'erne og 1930'erne var fronten for de fleste gletsjeres vedkommende rykket op i højere og koldere luftlag, og tilbagerykningen i det seneste varme tiår har derfor ikke været lige så kraftig som i 1930'erne.

Fronterne af de store gletsjere, der ender og kælver i havet, er generelt smeltede mere tilbage det seneste årti, end de gjorde i 1930'erne – de værst ramte er næsten smeltet én kilometer tilbage om året. Blandt andet var Midgaardgletsjer i Sermilik Fjorden ved Tasilaq fra 1933 til 2010 smeltet hele 22 kilometer tilbage. I flere af de seneste studier af disse meget voldsomme tilbagesmeltninger blandt de marin-kælvende gletsjere, tilskrives havtemperaturen en vigtig rolle. Det er også de store marin-terminerende gletsjere, der bidrager langt mest til havniveaustigningerne.



Tilbagesmeltningssrater udregnet som gennemsnit for observationsperioderne. Jo større blokken er, jo større er tilbagesmeltningen af gletsjerfronterne. Det ses, at de 'marine gletsjere' er smeltet meget hurtigere tilbage de seneste ti år sammenlignet med tidligere – modsat er det for de landterminerende gletsjere, der smeltede hurtigst tilbage i den første periode, fra 1933 til 1943. Måleusikkerheder er angivet for hver enkelt periode.

Modificeret efter Bjørk et al. (2012).

lig film. Det betød, at filmen fysisk skulle ned på Jorden for at blive fremkaldt og ikke som nu, hvor alt foregår digitalt. Filmen blev skudt ud i en kapsel med retning mod Jorden, hvorefter en faldskærm foldede sig ud. Et specielt

fly hentede den endnu svævende kapsel i luften, for at filmen ikke skulle falde i forkerte hænder. Et imponerende set-up, som forskere i dag kan drage nytte af, efter at billederne for nylig blev frigivet til offentliggørelse. Se-

nere – i slutningen af 1980'erne – blev satellitter langt mere almindelige, og i dag er de så mange, at man stort set kan få daglige opdateringer af isens tilstand.





Marine sedimentkerner

Størrelsen af den grønlandske indlandsis er meget varierende. Gentagne glaciale cyklusser har fået Indlandsisen til at vokse og brede sig ud over kontinentalsoklen, og nogle steder er den nået helt ud til kanten af soklen. Forskeres arbejde viser, at dette er forekommet mindst fem gange inden for de seneste 4,5 mio. år.

Når Indlandsisen bevæger sig over undergrunden eroderer den i underlaget, hvorved sedimenter indlejres i bunden af Indlandsisen. Sedimenterne aflejres efterfølgende og i særlig grad når isen begynder at smelte tilbage. Derved opfyldes dybe trug og bassiner i fjordene med enorme sedimentpakker. Disse sedimentaflejringer danner en form for arkiver for forskerne, som er vigtige for at kunne danne en forståelse af Indlandsisens interaktion med havet.



Der bores med en rumohr corer. Boret er trængt for dybt ned i sedimentet og der skal fjernes nogle blylodder, så vægten bliver mindre i næste forsøg.

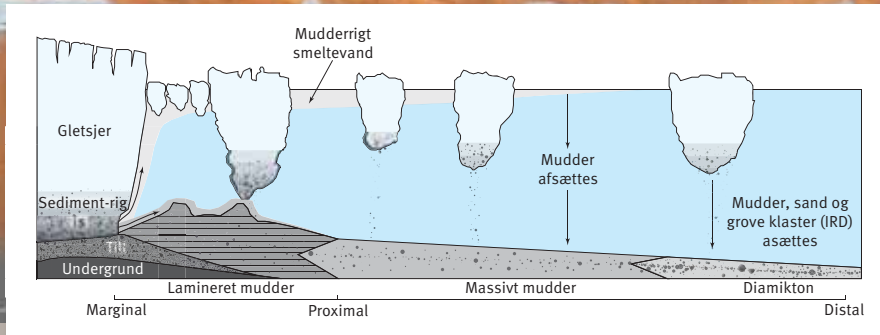
Foto: Robert S. Fausto, GEUS.

Sammensætningen af sedimentlagene afslører, hvordan Indlandsisen påvirkes af klimaændringer. Typisk er sedimentationsraterne (antal cm sediment aflejret pr. år) højest nær isranden, og derfor kan sedimentarkiver fra fjorde, hvor gletsjere kælver ude i selve fjorden (marinterminerende), bruges til at undersøge gletsjerændringer helt ned på årsbasis. I modsætning vil sedimentarkiver afsat langt væk fra isranden have en lav sedimentationsrate, som til gengæld er domineret af spor efter processer i det omgivende hav. Det kan fx være ændringer i artssammensætningen af mikroorganismer, som lever i vandsøjlen, på havbunden eller under havis. Når man har indgående kendskab til disse organisms nutidige leveforhold, kan man ved at undersøge sedimentkernen rekonstruere fortidige ændringer i fx vandets temperatur, salinitet og forekomsten af havis.

Når forskere skal hente sedimenter fra bunden af havet eller fjorde, sker det fra et skib, hvorfra et hult plastikrør med stor hastighed sænkes mod havbunden. Ved hjælp af tyngdekraften og en stor vægt, i form af blylodder, borer røret sig ned gennem sedimentlagene. I røret bliver der udviklet vakuum, som bidrager til at sedimenterne bliver i røret, når hele herligheden bliver trukket op til overfladen igen. Dette er så grundlag for selve undersøgelserne, som senere vil foregå hjemme i laboratoriet.

Helheim-gletscheren kælver ud i den 100 kilometer lange Sermilik-fjord.

Foto: Camilla S. Andresen, GEUS.



Principskitse af de overordnede sedimenter i en glacial fjord: Sedimentaflejringen er størst nær gletsjermarginen (marginalt). Her aflejres der både store mængder fint mudder, der var suspenderet (svævende) i vandet, og der droppes materiale af blandet kornstørrelse fra isbjergene, efterhånden som bunden af dem smelter. Længere ude i fjorden (proximalt) er tilførslen af suspenderet mudder markant mindre, hvorved aflejningsraten falder og strukturen i sedimentet bliver mere massiv. I den distale (fjerne) del af fjorden udgøres størstedelen af sedimentet af isbjergsdroppet materiale. En till er et sediment, som består af ler, silt, sand og grove klaster (en diamikton) og er karakteriseret ved at være aflejret af en gletsjer.

Kilde: Efter O'Cofaigh og Dowdeswell, 2001.

En vidt anvendt undersøgelsesmetode er IRD (Ice-rafted debris), som bruges til at vise tidligere variationer i gletsjeres bevægelsesaktivitet. IRD er en betegnelse for de sedimenter, der bliver transporteret af isbjerge. Under transporten smelter isbjergene og sedimenterne falder mod bunden, hvorefter de indgår i sedimentarkivet med vidnesbyrd om tilstedeværelse af isbjerge. En hyppigt brugt hypotese er, at jo mere IRD der er aflejret over en vis tid i en sedimentkerne, jo flere isbjerge har passeret over denne lokalitet og jo mere aktiv har gletsjeren været. Derved kan IRD-undersøgelser bruges til at rekonstruere tidligere ændringer i kælvningsaktivitet. Dog skal man i sin analyse være meget opmærksom på at tage hensyn til alle områdets særegne forhold såsom glaciologiske forhold, geomorfologiske forhold (fx bundforhold i fjorden) og ikke mindst karakteren af de vandmasser, der befinder sig i nærhed af gletsjeren. Har man godt styr på disse forhold, så kan IRD-analyser og mikrofossil-analyser bidrage med helt unik viden om fortidens ændringer. Et problem for forskerne er jo, at man først er begyndt rigtigt at overvåge Indlandsisen inden for de seneste 20 år, så derfor kan det være svært at vurdere, om de ændringer, man ser i dag, er helt exceptionelle – eller om det er noget, der sker med jævne mellemrum. Her kan sedimentkernerne bidrage med megen nyttig viden om forholdene længere tilbage i tiden.

Et eksempel på et feltstudie

Der er igennem tiden blevet hentet et stort antal marine sedimentkerner fra fjorden ved Sermilik, der ligger i Sydøstgrønland ved Helheimgletsjer. Denne gletsjer er særligt interessant at studere, da den er blandt de tre hurtigste i Grønland og derudover er fjorden fyldt med tykke sekvenser af sedimenter. Fjorden er forbundet med et trug tværs henover kontinentalsoklen ud mod Irmingerhavet. Dybderne i dette fjord-trug-system ligger i intervallet fra 500 til 900 meter og giver derfor mulighed for at varme Atlantiske havstrømme fra Irmingerhavet kommer helt ind til den 600 meter høje front af gletsjeren. De 600 meter er målt fra top til bund af gletsjeren; ca. 60 meter stikker op over vandet. Teorien er, at det varme vand kan påvirke gletsjeren til en øget afsmeltning, som vil resultere i en øget tilbagesmeltning af gletsjerfronten. Processerne er ikke helt kendt i detaljer – er det temperaturstigninger i vandet, øget tilførsel og udskiftning af vandet eller er det en medfølgende opvarmning af luften, der er vigtigst, når gletsjermarginen bliver ustabil og smelter tilbage? Dette er noget, der optager forskerne rigtig meget, men også noget, der er svært at observere, da det er forbundet med stor fare at lave feltobservationer i havet foran en kælvende gletsjer.

Ved hjælp af analyser baseret på sedimentkerner fra fjorden ved Sermilik, har man

formået at få svar på ét af de spørgsmål, som instrumentelle data fra de seneste 20 år ikke har kunnet belyse: var den øgede afsmeltning, vi har set for nylig ved Helheimgletsjeren helt unik – eller er det noget, vi har set før? Ved netop at studere IRD i kerner fra fjorden, fandt man frem til, at der fandt en tilsvarende markant afsmeltning og dertilhørende øget isbjergsproduktion sted i slutningen af 1930'erne. Ved at sammenligne med 100 år lange klima-dataserier for området, fandt man endvidere frem til, at lige netop denne gletsjer reagerer meget prompte på selv små klimaændringer. Dette var ny og meget interessant viden, da man indtil for nylig har ment, at Indlandsisen er en stor langsom isklump, der bruger tusinder af år på at tilpasse sig nye klimatiske forhold.

Så selvom kernerne ikke ser ud af det store, indeholder de et anseeligt, nyttigt arkiv for forskere. De kan afsløre mange hemmeligheder om fortidens samspil mellem Indlandsisen og det omgivende hav – et samspil, som er vigtigt at kende, hvis vi vil gøre os begreb om fremtidens ændringer i isen og det deraf stigende havniveau i forbindelse med klimaændringer. Vi bør betragte borekernerne som et rigtigt godt alternativ til instrumentelle målinger, når nu det engang bare er sådan, at vi mennesker først har opfundet termometeret og satellitten for ganske nyligt.



Tærskelsøer – på sporet af Indlandsisens fluktuationer

En ny metode har gjort det muligt at fremskaffe data om, hvordan Indlandsisen har reageret på tidligere Holocæne klimaændringer. Metoden går ud på at analysere og datere sedimenter fra borekerner, der er udtaget fra bunden af tærskelsøer. Lerede og siltede sedimenter vidner om, at isen var i en fremrykket position, mens gytjeprægede sedimenter blev dannet i de mildere perioder, hvor isen var smeltet tilbage.

For at forstå nutiden og gisne om fremtiden er vi nødt til at undersøge fortiden. Det er en læresætning, man benytter sig af inden for mange grene af geo-videnskaben, inklusiv is- og klimaforskningen, hvor man udnytter muligheden for at undersøge sammenhængen mellem fortidens naturlige klimavariationer og den samlede mængde af is på Jorden (kryosfæren). Men det er ikke altid lige nemt at finde analogier i fortiden, som kan bruges til

at belyse fx hvor sensitiv Indlandsisen er, og hvordan den muligvis vil blive påvirket af stigende temperaturer, som følge af global opvarmning. For hvordan kortlægger man egentlig, hvor meget mindre Indlandsisen var under tidligere varmeperioder, når sporene i form af fx moræner (se boks s. 13 og artikel om kosmogen datering s. 14), som vi normalt benytter, på nuværende tidspunkt befinder sig under flere hundrede meter is?



Et udsnit af en kerne fra bunden af en tærskelsø. Nederst i kernen befinder de ældste sedimenter sig. Her er en tydelig overgang fra den organiskrige gytje til det meget lerede og siltede lag, der definerer, hvornår isen kom ud over tærskelen til søen. Ved hjælp af kulstof-14 kan denne overgang dateres.

Foto: Nicolaj K. Larsen.



En typisk tærskelsø ses til venstre i billedet (1). Da isen under den lille istid befandt sig længere fremme end nu, leverede isen smeltevand til søen. Lige nu løber smeltevand direkte til fjorden (2) og søen er uden kontakt til isen, hvorfor sedimentationen i søen er helt anderledes end tidligere. Isens tidligere udbredelse kan ses på de såkaldte trim-lines (3), hvor isen har skuret fjeldet rent for vegetation. Gletsjeren er Frederikshåb Isblink.

Foto: Nicolaj K. Larsen.

Feltarbejdet og analysemetoder

Forud for feltarbejdet lokaliseres en række potentielle tærskelsøer på satellit- og flybilleder. Formålet er at finde de bedst egnede søer, som kan give et repræsentativt billede af isranden i et udvalgt område. I felten opmåles søerne med ekkolod for at lokalisere det optimale sted i søen for at lave en boring. Der bruges en hjemmelavet letvægtsplatform, som består af pontoner fra en 'river-rafting'-båd samt et dæk af aluminiumsplader.

Med boreudstyret kan man indsamle 3 meter lange intakte borekerner på en vanddybde af op til 50 meter, og det er tilstrækkeligt langt de fleste søer i Grønland. Til at analysere kernerne benyttes en række metoder, deriblandt glødetabsanalyser, korntørrelsesanalyser, magnetisk susceptibilitet og XRF kernescanning. Kronologien baseres på kulstof-14 dateringer samt blydateringer. Som noget nyt har vi i de sidste par år udviklet og testet nyt udstyr, som kan bruges til at indsamle kerner direkte fra en helikopter. Vi har også lavet en flyvende gummibåd, der udover at den kan flyve, også kan bruges som en lille boreplatform. De nye systemer skal bruges til at optimere feltarbejdet og muliggøre, at der kan indsamles borekerner fra et større antal søer, end hvad der hidtil har været muligt.



Forskerne viser stolt en borekerne frem fra tærskelsøen foran Helheimgletscher i Sydøstgrønland. Sedimentationsraterne (antal cm/tidsenhed) varierer meget, og her svarer en meter kerne til ca. 10.000 års sedimentation.

Foto: Anders A. Bjørk.



Foto: Kurt H. Kjær.

Tærskelsøer – en ny kilde til information

Tærskelsøer er en speciel type søer, som kun modtager glacialt smeltevand og sedimenter, primært ler og silt, når Indlandsisen er i en fremrykket position. Derimod vil søerne i perioder, hvor Indlandsisen er smeltet tilbage, ikke modtage glacialt smeltevand og søens sedimentation vil være præget af organisk dominerede sedimenter (gytje).

Disse skift mellem gråt silt og ler og brunlig gytje er tydelige i borekerne fra bunden af søerne. Ved at analysere og datere de gytjeholdige sedimenter med kulstof-14 metoden, er det muligt at finde ud af randzonens tid-

ligere udbredelse. Resultaterne fra lokaliteterne vil dermed bidrage til et overordnet billede af, i hvilke perioder Indlandsisen havde en udbredelse som den nuværende, og i hvilke perioder den havde en mindre udbredelse.

De første undersøgelser fra Sydgrønland viser, at den sydligste del af Indlandsisen generelt kun var mindre end nu i relativt korte perioder fra ca. 7000 til 5000 og igen fra 1500 til 1000 år siden. Perioden, hvor Indlandsisen var mindre, falder sammen med det Holocæne varmeoptimum og Middelalderens varmetid og viser entydigt, at når det er varmt, smelter isen og bliver mindre, mens den bliver større, når det er koldt. Resultaterne viser endvidere,

at Indlandsisen reagerer hurtigt på skift i klimaet og er mere dynamisk, end vi hidtil har vidst. Ved at sammenholde de nye data med computerbaserede ismodeller kan man udlede, at Indlandsisen mistede ca. 100 Gt per år under det Holocæne varmeoptimum. Da Indlandsisen var mindst, havde den mistet is svarende til en global havniveauanstigning på 16 cm. I de kommende år fortsætter vi arbejdet med at indsamle kerner fra tærskelsøer i Nordgrønland, hvor man ved meget lidt om, hvordan Indlandsisen har reageret på naturlige klimavariationer.

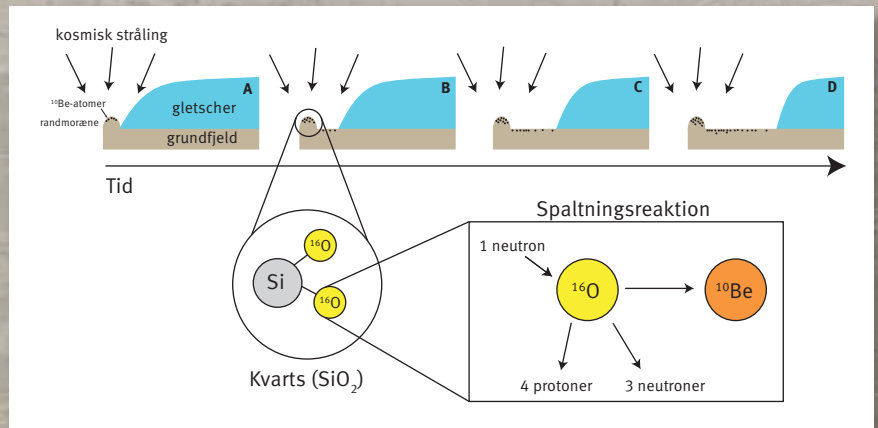


Eksponeringsdateringer

For at forstå Indlandsisens tidligere udbredelsesmønstre og hvordan den er blevet påvirket af forskellige klimaændringer, kræves der forskellige former for analyser alt efter om sporene skal findes i havet, i søer eller på land. Disse data-samlinger er med til at give forskere en bred forståelse for, hvordan Indlandsisen reagerer dynamisk på klimatiske processer.

I den store værktøjskasse, som geologerne bruger til at lære om Jorden, findes et relativt nyt værktøj kaldet *surface exposure dating*, som her vil blive refereret til som 'eksponerings-datering'. Dette værktøj kan hjælpe forskere med at fastlægge, hvor længe en stenets overflade har været blotlagt, eller eksponeret, for kosmisk stråling. Denne viden bruger geologer til at studere Jordens skiftende landskab, da det er et nyttigt værktøj til datering af jordskred og tilbagesmeltning af gletsjere. Begge disse processer fjerner gamle lag af klipper og eksponerer nye bjergarter på Jordens overflade.

Eksponeringsdatering er baseret på tilstrømningen af kosmiske stråler, der er dannet i vores galakse. Disse kosmiske stråler er højenergi-partikler, mest protoner, der kommer ind i atmosfæren og skaber kernereaktioner, som producerer sekundære partikler, for det meste højenergi-neutroner. Disse neutroner bombarderer Jordens overflade og skaber in situ (på stedet) *spallationsreaktioner* i mineralet kvarts (SiO_2). Det vil sige, at atomkerner sønderdeles ved sammenstødet med de energirige kosmiske stråler og skaber beryllium-10 (^{10}Be) fra oxygen-16 (^{16}O) i kvarts. Neutronerne har så meget energi, at de kan 'kaste' neutroner og protoner ud af kernen af ^{16}O -atomer og skabe ^{10}Be -atomer.



Spallationsreaktioner i kvarts forekommer, når kosmiske stråler bombarderer Jordens overflade. Når dette sker, bliver der dannet ^{10}Be af ^{16}O -atomer, som med tiden vil blive akkumuleret i stenoverflader, der er blotlagt for atmosfæren. Ved en tilbagesmeltning af en gletsjerfront (A-D), vil der blive blotlagt helt nye flader, som med tiden også vil indeholde ^{10}Be -atomer, mens den højeste koncentration af ^{10}Be -atomer er at finde på randmorænerne.

Illustration: Laura B. Levy.

Reaktionen ser således ud:
$$n + {}^{16}\text{O} \rightarrow 4p + 3n + {}^{10}\text{Be}$$

Da denne reaktion kun forekommer, når klippen er udsat for kosmisk stråling, kan vi bruge denne ophobning af ^{10}Be -atomer i overfladen af stenen til at fortælle os, *hvor længe* klippen har været udsat for kosmisk stråling. Ved høje

breddegrader (fx Arktis) har vi et godt skøn over, hvor hurtigt ^{10}Be ophobes i stenoverflader (mindre end 4 atomer ^{10}Be bliver dannet i et gram kvarts hvert år!). Vi kalder det 'produktionsrate', og når vi sammenholder det med koncentrationen af ^{10}Be i klippen, kan vi estimere, hvor lang tid klippen har været udsat for kosmisk stråling.

Udsigt over et landskab domineret af randmoræner, der markerer tidligere fremstød af gletsjerfronten ved Kangerlussuaq, Grønland.

Foto: Laura B. Levy.

Udgangspunktet for eksponeringsdateringer er ikke nyt, da teorien bag det blev udviklet tilbage i 1967, men det var ikke før midten af 1980'erne, at fremgangsmåden blev nyttig, hvor teknologiske fremskridt gjorde det muligt at lave instrumenter, som kunne måle meget små koncentrationer af atomer (fx *Accelerator Mass Spectrometry*). Siden da er disse instrumenter blevet forbedret løbende til at blive mere præcise og anvendelige til forskellige formål.

For at forklare princippet i eksponeringsdatering, kan man bruge solbrændthed som analogi: Det, at jo længere huden udsættes for solstråler, des mørkere hudfarve får man, svarer til, at jo længere klippen eksponeres for kosmisk stråling, jo flere ^{10}Be -atomer ophobes der i overfladen. Hvis man bruger solhat og en langærmet skjorte, bliver huden beskyttet

mod solens stråler og man bliver ikke solbrændt. Det samme gælder for ^{10}Be : Hvis en klippe er dækket af en gletsjer eller et tykt jordlag, vil den ikke få nogen ^{10}Be -atomer. Ved en solskoldning skaller huden af og afslører frisk, hvid hud nedenunder. Hvis det ydre lag af en klippe er eroderet væk af en gletsjer, fremstår der en frisk overflade uden ^{10}Be -atomer.

Hvad kan eksponeringsdatering fortælle os om Indlandsisens historie?

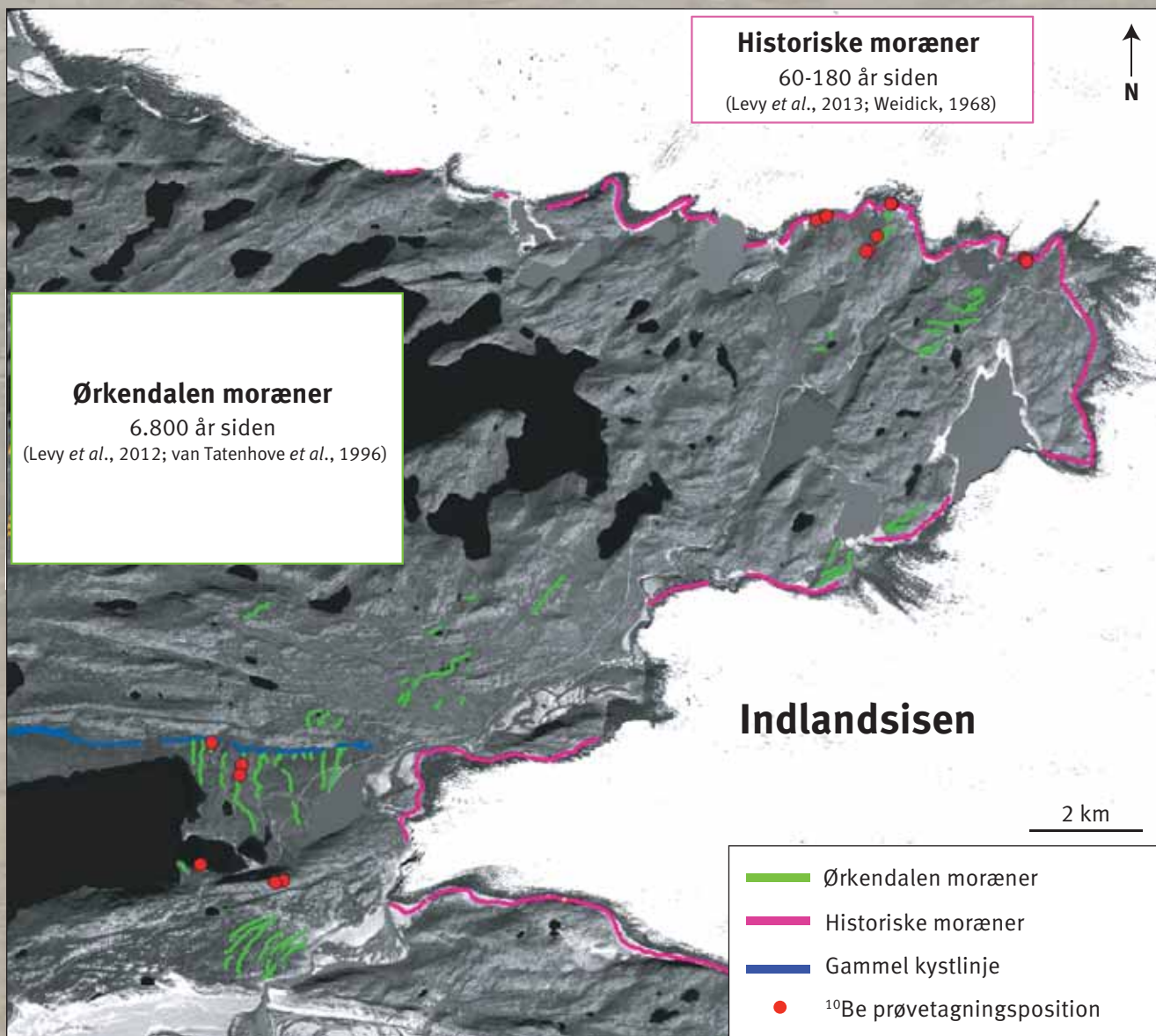
Folks interesse for Indlandsisen er steget i takt med dens nuværende øgede tilbagesmeltning. Interessen bunder blandt andet i, at konsekvenserne af tilbagesmeltningen kan medføre en global havniveaustigning. For at forstå, hvor-

dan Indlandsisen vil reagere på fremtidige klimaændringer, bliver vi nødt til at forstå, hvordan den har ændret sig igennem tiden. Vi kan bl.a. gøre dette ved hjælp af eksponeringsdateringer af gletsjerflejringer, såsom randmoræner. Randmoræner eller israndsbakker er af lange højderygge af ler, sand, grus og sten, der ertypisk er dannet ved at en fremadrykkende is – en gletsjer eller et isskjold – har skubbet materialer sammen eller ved at materialerne er smeltet ud af isen og gledet ned over isfronten. Når isen smelter tilbage, markerer randmorænen omridset af en tidligere maksimal udstrækning af isen for en given periode. Ved at datere randmoræner, får vi en alder på, hvornår isen lå fremme ved denne position. Til vores eksponeringsdateringer bruger vi meget store sten fra toppen af randmorænerne.

Prøveindsamling til eksponeringsdatering. Stenblokken er blevet transporteret hertil af et af Indlandsisens tidligere fremstød. Indsamlingen sker ved at sprænge stykker af stenen, som senere vil blive analyseret i et laboratorium. Bagved ses en relativt ung randmoræne, som ligger direkte foran gletsjerfronten.

Foto: Laura B. Levy.





Satellitfoto af Indlandsisen ved Kangerlussuaq, Vestgrønland. Randmoræner markerer tidligere isfremstød, som er vist med grønne og lyserøde linjer. Ved brug af eksponeringsdateringer, som er målt i de punkter, der er markeret med rødt, er vi kommet frem til, at Ørkendals randmorænerne blev dannet for omkring 6.800 år siden og de historiske randmoræner blev dannet for 60–180 år siden.

Efter: Levy *et al.* 2012.

I Kangerlussuaq, Vestgrønland, findes der mange randmoræner, der markerer udstrækningen af tidligere gletsjerfronter. Indtil for nylig blev alderen af randmorænerne bestemt indirekte ved at datere organisk materiale i søer, der grænsede op til randmorænerne. Ved indførslen af eksponeringsdateringer kan vi direkte datere randmorænerne af tidligere gletsjer-

fronter. Vi fandt, at randmorænerne i Ørkendalen er 6.800 år gamle og at de historiske randmoræner, der ligger tættere på den nuværende gletsjerfront, er 60–180 år gamle. Nogle steder befinder de historiske randmoræner sig oven på Ørkendalens randmoræner. Dette fortæller os, at Indlandsisen smeltede tilbage, hvorefter den begyndte at lave et nyt

fremstød af samme kaliber, men først for 60–180 år siden. Derfor kan vi sige, at fronten af denne del af Indlandsisen befandt sig bag denne position fra 6.800 til for 60 år siden. Disse data kan bruges til at lave iskappemodeller, der simulerer tidligere ændringer i isens omfang.



Med Søværnet på feltarbejde

Anders A. Bjørk
Post Doc, SNM, KU
andersb@snm.ku.dk

Kurt H. Kjær
Professor, SNM, KU
kurtk@snm.ku.dk

Svend V. Funder
Emeritus, SNM, KU
svf@snm.ku.dk

Grønland er stort - kæmpestort! Og når vi som forskere tager ud for at indsamle materiale, er logistikken og ikke mindst udgifterne ofte begrænsende faktorer. Eksponeringsdateringer giver et fantastisk billede af isens afsmeltning, men ulempen er, at man skal vidt omkring for at få en tilfredsstillende geografisk dækning. Ofte indebærer det mange dyre helikopter- og sejltimer.

I foråret 2015 havde forskere fra Statens Naturhistoriske Museum besluttet sig for at undersøge, hvornår Weichsel istidens isdække smeltede bort fra Grønlands sydvestkyst. Det er en lang kyststrækning på flere hundrede kilometer, og målet var at indsamle fjeld-



Gummibåden er blevet sat i vandet og i baggrunden ses KDM Knud Rasmussen.

Foto: Svend V. Funder.

Gummibåden er lastet med forskere og udrustning til arbejdet på land. Sikkerheden er i orden – ingen går ombord uden overlevelsesdragt, vest og hjelm. Til højre ses ekspeditionsleder Kurt H. Kjær.

Foto: Svend V. Funder.



Knud Rasmussen (P570) bryder den tynde fjordis i Mørkefjord. Vi befinder os i slutningen af maj, men stadig er de indre fjorde dækkede af is. Isen er intet problem for inspektionsfartøjet, men langt fra optimalt for gummibåden.

Foto: Kurt H. Kjær.



SAR-fartøjet på vej for at hente forskerne efter endnu en vellykket prøveindsamling.

Foto: Svend V. Funder.



Det var prøvetagning, det hele handlede om. Her ses stensaven i aktion på grundfjeldet ved en afyderterne langs Grønlands sydkyst.

Foto: Svend V. Funder.

prøver til eksponeringsdatering langs hele yderkysten. En opgave som under normale omstændigheder ville tage det meste af en sommer og være forbundet med store udgifter. Det vakte derfor stor jubel, da Søværnet meldte sig på banen med en hjælpende hånd. Søværnet patruljerer de Grønlandske farvande, yder redningstjeneste, fiskerikontrol og blandt meget andet bistår de også forskere i deres arbejde i Grønland.

Hovedaktøren på togtet var inspektionsfartøjet *KDM Knud Rasmussen*, der på 10 dage bragte forskerne rundt til de ønskede lokaliteter langs kysten. Fra skibet blev forskerne sat i land med gummibåd, når vejret var godt og med SAR-fartøj (**S**earch **A**nd **R**escue; på dansk: eftersøgning og redning), når vejret

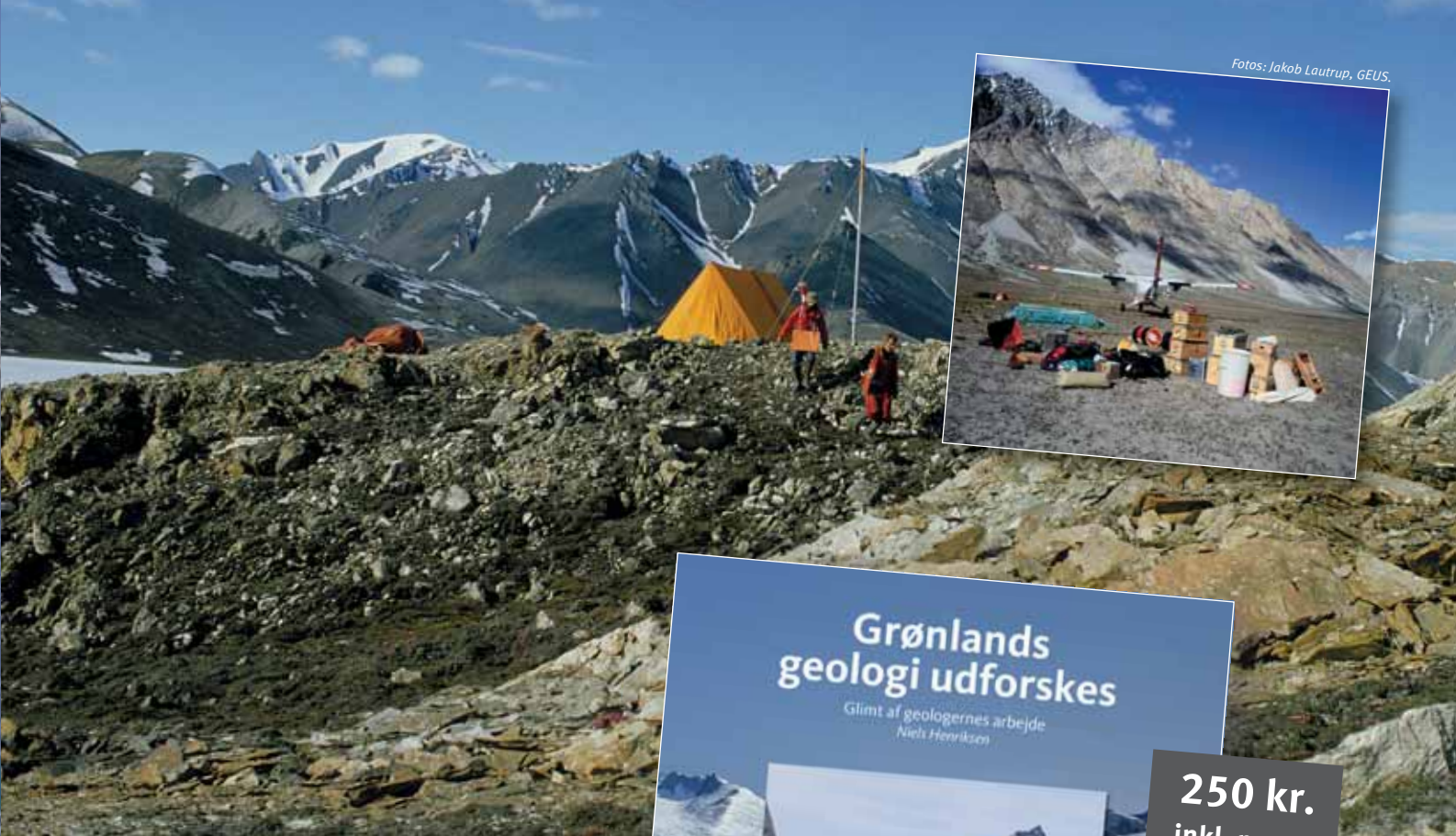
var dårligt, eller når der skulle sejles langt. SAR-fartøjet har jetmotor og en lukket kabine.

Det er lidt af en bedrift at få gummibåd med personer på vandet og tilbage på *Knud Rasmussen* igen, men takket være inspektionsfartøjets veltrænede besætning gik opgaven som smurt – hver gang. Det foregik på denne måde: Vi sad klar i gummibåden, som hang i en wire på siden af *Knud Rasmussen*. Når banjemesteren gav signal, blev gummibåden firet ned på vandet alt imens inspektionsfartøjets stød holdt kursen. Motorerne blev startet inden kontakten med havet, og i samme sekund gummibåden ramte overfladen, blev wiren koblet fra, og gummibåden kunne sejle mod land.

Når det var nødvendigt at benytte SAR-fartøjet, blev dette 'skudt ud' af en agterluge på inspektionsfartøjet. Og efter endt mission kunne det sejle direkte tilbage og ind i *KDM Knud Rasmussen* via en rampe.

På denne facon kom forskerne på rekordtid op og ned langs kysten og fik indsamlet store mængder materialer, der nu er blevet sendt til USA med en studerende, som skal foretage de endelige analyser. Når resultaterne foreligger, vil det være muligt præcist at tidsbestemme, hvornår denne del af Grønland så dagens lys for første gang efter istidens vældige ismasser dækkede landskabet.





Grønlands geologiske udforskning

En ny bog: "Grønlands geologi udforskes – glimt af geologernes arbejde" er netop udkommet. Bogen fortæller om geologernes arbejde på mange ekspeditioner i alle dele af Grønland i løbet af næsten 70 somre.

I gennem mange år har geologer hver sommer trasket igennem Grønlands fjelde, fløjet over landet og sejlet langs kysten for at kortlægge geologien. Bogen fortæller om deres arbejde og giver læseren indblik i, hvad de lavede, hvordan de boede, hvad de spiste, og hvilke skibe, fly og helikoptere de brugte for at komme rundt i det store land med den barske natur.

Bogen henvender sig til de, der er interesseret i Grønland, geologisk udforskning, ekspeditionsliv og eventyr.

Bogen har fokus på statens indsats, som er varetaget af GEUS siden 1946 med deltagelse af mange danske og udenlandske forskere. Og den er rigt illustreret med billeder

og fakta-bokse om geologernes arbejde på de mange ekspeditioner i alle dele af Grønland i løbet af næsten 70 somre.

Bogens forfatter Niels Henriksen har været ansat som geolog ved GEUS fra 1963 til 2000 og har som statsgeolog gennem mange år været leder af den geologiske kortlægning. Han har fra sin tid som student deltaget i arbejdet og har haft i alt 35 somres feltarbejde i Grønland, og han har deltaget i mange af de ekspeditioner, der er beskrevet i bogen.

Bogen er på 336 sider med fokus på statens udforskning af Grønland. Den er rigt illustreret med sine over 580 figurer og billeder om den geologiske udforskning. Endvidere er der over

70 personprofiler af geologer og andre grønlandsfarere. De vigtigste indsatser gennem årene er vist i en overskuelig grafisk oversigt.

Bogen kan købes hos:

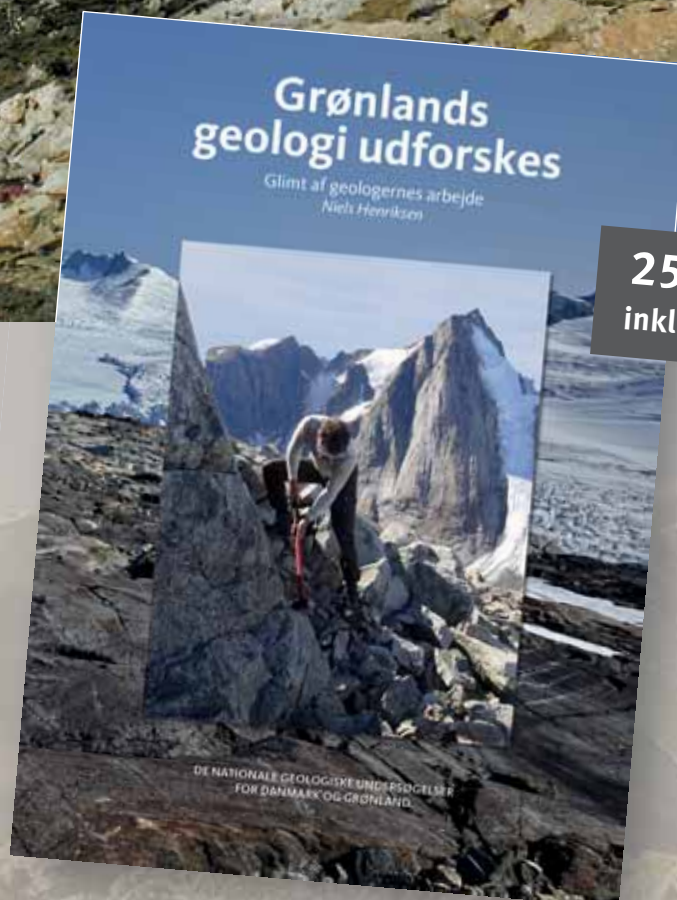
GEUS

Øster Voldgade 10, 1350 København K

Tlf.: 38 14 20 00

E-mail: bogsalg@geus.dk

Bogen er udgivet af GEUS. Pris: 250 kr. inkl. moms, men eksklusiv forsendelse.



250 kr.
inkl. moms



GÅ I DYBDEN med UNDERGROUND CHANNEL

Tidligere på året blev **UNDERGROUND CHANNEL** – en online videokanal med fokus på geovidenskab - lanceret.

Gennem filmmediet vil **UNDERGROUND CHANNEL** give svar på komplicerede spørgsmål om klodens udfordringer såsom klimaforandringer, råstofudnyttelse, sikring af rent drikkevand og forståelse af voldsomme fænomener som jordskælv, vulkanudbrud og tsunamier. Bag kanalen står Geocenter Danmark.

På nuværende tidspunkt er der adgang til mere end 30 videoer på **UNDERGROUND CHANNEL**. Emnerne spænder vidt, fra pladetektonisme og Jordens ældste bjergarter, over vulkanudbrud og smeltende Indlandsis til søhistorie og gamle kilder – for bare at nævne et udpluk.

Bliv klogere selv, eller benyt videoerne i din formidling af geofagene til børn og unge mennesker i skoler og gymnasier.



UNDERGROUND
CHANNEL

Besøg videokanalen **UNDERGROUND CHANNEL**:
www.UNDERGROUNDCHANNEL.dk



GEOCENTER DANMARK

GEOCENTER DANMARK

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet samt Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, samt Geologisk Museum (Statens Naturhistoriske Museum) begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidskabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.

UDGIVER

Geocenter Danmark.

REDAKTION

Geviden – Geologi og Geografi redigeres af Seniorforsker Merete Binderup (ansvarshavende) fra GEUS i samarbejde med en redaktionsgruppe.

Geviden – Geologi og Geografi udkommer fire gange om året og abonnement er gratis. Det kan bestilles ved henvendelse til Annette Thy, tlf.: 91 33 35 03, e-mail: athy@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

ISSN 1604-6935 (PAPIR)

ISSN 1604-8172 (ELEKTRONISK)

Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.

Tryk: Rosendahls - Schultz Grafisk A/S.

Forsidefoto: Kangerlussuaq i Østgrønland, syd for Blosseville Kyst.

Foto: Hans Henrik Tholstrup, SNM.

Reprografisk arbejde: Benny Schark, GEUS.

Illustrationer: Forfattere og Grafisk, GEUS.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.

Ilulissat Isfjord.

Foto: Merete Binderup, GEUS.



DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND (GEUS)

Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 38 14 20 00
E-mail: geus@geus.dk



INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB OG
NATURFORVALTNING (IGN)

Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 35 32 25 00
E-mail: sl@life.ku.dk



INSTITUT FOR GEOSCIENCE

Aarhus Universitet
Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670
8000 Århus C
Tlf: 89 42 94 00
E-mail: geologi@au.dk

GEOLOGISK MUSEUM (SNM)

Øster Voldgade 5–7
1350 København K
Tlf: 35 32 23 45
E-mail: rcp@snm.ku.dk

DANMARK

PP

Magasinpost UMM
ID-nr. 46439

PortoService, Postboks 9490, 9490 Pandrup