

PÅ SPORET AF JORDENS FORTID

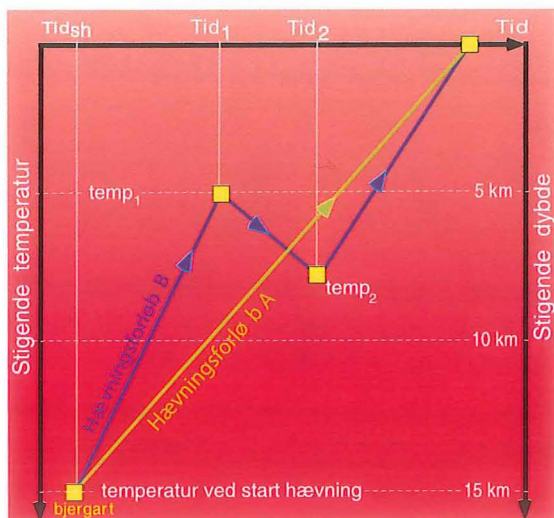
Kirsten Hansen

Det er i dag muligt ved forskellige metoder til aldersbestemmelse at finde ud af, hvilke temperaturer en given bjergart har været udsat for i løbet af sin historie. Oplysningerne om disse temperaturer kan fortælle om de geologiske processer, som har været virksomme til forskellige tider, og dette kan give oplysninger om fortidens landskabsudvikling frem til nutidens. Mange bjergarter, som i dag ses ved Jordens overflade, har tidligere været på større dybde og dermed været udsat for højere temperaturer, idet temperaturen stiger med dybden - almindeligvis med 20-40°C/km.

Figur 1 viser et eksempel (A) på temperatur-tidsforløbet for en bjergart, som via erosion er bragt til overfladen. I samme figur vises et forløb (B), hvor afkøling er blevet afbrudt af en periode med opvarmning. En vigtig metode til undersøgelse af sådanne temperatur-tidsforløb er fissionssporsmetoden, der er en dateringsmetode baseret på radioaktivt henfald af atomer (en radiometrisk dateringsmetode).

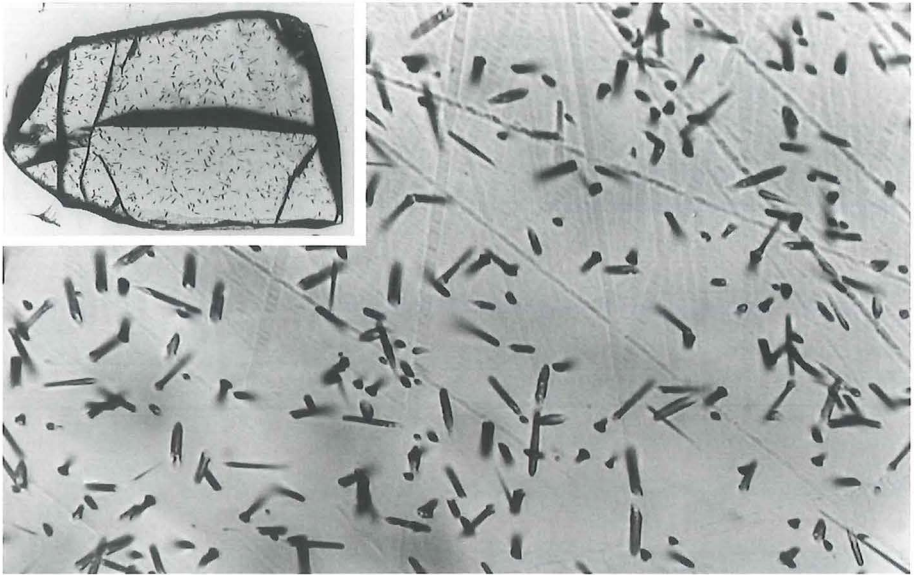
Fissionssporsmetoden

Fissionssporsmetoden er særlig god til at undersøge temperaturforløb under ca. 200°C, hvor det er vanskeligt at opnå oplysninger med andre metoder. Metoden er tidligere blevet beskrevet i Varv (1982,1) i forbindelse med eksempler fra Østgrønland. Videreudvikling af metoden har sammen med nye analyser fra Østgrønland ført til ny viden om den



Figur 1. Temperatur-tids forløb for en bjergart som bliver bragt fra dybde til overfladen. I forløb A bringes bjergarten direkte til overfladen i takt med en fremadskridende nederodering af jordskopen.

I B afbrydes hævningsforløbet af en indsynkningsperiode (Tid₁ - Tid₂), hvor bjergarten bringes på større dybde og får øget sin temperatur fra temp₁ til temp₂. Indsynkningsperioden kan påvises ud fra dateringer af bjergarten.

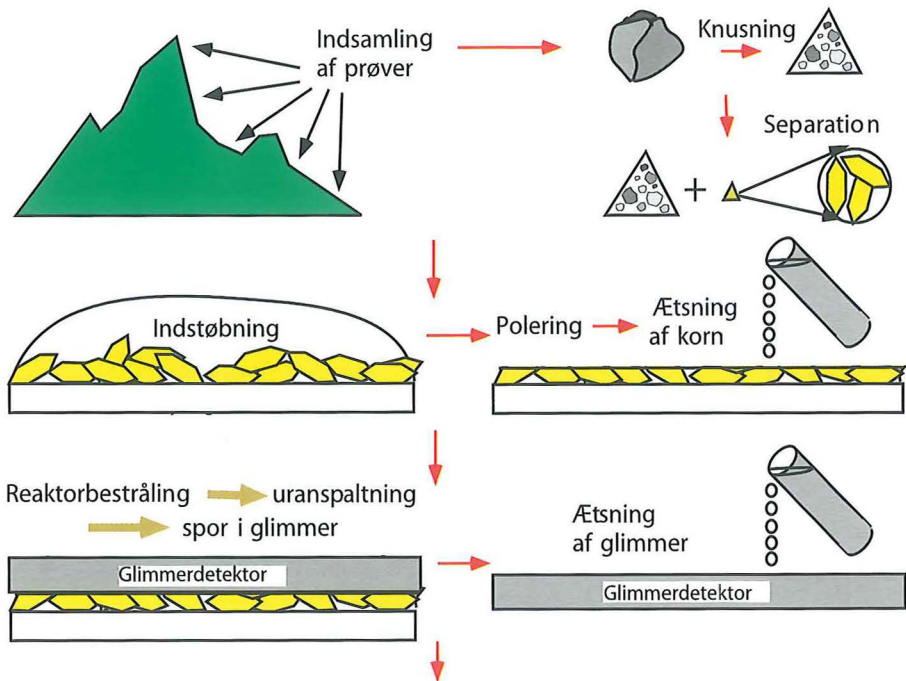


Figur 2. Ætsede fissionsspor i apatit.

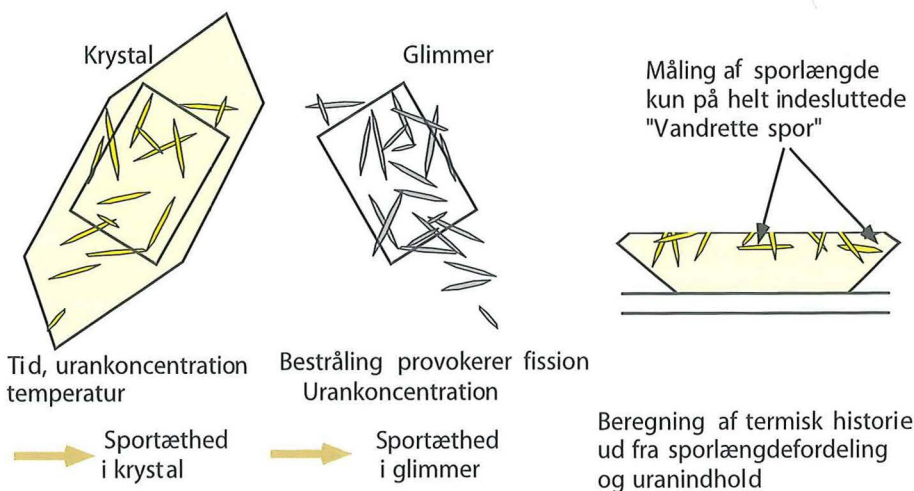
østgrønlandske kontinentrands temperaturudvikling. I Skandinavien er der gennemført en række fissionssporsanalyser af forskellige laboratorier, bl. a. har fissionssporslaboratoriet på Københavns Universitet gennemført et studium i det centrale Sydnorge (Evjeområdet).

Fissionssporsanalyse er én blandt mange metoder, som tages i anvendelse for at erhverve viden om den geologiske udvikling i tid og rum. Metoden supplerer andre undersøgelser med oplysninger om temperaturudviklingen (den termiske historie). Ved fissionssporsanalyser udnytter man, at en uranisotop (^{238}U) er ustabil og spontant spalter (fission) - med en bestemt hyppighed - til to nye grundstoffer, det ene med en atomvægt omkring 98 amu det andet med en atomvægt omkring 138 amu. Fissionsprodukterne stødes fra hinanden, hvorved der dannes spor i det materiale (oftest et mineral), de passerer igennem. Derfor kan man beregne den tid, der er forløbet, siden det første spor i materialet blev dannet, når man har målt sportætheden og koncentrationen af uran.

Alle spor i et materiale dannes lige lange, men længden afhænger af materialet. For mineralet apatit er dannelseslængden f.eks. omkring 16 μmeter . Sporene kan kun bevares under en temperatur, som er karakteristisk for materialet. Ved temperaturer, hvor spor kan bevares, sker der dog en afkortning af sporet, der er afhængig af temperaturen og varigheden af temperaturpåvirkningen. Længden af hvert enkelt spor er således resultatet af den termiske historie siden sporets dannelse, og de korteste spor er ældst.



Tælling og måling af spor ved c. 1600x forstørrelse på bestemte krystalflader og på glimmerdetektor. De viste fremtæsedede spor krydser overfladen i alle retninger



Beregning af alder ud fra sportæthed i korn og detektor

Figur 3. Forløb af fissionssporsanalyse. Glimmerdetektoren lægges på prøven for bestemmelse af bestålsdosis i reaktoren.

Kender man materialets reaktion på temperaturpåvirkning, er det muligt ved beregning at bestemme temperaturudviklingen gennem tiden ud fra uranindhold, sportæthed og sporlængdefordeling. Materialernes følsomhed overfor temperaturpåvirkning er således en vigtig parameter, som har været genstand for undersøgelser dels i laboratoriet dels i områder med en velkendt termisk historie.

For at foretage en fissionssporsanalyse skal sporene ætsets frem, tælles og måles under stærk forstørrelse. Figur 2 viser fissionsspor ætset frem i mineralet apatit. Indsamling og håndtering er vist i figur 3.

Flere mineraler kan benyttes til fissionssporsanalyse. Hidtil er det bedst undersøgte mineral apatit. Der er flere grunde til, at netop dette har været genstand for undersøgelser af dets reaktion på opvarmning. Apatit er mest følsomt ved temperaturer mellem ca. 60°C og 125°C. Dette temperaturinterval giver andre metoder ikke oplysning om. Apatit findes ydermere i de fleste almindeligt forekommende bjergarter i tilstrækkelig mængde til fissionssporsanalyse.

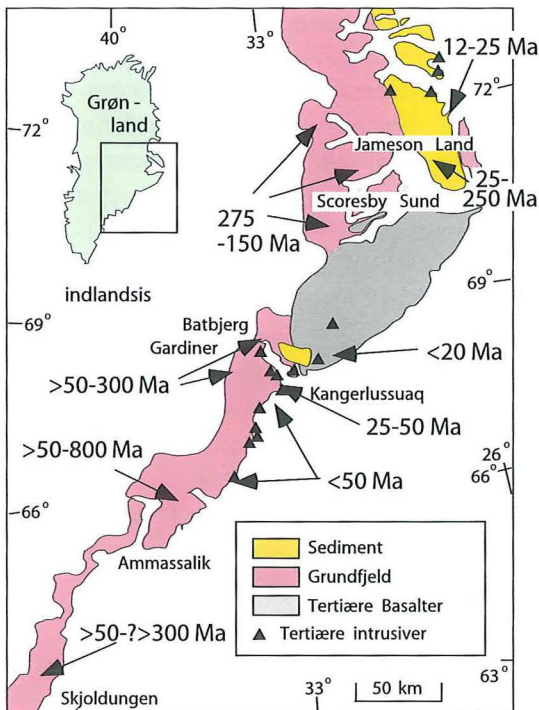
Olief- og gasdannelse foregår ved temperaturer, som nøje svarer til det temperaturområde, hvor sporene i apatit er mest følsomme, hvilket har betydet en stor interesse for udviklingen af metoden til brug ved olieefterforskning. Metoden har også store muligheder ved studier bl.a. af lodrette bevægelser af kontinenter, af kontinentvækst og kontinentopsprækning, som bl.a. fører til dannelsen af oceaner. Dette skyldes, at de temperaturer, som en bjergart udsættes for gennem tiden, nøje hænger sammen med den geologiske udvikling, der er et samspil mellem hævnning og samtidig erosion, og indsynkning og begravelse, idet temperaturen som nævnt stiger med dybden under jordoverfladen. Også magmatiske processer som for eksempel størkning af magmaer kan have stor betydning for den termiske udvikling i såvel lokal som regional målestok.

I det følgende vil der blive gennemgået eksempler på metodens anvendelse i Østgrønland og Sydnorge.

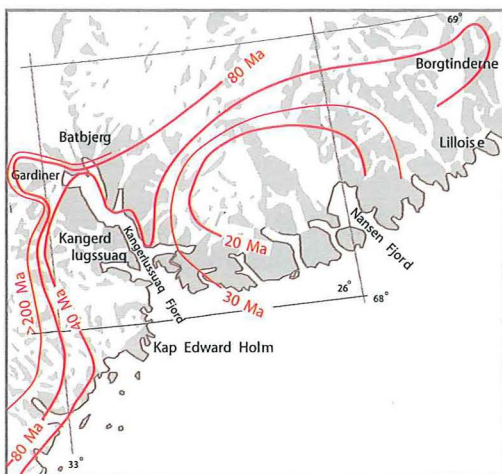
Østgrønland

Fissionssporsdatering gør det muligt at opstille en model for den østgrønlandske kontinentrands udvikling tolket på baggrund af den termiske historie.

Grønland var tidligere en del af et stort kontinent. I Østgrønland i Kangerlussuaqområdet startede en kontinentopsprækning for omkring 55 millioner år siden. Den østgrønlandske kontinentrand er et nøgleområde for forståelsen af, hvordan kontinenter bryder op og oceaner udvikles, og af de mulige årsager hertil. Her kan man studere kontinentranden, begivenhederne op til, under og efter kontinentadskillelsen, dannelseshastigheden og strukturen af den nydannede havbund, indflydelsen fra kappen og en såkaldt 'hot spot' (VARV 2000, 2), bl.a. i magmaudviklingen og den termiske og tektoniske historie. Alt dette har indflydelse på,



Figur 4. Oversigtskort over Sydøst- og Østgrønland. På kortet er indføjet typiske fissionsaldre for apatit fra forskellige regioner.

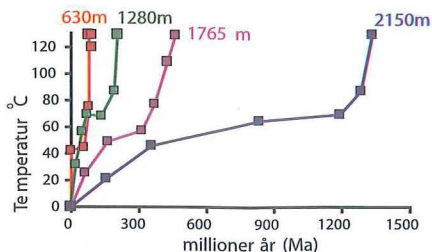
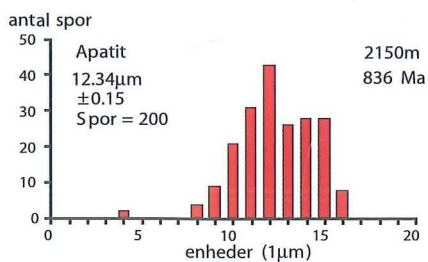
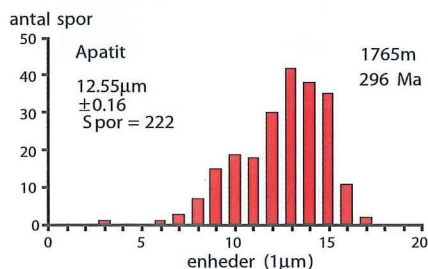
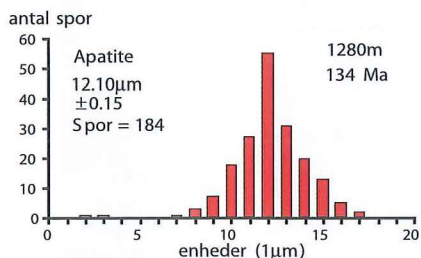
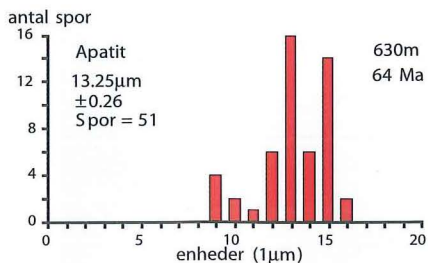


Figur 5. Apatit alderskurver fra Kangerlussuaq-området.

hvordan bjergarterne udvikler sig, på den landskabsmæssige udvikling og på den temperaturhistorie, bjergarterne har gennemløbet. Bjergarterne bærer således informationerne om de fysiske kræfter, som er årsag til det landskab, vi ser i dag.

Undersøgelser i Østgrønland med fissionssporsmetoden giver et detaljeret kend-skab til den termiske historie. Nedenfor har jeg givet detaljer fra et profil nær Ammassalik. En oversigt over Østgrønlands geologi ses i figur 4 sammen med resultater af fissionssporsdateringer af mineralet apatit. Resultater af dateringerne fra Kangerlussuaqområdet ses i figur 5.

Figur 6 viser et eksempel på fissionssporsaldre og fissionsspors længdefordeling i apatit fra fire prøver fra et profil (Kangertittivatsiaq) indsamlet vinkelret på kysten lige nord for Ammassalik. Figuren viser også en temperaturhistorie beregnet for hver prøve ud fra sporelængdefordeling, sportæthed og uranindhold. For de fire prøver gælder, at alderen, stiger med stigende topografisk højde og afstand til kysten. Fordelingen af sporenes længde, som er vist med søjler i figur 6, viser et mønster med et bredt spektrum af gamle (korte) og unge (lange) spor for prøver med den højeste alder (836 millioner år). Det vil altså sige, at prøven har kunnet fastholde spor, som er dannet helt tilbage i Prækambrium, og at temperaturen ikke har været over ca. 125°C de sidste >800 millioner år. Med aftagende alder ændres spor-



længdefordelingen således, at kun få af de unge spor er lange: fordelingen er symmetrisk. Dette betyder, at temperaturen har været høj nok til at afkorte nydannede spor og først er tilstrækkeligt lav til at nydannede spor bevares uafkortede langt senere end for den først omtalte prøve.

Ser vi nu på prøven med den yngste fissionssorsalder (64 millioner år), viser den sig at have en dominans af lange spor, dvs. at temperaturen i hovedparten af den tid, hvori den har kunnet fastholde fissionsspor, har været under ca. 70°C. Det er samtidig værd at lægge mærke til, at aldrene er højere, jo højere topografisk eller længere inde på kontinentet beliggenheden er.

Da temperaturen stiger med dybden er det nærliggende at antage, at de viste prøver repræsenterer forskellige dybder i jordens skorpe, som nu er bragt frem til overfladen ved erosion og hævnning. Det er dog ikke muligt ud fra de præsenterede data at afgøre, hvorvidt kontinentranden har været genstand for øgede lodrette jordskorpebevægelser i forhold til baglandet i forbindelse med en opsprækning i Tertiærtiden (yngre end 65 millioner år).

To fortolkninger af udviklingen indenfor det undersøgte tidsrum eller kombination af tolkningerne er mulig: 1) bjergarter i samme niveau stammer fra stadig større dybde i skorpen i retning mod kysten, dvs. større

Figur 6. Sporlængdefordeling for profilet nord for Ammassalik. Apatits middelsporlængde, usikkerhed, alder, antal målte spor og højde over havniveau er også vist. Desuden vises en beregnet temperaturhistorie, som er baseret på de målte data for hver prøve.



Figur 7. Renlands topografi viser rester af den gamle erosionsflade i de flade toppe.

hævningshastighed og erosion af landskabet ved kysten i forhold til inde i landet og 2) bjergarterne på samme niveau repræsenterer samme dybde i skorpen og altså samme hævningshastighed langs profilet, men øget i tertiær tid. Løsning 1 kan tilvejebringes ved en kipning af landskabet eller forskydning langs forkastningsplaner. Systematikken i aldersfordelingen sandsynliggør, at ikke andre faktorer som for eksempel temperaturpåvirkning fra magmatiske processer spiller en rolle.

I figur 6 vises også den mulige termiske historie beregnet ud fra målingerne. Som nævnt er sporene i apatit særligt følsomme for afkortning i temperaturområdet 60-125°C. Denne viden kombineret med laboratorieeksperimenter og erfaringer fra velkendte geologiske historier danner basis for en række regneprogrammer, som er udviklet for at kunne beregne mulige termiske historier.

Resultatet af beregningerne er vist i figur 6. De er i overensstemmelse med idéen om, at de yngste prøver har tilbragt relativt kort tid i det temperaturfølsomme område, dvs. mellem 60°C og 125°C. Omvendt har prøverne med symmetrisk sporelængdefordeling tilbragt relativt lang tid ved temperaturer mellem 60°C og 125°C. Prøven som er taget længst væk fra kysten (836 millioner år) har været længe i såvel det følsomme område som ved lavere temperaturer. Den hovedsagelig skæve længdefordeling for denne prøve er resultatet af den langsomme afkølingshastighed og dermed erosionshastighed i hele perioden. Den langsomme



Figur 8. Staunings Alpers topografi viser et ungt alpint relief.

erosionshastighed gør, at rester af meget gamle erosionsflader har kunnet bevares i form af højtliggende erosionsplaner.

Dette ses netop ses i Ammassalikområdet syd for det viste profil inde i landet som flade toppe i flere kilometers højde. Tilsvarende viser grundfjeldstoppe i området omkring Scoresby Sund rester af en gammel (post-kaledon) erosionsoverflade, medens Staunings Alper nord herfor viser et ungt relief med spidse toppe, som det ses i Alperne (figur 7 og 8).

Det billede, som tegner sig ud fra de hidtidige fissionssporsundersøgelser, er et hvor de indre dele af kontinentet syd for Kangerlussuaq siden Prækambrium - dvs. gennem de sidste mere end ca. 540 millioner år - kun har undergået en langsom hævnning og en erosion på 2-3 kilometer. Derfor er rester af en gammel erosionsflade bevaret. Langs kysten omkring havniveau ses et langt dybere snit i jordens skorpe. Bjergarterne her har været på mindst 3 kilometers dybde indtil Tertiær tid. I Kangerlussuaqområdet bliver denne udvikling overpræget af dels den kaledonske bjergkædefoldning for ca. 500 - 400 millioner år siden, dels af den tertiære udvikling.

Udviklingen i Tertiær tilskrives begivenheder i forbindelse med kontinentopspækningen og tilstedeværelsen af en 'hot spot' under Kangerlussuaq i Østgrønland. Denne 'hot spot' er en temperatur-anomali, som skyldes opstigende varmt kappemateriale. I dag befinder den sig under Island. Effekten af temperatur-

anomalien og materialetilførslen kommer især til udtryk i en kraftig magmatisk aktivitet i Kangerlussuaqområdet.

I dette område har der også fundet en hævning (opdoming) sted, hvor tidligere nu borteroderede basalter af tertiær alder må have nået ca. 3-4 kilometer over det omkringliggende landskab. Fissionssporsanalyser viser, at temperaturanomalien ved Kangerlussuaq Fjorden nøje er knyttet til udbredelsen af intrusive bjergarter (bjergarter dannet ved krystallisation af bjergartssmelter i dybet). Ved dannelsen af intrusiverne er alle informationer om en gammel temperaturhistorie fra kaledonsk tid slettet. Den magmatiske termiske historie, som den afspejles i temperaturmønsteret i selve Kangerlussuaq, kan ikke påvises i området nordøst for Kangerlussuaq Fjorden. Her er kun den udvikling, som forekommer omkring eller efter ophøret af den seneste magmatiske aktivitet bevaret. Man regner derfor med, at det kilometertykke overliggende basaltdække er blevet borteroderet indenfor de sidste ca. 10 millioner år.

Man ved ikke, hvor langt basalterne har nået sydpå i Kangerlussuaq og nordpå i Scoresby Sund området, og hvor tykke de har været. I de centrale dele af basaltområdet regner man med en samlet tykkelse på op til omkring 7 - 8 kilometer. Syd og vest for Kangerlussuaq sætter dateringerne et maksimum på omkring 2 kilometer (eller 60-70°C) for basalternes tykkelse, og nord herfor gælder det for grundfjeldet, at temperaturpåvirkningen har betydet temperaturer på op til 80°C i tertiær tid. Man må også forestille sig, at basalterne dækkede det nordfor liggende Jameson Land bassin.

De foretagne analyser har vist, at sedimenterne i sedimentbassinet i Jameson Land opnåede de højeste temperaturer i tertiær tid, hvor det samlede sedimentdækkes tykkelse var størst. De yngste sediment (<65 millioner år gamle), der er bevaret i den centrale del af Jameson Land bassin, har stort set ikke været udsat for temperaturer i apatits følsomme område, dvs. at tykkelsen af det yngre overliggende materiale inklusive basalter her højest har været omkring 2 kilometer.

Syd norge (Evjeområdet)

Fissionssporsundersøgelser på mineralet titanit fra prækambriske ca. 900 millioner år gamle intrusive bjergarter i Evjeområdet viser, at bjergarterne kølede ned fra smeltetemperaturer (>600°C) til omgivelsernes temperaturer på omkring 250-200°C, hvor titanit kan fastholde spor, for mere end 800-600 millioner år siden.

Undersøgelser af væske-gas indeslutninger i bjergarterne viser samtidig, at dybden på det tidspunkt var 4-5 kilometer. Dette betyder at temperaturstigningen med dybden var på ca. 50°C/km. Fissionssporsresultater, resultater fra væske-gas indeslutninger samt K/Ar- og Rb/Sr-isotopdatering gør det sandsynligt, at

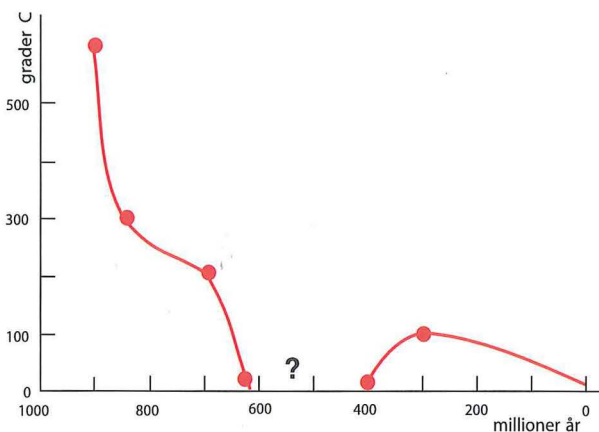
området undergik en hurtig hævnning og erosion indtil for 800 millioner år siden. Derefter aftog erosionshastigheden, og der dannedes en erosionsflade.

Temperaturen oversteg ikke siden de ca. 250°C. Området blev i post-kaledonisk tid imidlertid udsat for temperaturer, som var tilstrækkeligt høje til at nulstille apatit fissionssporsaldrene, men ikke titanaldrene. Temperaturpåvirkningen var resultatet af indsynkning og begravelse under en sedimentation fra sent i Kambrium (ca. 500 millioner år) til ind i Perm (ca. 300 millioner år). Bjergarterne har derfor været udsat for temperaturer på mindst 125°C svarende til mindst 4 kilometers dybde i sen Devon til tidlig Perm (400-300 millioner år) ved en temperaturstigning med dybden på 30°C/km. Udviklingen er vist i figur 9.

Resultaterne passer ind i det generelle billede af en stor domestruktur, som blev dannet efter udformningen for omkring 600 millioner år siden af en erosionsflade i det sydlige Norge.

Fissionssporsdata fra det sydlige Norge og Sverige indikerer en fælles post-kaledon udvikling for det sydlige Skandinavien.

Figur 9. Sandsynlig udvikling af temperatur fra sen Prækambrium til i dag i Evjeområdet.



Opsummering

Det Østgrønlandske landskab er præget af et højtstående relief ofte med flade toppe og gennemskåret af dybe dale. Fissionssporsundersøgelser har vist, at de gamle - muligvis prækambriske - grundfjeld i baglandet i den sydlige del af Østgrønland har bevaret den prækambriske erosionsflade i de højtstående flade toppe. I Kangerlussuaqområdet sker der et skift til grundfjeld af kaledonsk alder. I selve Kangerlussuaqområdet er den generelle udvikling overpræget af den tertiære magmatiske udvikling, som igen nordøst herfor er præget af hævnning og erosion af et tykt basaltdække indenfor de sidste ca. 10 millioner år. Hævningshastigheden er øget i forbindelse med den tertiære kontinentopspækning formodentlig især langs kontinentranden. Den præ-tertiære udvikling blev omkring Kangerlussuaq og nordover forstyrret af den kaledonske bjergkædedannelse ca. 600–400 millioner år tilbage i tiden. Denne begivenhed blev fulgt af kombineret hurtig erosion

og hævnning, som førte til dannelse af den post-kaledoniske erosionsflade, som nu er bevaret i de flade toppe i Scoresby Sund området, medens den er eroderet bort nord herfor. Denne udvikling blev ledsaget af indsynkning og sedimentation i bl. a. Jameson Land bassinet, der formodentlig nåede sin største dybde i sen Tertiær tid med et sandsynligt kildeområde i det omkringliggende eroderede kaledonske grundfjeld.

I det sydlige Norge fandt krystallisation af prækambriske intrusive bjergarter sted på mindst 4-5 kilometers dybde og blev fulgt af hurtig hævnning og erosion. I Perm nåede temperaturen op på temperaturer mellem 125°C og 250°C formodentlig som et resultat af begravelse under et sedimentdække. Herefter bragtes bjergarterne til overfladen gennem erosion. Denne udvikling er fælles for det sydlige Skandinavien.

Ordliste

Atomvægt: Den gennemsnitlige vægt af et atom af et grundstof udtrykt i en vægtenhed (amu) som svarer til 1/12 af en bestemt kulstofisotops atomvægt.

Isotop: En isotop udgør sammen med andre isotoper et grundstof. Alle isotoper har samme kemiske egenskaber men forskellig atomvægt.

Jordens kappe: Den ydre del af jorden minus skorpen til ca. 2883 kilometers dybde. Oceanskorpen er ca. 8 kilometer tyk, mens kontinentalskorpen er 20-70 kilometer tyk.

Den kaledonske bjergkædedannelse: En bjergkædedannelse der fandt sted for omkring 500-380 millioner år siden.

Magma: Smeltet stenmasse.

Neutron: Del af atomkerne

Radiometrisk dateringsmetode: En absolut dateringsmetode baseret på henfald af radioaktive isotoper.

1µmeter: Én tusindedel af én millimeter.

næste VARV udkommer
1. december