

VARV priser 2000

Årgang 1964-1979	pr. årg. 10kr	pr. nr. 5kr
Årgang 1980-1985	pr. årg. 20kr	pr. nr. 10kr
Årgang 1986-1990	pr. årg. 50kr	pr. nr. 25kr
Årgang 1991-1994	pr. årg. 75kr.	pr. nr. 25kr
Årgang 1964-1985 samlet - 1964,1 og 1965,3		200kr
Årgang 1986-1994 samlet		450kr
Årgang 1995	årg. 100kr	pr. nr. 30kr
Årgang 1996	årg. 100kr	pr. nr. 30kr
Årgang 1997	årg. 120kr	pr. nr. 35kr
Årgang 1998	årg. 120kr	pr. nr. 35kr
Årgang 1999	årg. 120kr	pr. nr. 35kr
Årgang 2000	abonnement 120kr	pr. nr. 35kr

Særunumre

Geologi på Øerne (Stevns-Faxe-Møn)	15kr
Geologi på Røsnæs	15kr
Ghana	15kr
Nordgrønland (1986,1)	25kr
Danmark I Istiden (1989,2)	30kr
Iltsvind, sort slam og trilobitter (1996,1)	30kr
Særunumre samlet	100kr

Palæoklima (1996, 3+4 & 1997,2)	80kr
--	------

Bornholms geologi

I Generel oversigt (1988,2)	30kr
II Palæozoikum 1988,3)	30kr
III Grundfjeldet (1989,1)	30kr
IV Mesozoikum (1989,3)	30kr
Bornholms geologi samlet	100kr

Geologisk kort over den danske undergrund	50kr
--	------

VARV

NR. 3

BLADET MED DE ÆLDSTE NYHEDER

2000



**OTHOCERATITTER OG OLIE
FISSIONSPOR
KARBONATIT MAGMA
FORAMINIFERER OG SPORFOSSILER**

ISSN 0105 - 6301

01- 10 - 2000

Forsidebillede: Ca. 470 millioner år gammel orthoceratit (fossil blæksprutte) med olie fra Kinnekulle, Vestsverige. Orthoceratitten er 28 cm lang.

Foto: Bjørn Buchardt

Forfatterne til artiklerne i dette nummer er:

Bjørn Buchardt og Mette Hansen

Kirsten Hansen

Jesper Øksne Jørgensen og Paul Martin Holm

Kurt Søren Svensson Nielsen

De kan alle kontaktes på adressen: Geologisk Institut, Østervoldgade 10,
1350 Kbh. K

VARV

Udgives med støtte fra Kulturministeriets bevilling til almenkulturelle tidsskrifter.

Adresse: Tidsskriftet VARV, Geologisk Institut, Øster Voldgade 10,
1350-København K. Telefon: 35 32 24 00, Geologisk Institut.

E-Mail: SvendP@Geo.Geol.KU.DK

Redaktion: Asger Berthelsen, Bjørn Buchardt, Bjørn Hageskov, Henrik Fougt,
Mikkel Hede, Mikael Pedersen og Svend Pedersen (ansvarshav.)

Bestyrelse: Asger Berthelsen, Valdemar Poulsen, Bjørn Hageskov og Svend
Pedersen.

Tekstredaktør: Svend Pedersen

Lay-out og grafik: Bjørn Hageskov

Repro og tryk: B.B. Serigrafi & Offset.

VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 120 kr i abonnement for 2000 og
2001. Abonnement kan tegnes ved at indsende beløbet til VARV, postgiro 9 06
88 80, eller 140 SEK til VARV's svenske postgirokonto: 4388-5, eller 140 NOK
til VARV's norske postgiro: 0806 1923234.

Adresseændringer bedes meddelt VARV

© VARV eftertryk af tekst og billeder kan kun ske efter aftale.

hed. Skalmorfologien af *B. williamsonianus* er meget lig *F. amphiphaga*. Aperturfladen har et næsten ens udseende i de to arter, og hvis *B. williamsonianus* er en prædator, kunne det forklare den variation, der er observeret i sporene på skallen af *A. gibbossa*. Desværre er begge slægter sjældne i nutidige miljøer, og det vides ikke, om *F. amphiphaga* er den eneste prædator i disse slægter.

Kombinationen af studier af foraminiferer og ichnofossiler synes lovende, idet de foreløbige resultater tyder på, at det er muligt at foretage studier af prædation i både nutidige og fossile marine miljøer. Imidlertid kan denne type studier ikke stå alene. I fremtiden vil det være nødvendigt at inddrage både ovennævnte type studier samt egentlige økologiske studier, der fokuserer på prædation af foraminiferer fra nutidige miljøer, hvis man ønsker at danne sig et mere detaljeret billede af foraminiferernes plads i den marine fødekæde.

I forbindelse med donation af prøverne fra Florida Keys ønsker jeg at takke Pamela Hallock samt NSF-OCE- 9203278 og NOAA-NURC/UNCW Subcontract No. 9322

Ordforklaring

Apertur/aperturflade: Et apertur er det hul, der findes i det yngste kammer på skallen af foraminiferer. Det er gennem denne åbning, at foraminiferen er i kontakt med det omgivende miljø. Aperturfladen er således den flade, der indeholder aperturet.

Bevaringspotentiale: Chancen for at finde dele af og/eller hele organismer bevaret i fossile miljøer. Skallerne af muslinger har således et større bevaringspotentiale end kroppen af vandmænd, der udelukkende består af organisk materiale.

Bioerosion: Erosion foretaget af levende organismer på eller i et substrat. Som eksempel kan nævnes marine svampes borer i koraller.

Carnivore: Organismer, der udelukkende lever af kød.

Detritus: Delvist nedbrudte rester af døde planter og dyr.

Herbivore: Organismer, der udelukkende lever af planter.

Mikro- (præfiks): 20-200 µmeter.

Nanno- (præfiks): 2-20 µmeter.

Nekton: Aktivt svømmende organismer.

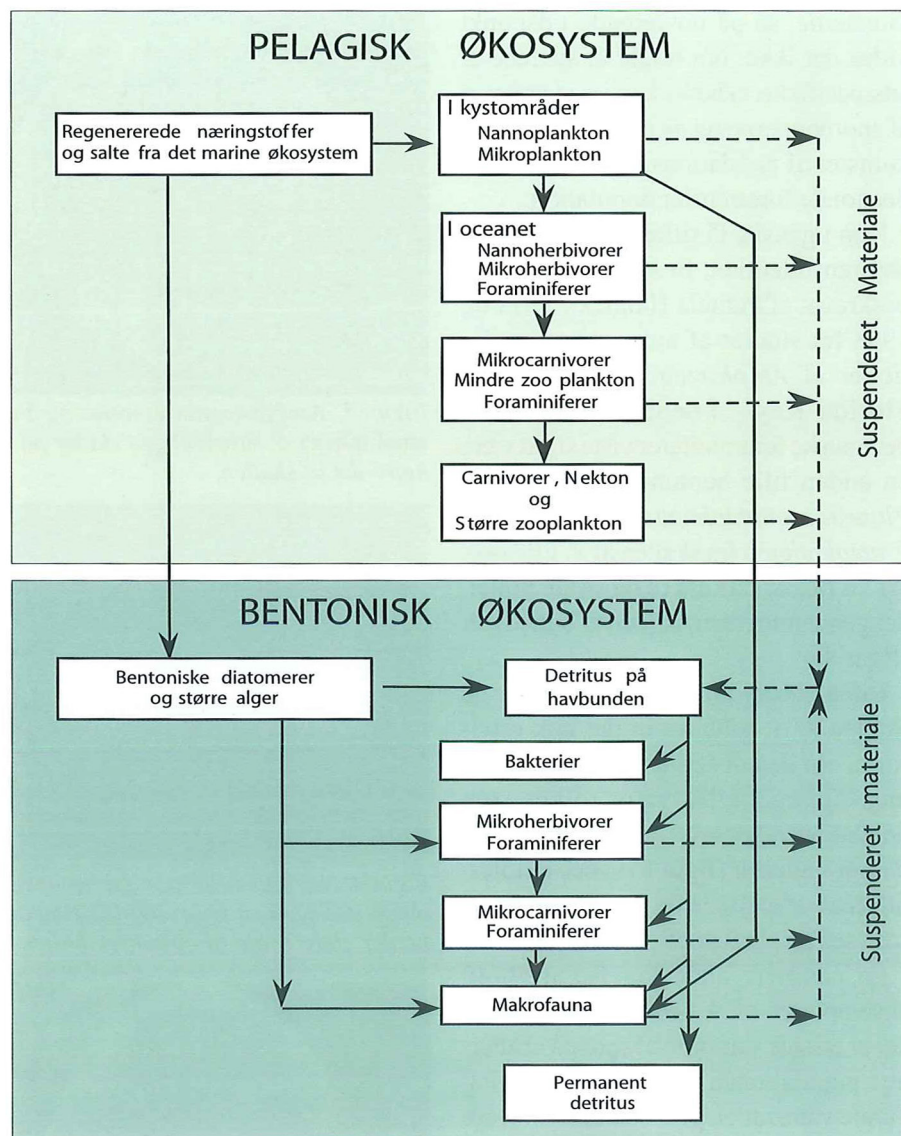
Plankton: Organismer, der driver med havstrømmene i oceanet. Nogle af dem er dog istand til at justere deres vertikale position i vandmassen.

Pelagisk: Organismer, der lever i de øverste dele af oceanet.

Taxonomi: Studiet af identifikation samt navngivning af organismer.



Figur 6. Buliminoides williamsonianus.



Diagram, der skematisk viser energisætningen i det pelagiske og bentoniske økosystem. De fuldt optrukne pile betyder, at leddet indgår primært i fødekæden, dvs. at en gruppe af organismer udnyttes af andre organismer som føde. De punkterede pile betyder, at leddet indgår indirekte i fødekæden og skal igennem et eller flere led før det bliver tilgængeligt som føde. For eksempel kan en fisk, der dør og falder til bunds indgå direkte i fødekæden ved, at ådselæder kan udnytte kødet. Hvis fisken bliver begravet i sedimentet, vil 'liget' blive nedbrudt af bakterier, som efterfølgende kan udnyttes af andre organismer.

ORTHO CERATIT I OLIE

en specialitet fra Ordovicium ved Kinnekulle

Bjørn Buchardt og Mette Hansen

Kinnekulle i Västergötland ved den svenske sø Vänern er et lille geologisk paradis. Her ligger aflejringer fra Nedre Palæozoikum smukt arrangeret som lag i en lagkage: nederst sandsten, så skifer, kalksten, skifer - underlejret af gamle gnejsler og granitter, dækket af en vandret diabasbænk. Diabasen er kendt af enhver strandvandreren i Danmark: Kinnediabasen, der viser isens vej fra Mellemsverige til de danske moræneaflejringer. Kinnekulle er en frodig perle; de mange lag af kalksten og skifer gør jorden næringsrig og frugtbar, og klimaet er mildt takket være Vänerns lunende effekt. Her har vi arbejdet nogle år, bl.a. med undersøgelser af geokemien i de lokale skifre og kalksten, og her blev vi første gang opmærksomme på de oliefyldte orthoceratitter, som denne artikel skal handle om.

Den dominerende bjergart på Kinnekulle er kalksten, bænket, massiv, oftest rød, populært kaldet orthoceratitkalk, og gennem århundreder brudt som bygningssten. Kalkstenen er fra Nedre og Mellem Ordovicium, omkring 470 millioner år gammel, og bestemte horisonter indeholder store mængder af fossile blæksprutter: orthoceratitter der har givet navn til bjergarten. Orthoceratitkalken kan ses i de mange forladte kalkbrud rundt om Kinnekullebjerget, men også i det udmærkede lille geologiske museum i Hällekis ved nordspidsen af Kinnekulle er der smukke prøver fra kalken.



Skive af orthoceratitkalk med oliefyldt orthoceratit. Olien er sivet ud fra de calcitfyldte kamre i orthoceratitten under skæring af blokken og har imprægneret store dele af skiven. Stykket findes på det lille stenmuseum i Hällekis på Kinnekulle.

I udstillingen kan man bl.a. se en kalkstensskive med en gennemskåret orthoceratit fyldt med en sort, olieagtig væske. Ifølge beskrivelsen i den lokale guide er det dyrets bløddele, der er forrådnede til olie (og altså ikke rester af blæksprutts blæk, som nogen har foreslået). Forklaringen forekom os lidt suspekt, bløddelene har sikkert været nedbrudt længe inden dyret blev begravet, og en nærmere inspektion af stykket, bl.a. ved hjælp af næse og fingre, afslørede da også væsken som råolie, sort, klæbrig og med karakteristisk petroleumslugt. Og så begyndte historien jo at blive spændende.

Lokale venner fik os sendt videre til Thorsberg Stenhuggeri på østsiden af Kinnekulle, der bryder kalksten i et lokalt brud til bl.a. fliser, bordplader og vindueskarme. Her fik vi lov at rode i deres affaldsbunker, og gevinsten viste sig straks: talrige kalkstykker med oliepletter, oftest med direkte relation til oversavede orthoceratitter. Ude i bruddet kunne vi studere fænomenet nærmere,

her skærer stenhuggeriet den rå kalksten op i klodser med en 1 meter stor diamantsavklinge. Processen efterlader en lodret skærevæg i kalkbruddet over to meter høj og op til 50 meter lang i næsten poleret kvalitet, et paradis til studier af sedimentære strukturer i kalkstenen, men også stedet at se olie flyde ud af de netop overskårne orthoceratitfossiler (se figurer).

Hjemme i laboratoriet underkastede vi de indsamlede prøver en nøjere undersøgelse. Det viste sig bl.a., at de olieholdige orthoceratitter var hule, kamrene i skallerne var kun delvist fyldt med kalkspat i modsætning til de helt forkalkede ikke-olieholdige skaller, og de mange fine kalkspatkrystaller med smukke krystalflader inde i kamrene kunne tyde på, at krystalvæksten var blevet stoppet af den indtrængende olie. Men hvor var olien kommet fra, og hvordan var den endt inden i orthoceratitfossilerne?

Orthoceratit med oliefyldte kamre fra Kinnekulle i Sverige.

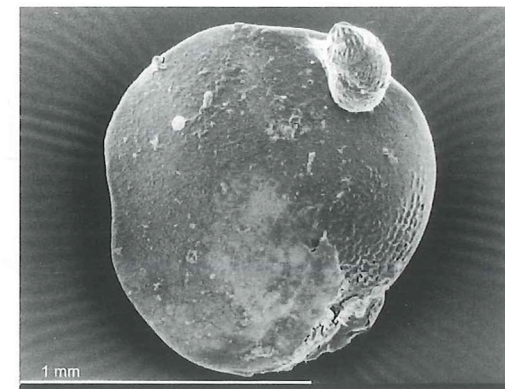


faunaerne, så på nuværende tidspunkt vides det ikke, om nogle af sporene er artsspecifikke, ej heller kendes identiteten af spordannerne og de procentvise forekomster af prædationsspor i forhold til den totale foraminifer population.

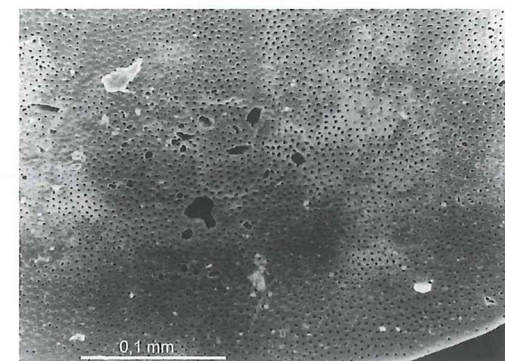
Kun i ganske få tilfælde kendes prædatorens identitet. Et sådant tilfælde er beskrevet af Pamela Hallock i 1994 og 1998 fra studier af nulevende populationer af *Amphistegina gibbosa* fra Florida Keys. Prædatoren af disse bentoniske foraminiferer viste sig at være en anden lille bentonisk foraminifer, *Floresina amphiphaga* (figur 3). Fjernest *F. amphiphaga* fra skallen af *A. gibbosa*, ses en række cirkulære og ovale huller, der gennemtrænger skallen af byttedyret (figur 4).

Uden observationer af disse spor på skallen af *A. gibbosa* er det nok tvivlsomt, om den observerede adfærd af *F. amphiphaga* ville være tolket som prædationsrelateret. Formen af *F. amphiphaga*'s apertur (figur 5) synes imidlertid klart afspejlet i de prædationsspor, som ses på skallen af *A. gibbosa*.

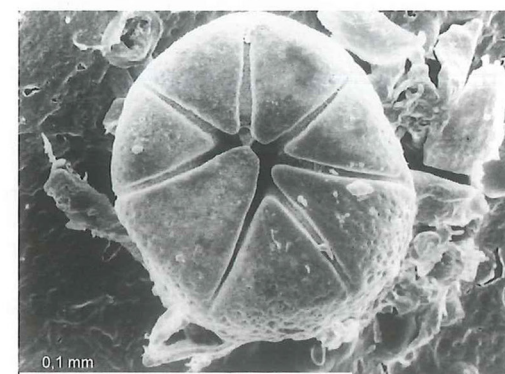
En nærmere undersøgelse af 30-40 eksemplarer af *A. gibbosa* har vist, at der er en stor variation af spor på skallerne i populationen. En mulig forklaring kunne være, at *A. gibbosa* kan forsvare sig mod angreb fra *F. amphiphaga* og derved afbryde dannelsen af sporene, eller også er *F. amphiphaga* ikke den eneste prædator, som er til stede i miljøet. Fundet af et enkelt eksemplar af *Buliminoides williamsonianus* (figur 6) fra samme prøve åbner for den sidste mulig-



Figur 3. *Amphistegina gibbosa* og *Floresina amphiphaga*. *F. amphiphaga* sidder på øverste højre del af skallen.



Figur 4. Nærbillede af spor dannet af *F. amphiphaga*. Bemærk en svag cirkulær ring der indeholder store ovale til cirkulære huller.



Figur 5. Aperturflade af *F. amphiphaga*.

der placerer både bentoniske og planktoniske foraminiferer i den marine fødekæde er vist på side 94.

De sidste 20 års stigende interesse for foraminiferers biologi og økologi har vist, at mange større invertebrater (hvirvelløse dyr) inddrager foraminiferer som en del af deres diæt, og enkelte eksperimenter i lavtvandsmiljøer synes at påvise, at store mængder af en population af bentoniske foraminiferer bliver fortæret af uidentificerede invertebrater. Både marine snegle, søtænder, orme og visse fisk synes i et vist omfang at lade foraminiferer indgå i deres diæt. Observationer af dyr der udelukkende lever af foraminiferer er indtil videre ikke forekommet, men det er absolut muligt disse findes. Direkte observationer og analyser af f.eks. maveindholdet af invertebrater er således en mulig, om end langsom, metode til at forsøge at placere foraminiferer i den marine fødekæde. Disse metoder kan naturligvis kun benyttes i nutidige miljøer og i begrænset omfang.

En metode til delvist at omgå disse problemer er at undersøge foraminiferernes skaller for spor af prædation. Studiet af sporfossiler (ichnologi) har med held været benyttet til at belyse prædationsniveauet inden for grupper af bløddyr som f.eks. muslinger i både nutidige og fossile miljøer. Således er spor som *Oichnus simplex* (figur 1A og figur 2B) tolket som prædationspor.

Det er imidlertid ikke uden problemer at tolke en organismes adfærd ud fra spor alene, idet en organisme kan efterlade sig flere forskellige spor, afhængig af adfærden, og flere organismer kan lave det samme spor ved samme adfærd. Den nævnte sportype er observeret i skaller fra bentoniske foraminiferer og er tilskrevet aktivitet af rovsnegle.

Tilsvarende studier af mulige prædationsspor fundet i skaller fra nutidige foraminiferer har vist en forbavsende morfologisk artsrigdom fra såvel planktoniske som bentoniske former. Det har vist sig, at bioerosion af foraminiferskaller er et globalt forekommende fænomen i mange marine miljøer. Det har ikke været muligt at identificere spordanneren, men den morfologiske artsrigdom af sporene tyder på, at der har været flere spordannerne, hvoraf nogle må formodes at være planktoniske. Størrelsen af prædationssporene på 2-20 µmeter (generelt er sporene i planktoniske former mindre end i bentoniske) synes at udelukke rovsnegle som mulige prædatorer, hvilket ellers hidtil har været antaget. Voksne rovsnegle synes at foretrække organismer med et enkelt kammer frem for flerkamrede organismer, herunder foraminiferer. Det kan naturligvis ikke udelukkes, at yngel af rovsneglene kan være spordannerne.

Et studie af fossile foraminiferer fra øen Rhodos i det Græske Øhav har overraskende vist, at samtlige sportyper som tidligere kun har været observeret i nutidige miljøer, også blev observeret i de fossile former. I de nævnte studier er der ikke foretaget en egentlig økologisk eller taxonomisk analyse af foraminifer-



Olieudsivning fra kalkblok med overskåret orthoceratit, Thorsberg på Kinnekulle. Orthoceratitten er delvist skjult bag olielaget. De vandrette strukturer i blokken er opløsningshorisonter (stylolitter), der muligvis har fungeret som migrationsveje for den indtrængende olie.

Der var kun få spor af olie i den omgivende kalksten, der er grå og massiv, og lagene over og under den orthoceratitførende enhed indeholdt intet olie.

Her var spørgsmål nok at tage fat på, og den ene af os (Mette) besluttede at gå igang med et specialestudium om orthoceratitoliens dannelse og oprindelse. Specialestudiet har været koncentreret om særlige aspekter af oliens sammensætning, de såkaldte biomarkere (se boxen), og vi har fået stor hjælp fra det organisk geokemiske laboratorium på Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelser (GEUS). Analyserne viser, at olien i orthoceratitterne er en rigtig råolie med en sammensætning svarende til f.eks. Nordsøolie, og at olien sandsynligvis stammer fra den underliggende sorte skifer, den såkaldte Alunskifer, der er kendt som en bjergart rig på oliedannende organisk materiale.

For at danne olie skal der som bekendt opfyldes to betingelser: dels bjergarter med rigeligt indhold af sedimentært organisk materiale af algeoprindelse (kildebjergarten), dels opvarmning af bjergarterne til temperaturer over mindst 60 til 80°C. I princippet kender vi to processer til opvarmning af en kildebjergart, indsykning og begravelse på stor dybde eller indtrængning af varme, vulkanske bjergarter. Ved Kinnekulle synes indsykningen at have været meget moderat, Alunskiferen bærer ikke spor af begravelse eller termisk omdannelse og har næppe dannet olie. Derimod udgøres toppen af Kinnekulle jo af en diabas, en op

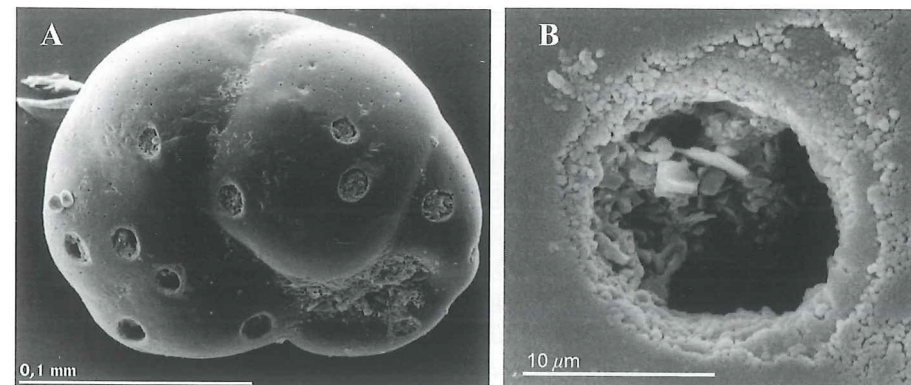
til 30 meter tyk vulkansk bjergart intruderet vandret ind i de nedre palæozoiske bjergarter i begyndelsen af Permtiden.

Lige under diabasen ligger skiferlag fra Silur, tydeligt præget af den kraftige opvarmning, og derfor gode kandidater som kildebjergart for olien. Men biomarkerundersøgelserne viste, at olien i orthoceratitterne har en anden sammensætning end en olie dannet fra de silure skifre. Derfor har vi kun én mulig forklaring tilbage, olien er dannet ved opvarmning af Alunskiferen i andre lokaliteter end dem, vi har studeret. Her er to muligheder, enten har den udbredte vulkanske aktivitet i Kinnekulleområdet ført til lokal opvarmning af Alunskiferen, eventuelt langs de lodrette sprækker der må have fungeret som fødekanaler til de overliggende diabaser. Eller olien er kommet langvejs fra, måske helt fra Norge, hvor store områder med bl.a. Alunskifer blev begravet på stor dybde i forbindelse med den Kaledoniske bjergkædedannelse i slutningen af Silur.

Uanset dannelsessted må olien være migreret under højt tryk gennem sprækker så tynde, at de næppe kan identificeres i dag for til sidst at samles i de få hulrum i kalkstenen. Og her har de delvist luft- eller vandfyldte orthoceratitskaller udgjort nogle af kalkstenens eneste porer. Senere må trykket være aftaget, sprækkerne lukket og olien fanget i de enkelte orthoceratitter. Her har den så været gemt i mindst 250 millioner år, lige til den dag hvor stenhuggerne blotlagde de oliefyldte hulrum.

Uanset dannelseshistorie er det et sammentræf af forbløffende tilfældigheder, at netop orthoceratitterne i Thorsbergområdet har fungeret som opsamlings-reservoir for olie. Vi har ikke fundet spor af olie i andre orthoceratitter i området, og spor af olie er i det hele taget yderst sjældne i regionen. Dette giver jo Thorsberg orthoceratitterne en særlig status, både videnskabeligt og samlermæssigt. Det var da også interessant at se, hvordan de olieholdige orthoceratitter året efter vores første besøg var blevet sat til salg i den lille butik i stenhuggeriet, smukt polerede og lige til at sætte på samlerbordet.

De sidste år har der ved hvert besøg været nydelige stykker til salg, oftest med hele, gennemsavede og polerede orthoceratitter, og til ganske rimelige priser. Så falder læserens vej forbi Kinnekulle og Thorsberg, kan vi da anbefale et besøg, måske kunne man også blive fristet af en bordplade med polerede, 1 meter lange og ganske perfekte orthoceratitter. Det er forøvrigt også her i Thorsberg, at man har fundet de ældste meteoritter i verden, gemt i de ordoviciske kalksten, men det er en anden historie.



Figur 2. A: Bentonisk foraminifer fra nutidigt miljø. B.: Nærbillede af et af sporene på skallen i figur A.

Foraminifererne klassificeres primært efter skallens generelle udseende, kemiske sammensætning, mikro- og krystalstruktur. De kan inddeles i tre hovedtyper: De organisk-skallede, de agglutinerende (de der bygger en skal af sedimentkorn) og de kalkskallede.

Det er bevaringspotentialer af de to sidstnævnte skaltyper samt deres store udbredelse i de fleste fossile marine miljøer, der gør, at foraminiferer er en af de mest undersøgte fossile dyregrupper. Desværre gør dette forhold sig ikke gældende med hensyn til de nulevende foraminiferers biologi og økologi. Uvist af hvilken grund har det i historisk perspektiv primært været geologer, der har beskæftiget sig med denne gruppe, hvilket formodentlig er en del af forklaringen, men også dyrets størrelse har besværliggjort eksperimenter og observationer i foraminiferernes naturlige miljø. Langt den overvejende del af foraminiferer er i størrelsesordenen mellem 80-1.100 μmeter og (1.000 μmeter er lig med 1 millimeter).

Skallerne af enkelte fossile og nulevende arter kan dog nå den enorme størrelse af mellem 10 og 15 centimeter, hvilket gør dem til de største encellede organismer, der kendes. Forsøg på at studere foraminiferer i laboratorier har indtil videre kun haft begrænset succes. Det skønnes, at den fulde livscyklus er observeret for mindre end 20 nulevende arter og ingen af disse er planktoniske.

Det at placere foraminiferer i den marine føde kæde er ikke uden problemer, men må betragtes som værende yderst relevant, da disse repræsenterer et enormt fødepotentiale. I områder på kontinentalsoklen er der målt op til 2,5 millioner levende individer per kvadratmeter havbund. Målinger foretaget i dybhavet har vist, at bidraget fra bentoniske foraminiferer til den totale biomasse langt overstiger bidraget fra samtlige andre tilstedeværende dyregrupper.

Traditionelt har fødekæden været betragtet som bestående af forholdsvis få led. Dette har vist sig at være en noget simplificeret opfattelse. En teoretisk model,

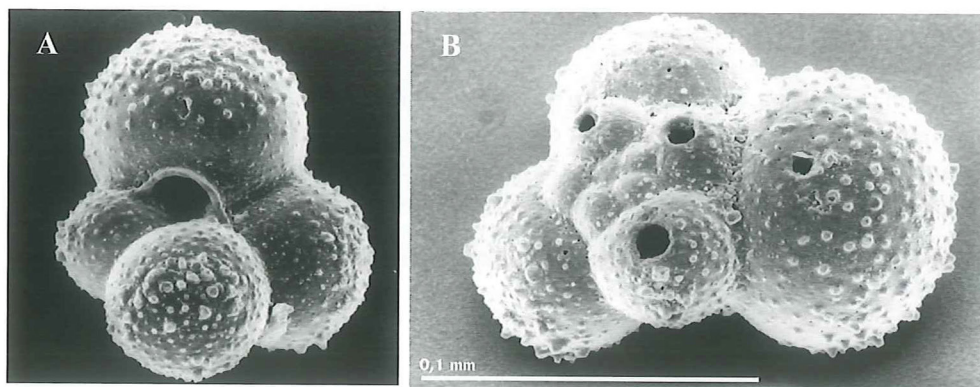
FORAMINIFERER OG SPORFOSSILER

SPOR EFTER UKENDTE ROVDYR

Kurt Søren Svensson Nielsen

Begrebet prædator er normalt forbeholdt rovdyr, dvs. dyr der overvejende ernærer sig af animalsk protein (kød), modsat planteædere. I det efterfølgende er begrebet dog brugt mere bredt, idet man er prædator af foraminiferer, hvis man ernærer sig helt eller delvist af foraminiferer, uanset om dette gøres passivt eller aktivt. Mange marine dyr, der ernærer sig som sedimentædere, bliver som følge heraf prædatorer af foraminiferer, idet sedimentet, som de fortærer, indeholder levende foraminiferer, som må formodes at dø under passagen gennem organismens tarmkanal. Et eksempel på denne type organisme kunne være sømusen. Det er ikke undersøgt, om sømusen er i stand til at udnytte 'kødet' fra foraminifererne som føde eller udelukkende lever af det organiske materiale, som findes i sedimentet.

Foraminifererne er en marin dyregruppe, der er nært beslægtet med amøber. Foraminiferida, som betyder 'den der bærer et hul', er kendt fra alle nutidige marine miljøer og er en encellet og skalbærende gruppe, som kendes helt tilbage fra Kambrium. Fordelt på 12 undergrupper kendes mere end 40-50.000 forskellige arter, hvoraf ca. 4.000 er nulevende. Ud af disse 4.000 nulevende arter er de 42 planktoniske (frit svævende i vandmasserne, figur 1A og B), mens resten er bentoniske (levende på eller i havbunden, figur 2A og B).

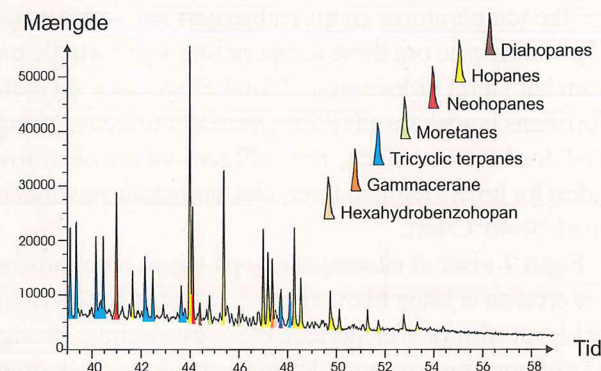


Figur 1. A: Forsiden (apertursiden) af fossil planktonisk foraminifer fra Rhodos
B: Bagsiden (spiralsiden) af samme foraminifer. Bemærk de runde spor, der tydeligvis er relateret til de enkelte kamre. Målestok nederst i billedet.

Biomarkers

Biologiske markører eller 'biomarkers' er komplekse organiske molekyler, der er fundet i olie og i organisk materiale i sedimentære bjergarter. Molekylernes strukturelle opbygning er blevet bevaret, og de kan derfor føres tilbage til det biologiske materiale, hvorfra de stammer.

Der findes en bred variation af biomarkers, men de to vigtigste grupper, der bruges i olieeftersforskning, er steraner og hopaner. Steraner stammer fra steroler, som er almindelige i de fleste planter og dyr. Hopaner stammer fra triterpenoider, som er fundet i mange bakterier.



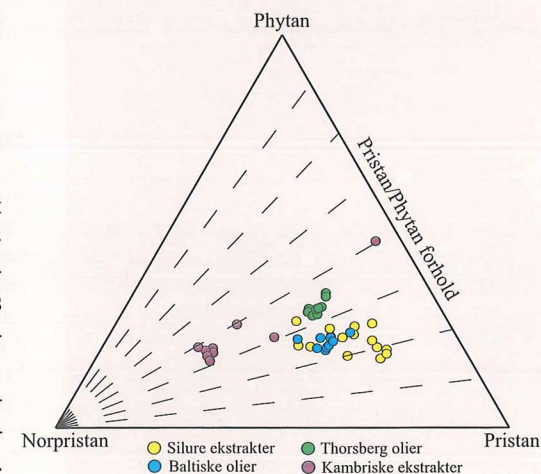
Ændringen af de oprindelige biologiske molekyler til

'geologiske' molekyler sker under begravelse af det organiske materiale. Herved mistes funktionelle grupper som f.eks. hydrogen og oxygen, og kulstof-dobbeltbindingerne bliver reduceret, så der dannes mættede kulbrinter. Antallet af kulstofatomer ændrer sig som regel ikke, og molekylet vil derfor fremstå næsten som det oprindelige biologiske molekyle.

Fordelingen af biomarkers i en olie eller kildebjergart er specifik for det organiske materiale, der er bevaret, og således udviser de deres helt eget fingeraftryk. Biomarkerfordelingen kan derfor bruges i olieeftersforskning til bl.a. at sammenligne olie med mulige kildebjergarter. F.eks. kan steranerne C27-C28-C29 (C27 betyder et molekyle med 27 kulstof-atomer) bruges til at gruppere olier fra forskellige aflejringsmiljøer (figur 1).

Biomarkers analyseres normalt ved hjælp af kombineret gaskromatografi-massespektroskopi (GC-MS), hvormed der kan optages karakteristiske spektre af biomarkerfordelingen (figur 2).

Den relative mængde af de forskellige molekylioner måles på et stigende masse/ladnings forhold (m/z).



PÅ SPORET AF JORDENS FORTID

Kirsten Hansen

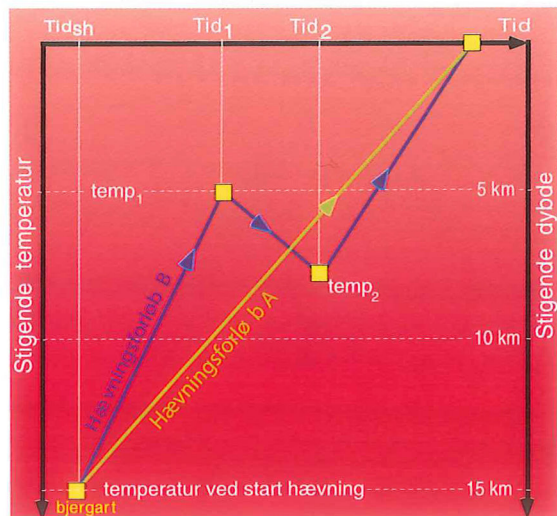
Det er i dag muligt ved forskellige metoder til aldersbestemmelse at finde ud af, hvilke temperaturer en given bjergart har været udsat for i løbet af sin historie. Oplysningerne om disse temperaturer kan fortælle om de geologiske processer, som har været virksomme til forskellige tider, og dette kan 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

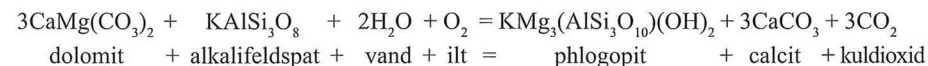
Østgrønland ført til ny viden om den



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 indrykningsperiode (Tid₁ - Tid₂), hvor bjergarten bringes på større dybde og får øget sin temperatur fra temp₁ til temp₂. Indrykningsperioden kan påvises ud fra dateringer af bjergarten.

alkalifeldspat med lidt nefelin, amfibol og apatit. De phlogopittrige linser består af phlogopit, amfibol, apatit og calcit. Den kemiske forskel på de to bjergarter er bl.a., at nefelinsyenit er betydeligt fattigere på grundstofferne magnesium (Mg), calcium (Ca), jern (Fe), titan (Ti), fosfor (P) samt kuldioxid og vand og rigere på silicium (Si), aluminium (Al) og natrium (Na).

En simpel model til at forklare dannelsen af phlogopit er at lade smeltet dolomit reagere med alkalifeldspat:



I denne enkle reaktion er der kun behov for den karbonatittiske smelte og vand, men en mere detaljeret model kræves også, at fluiden afsætter jern, titan og fosfor og fjerner natrium, aluminium og silicium til udfældning af natriumfeldspat (albit) andetsteds.

Tilførsel af materiale medfører, at bjergartens volumen ekspanderer. Dannelsen af revner og sprækker ved bjergartens ekspansion sætter spørgsmål ved, hvorvidt den phlogopittrige bjergart i virkeligheden er en sprækkeudfyldning eller et omdannelsesprodukt af nefelinsyenitten. Den gradvise overgang mellem de to bjergarter samt optiske undersøgelser viser dog, at nefelinsyenittens alkalifeldspat er delvist omdannet og stedvist overvokset af phlogopit og amfibol, ligesom der er en smule karbonat.

Den nævnte gradvise overgang og eksistensen af de samme mineraler, blot i forskellige mængder, i de to bjergarter vidner om, at den phlogopittrige bjergart ikke er en simpel sprækkeudfyldning, men er produktet af reaktion med værtsbjergarten.

Undersøgelser af karbonatits reaktion med nefelinsyenit på Brava angiver karakteren af de opløsninger (fluider), som karbonatitten har afgivet. I modsætning til den klassiske fenitisering, som f.eks. omdannelsen af Bushveld granitten i Sydafrika, er feniteringen på Brava domineret af dolomittiske fremfor natriumkarbonatrige fluidier. Dette er en vigtig konklusion, idet karbonatitten på Brava og de andre Kap Verde Øer tilsyneladende ikke har mistet en kemisk komponent, som ikke er repræsenteret af selve karbonatitten. Sammensætningen af karbonatitten kan derfor tages om en god tilnærmelse til det oprindelige magmas sammensætning.



Figur 4. Phlogopitlinsens mørke farve danner en markant kontrast til den delvist omdannede silikatbjergarts næsten hvide farve.

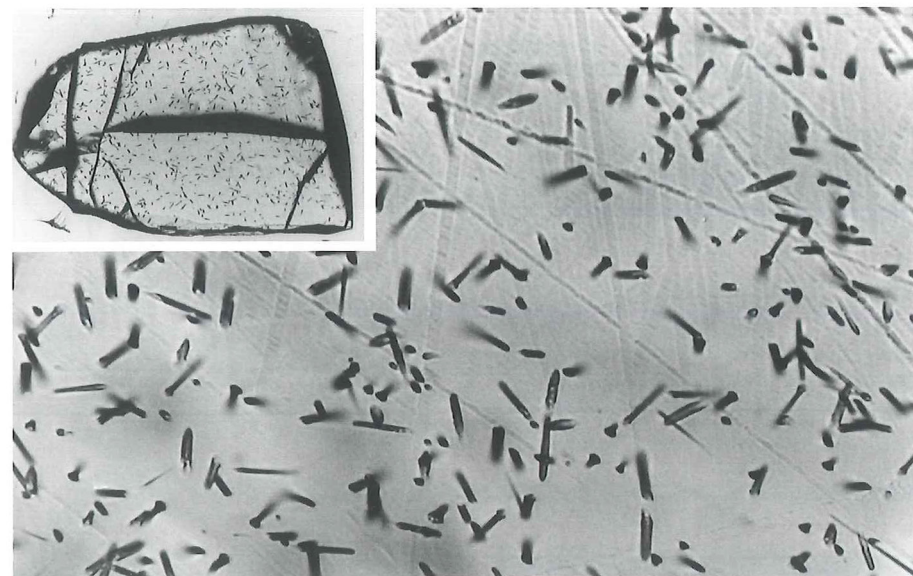
Den gradvise overgang mellem de to bjergarter og eksistensen af phlogopit og karbonater i den delvist omdannede nefelinsyenit er feltdokumentation for intrusionen af karbonatitrelaterede opløsninger i en værtsbjergart domineret af silikatminerale.

Fenitisering og dannelsen af phlogopittrige linser

Under krystallisationen af karbonatit opkoncentreres vand samt grundstoffer, der ikke indgår i karbonatminerale. Denne blanding af vand, karbonatitmelte og diverse grundstoffer er en overophedet og ustabil kombination af damp og væske, en fluid, der er meget mobil og stærkt reaktiv. Den varme fluid kan helt eller delvist opsmelte kontaktbjergarter, specielt hvis disse er krystalliseret ved relativt lave temperaturer.

Nefelinsyenit på Kap Verde er primært dannet ved størkning af smelter, der har gennemgået mfattende krystallisation og afkøling. De er således dannet ved de laveste magmatiske temperaturer (~600 til 800°C).

Introduktion af fluider fra karbonatitten menes her at have dannet de phlogopittrige linser ved at reagere med nefelinsyenitten. Nefelinsyenit, der ikke er omdannet, ses også på Brava og andre Kap Verde Øer og består hovedsageligt af

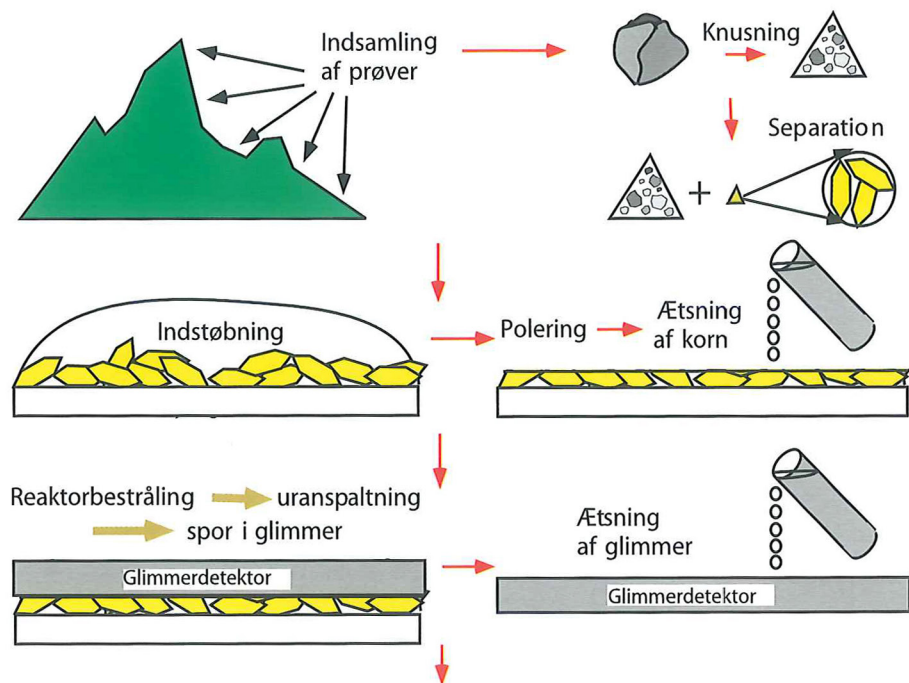


Figur 2. Ætsede fissionsspor i apatit.

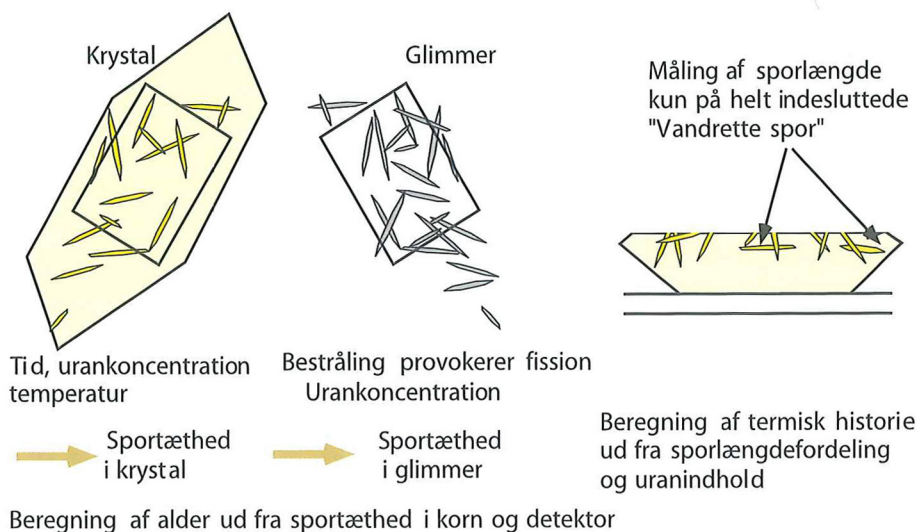
østgrønlandske kontinentrands temperaturudvikling. I Skandinavien er der gennemført en række fissionssporsanalyser af forskellige laboratorier, bl. a. har fissionssporslaboratoriet på Københavns Universitet gennemført et studium i det centrale Sydnorge (Evjeområdet).

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.

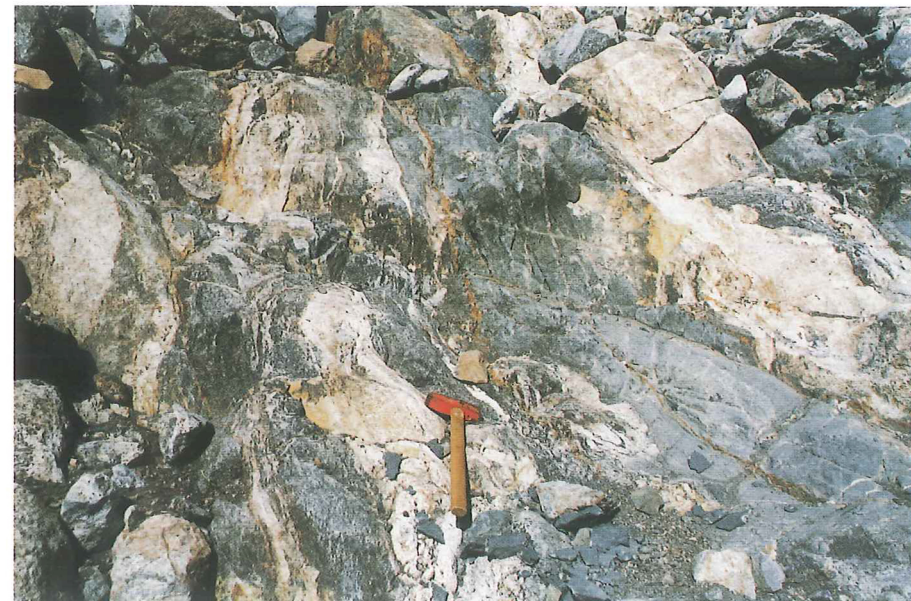
Alle spor i et materiale dannes lige lange, men længden afhænger af materialet. For mineralet apatit er dannelseslængden f.eks. omkring 16 μmeter . Sporene kan kun bevares under en temperatur, som er karakteristisk for materialet. Ved temperaturer, hvor spor kan bevares, sker der dog en afkortning af 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 fremtætsede spor krydser overfladen i alle retninger



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



Figur 3. En blotning af lava intruderet af karbonatit, der stedvist har reageret med lavaen og givet denne et spættet udseende.

Ofte ses de silikatlavaer, som karbonatitgangene intruderer, at være omdannet af fine karbonatitårer. Ligeledes er det almindeligt at se kvadratmeter store arealer af silikatbjergart, hvor karbonatit er trængt ind med voldsom kraft og har omdannet værtsbjergarten til et let pulveriserende materiale med calcitaggregater og sekundære mineraler (figur 3). Den meget tyndtflydende og højmobile karbonatitvæske strømmer gennem fine sprækker på vej til overfladen og eksploderer ud i den omkringliggende bjergart.

På de sydlige øer er større volumener karbonatit blottet i plutoniske komplekser, hvilket giver en mere veldefineret fenitisering. Figur 4 viser et stort intrusivt kompleks på den sydvestligste af de Kap Verdiske Øer, Brava. På billedet ses et aflangt irregulært linseformet parti, der mineralogisk er domineret af phlogopit. Værtsbjergarten er nefelinsyenit. Plutonisk karbonatit er blottet i den nedre del af komplekset. Den phlogopitrige linse er interessant ved, at den repræsenterer komponenter af karbonatitten, som ikke ses i gangene vist i figur 2 og 3.

Når man går rundt på blotningen, observerer man en gradvis overgang fra rene phlogopitpartier til nefelinsyenit. I mikroskop ses nefelinsyenittens alkalifeldspat at være under omdannelse, og ind imellem er der korn af phlogopit og calcit. Den meget phlogopitrige bjergart består af phlogopit, grøn amfibol, rekrystalliseret alkalifeldspat, calcit, titanit og apatit.

afgives fra karbonatitten er meget stor, og at den oprindelige karbonatits sammensætning varierer.

Den egentlige smeltesammensætning af karbonatit må derfor findes ved at erkende, hvilke kemiske komponenter der er afgivet ved reaktion med og omdannelse af værtsbjergarten og lægge disse til sammensætningen af den karbonatbjergart, man finder. Eksemplet fra Brava på Kap Verde Øerne, der beskrives nedenfor, illustrerer en reaktion, der hovedsagelig foregår ved tilskud af dolomittisk væske og vand.

Økonomisk interesse

Karbonatit og relaterede bjergarter - fenitter - kan være ekstremt berigede på grundstoffer, som har økonomisk interesse, navnlig fosfor, niobium og de sjældne jordarter. Uheldigvis for den Kap Verdiske regering er mængden af karbonatit på øerne og koncentrationerne af de nævnte grundstoffer såpas små, at karbonatit næppe er værd at bryde her.



Feltforhold

På de nordlige Kap Verde Øer findes karbonatit som 0,2-3 meter tykke gange, der skærer sig gennem det ufrugtbare og eroderede vulkanske landskab (figur 2). Gangene er oftest rene dolomitforekomster med mineraler som phlogopit, magnetit og pyroclor i mindre mængde. Overfladen af gangene forvitrer relativt nemt og giver gangen et brunt og støvet udseende, men slår man en skærv af, afslører materialet en frisk blålig farve.

Figur 2. En ca. 1,5 meter bred gang af dolomittisk karbonatit på øen Maio. Gangens overflade er forvitret til en rustbrun farve, men den afslåede flade viser, at bjergarten er helt frisk umiddelbart under forvitringsfladen.

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 ætzes 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.

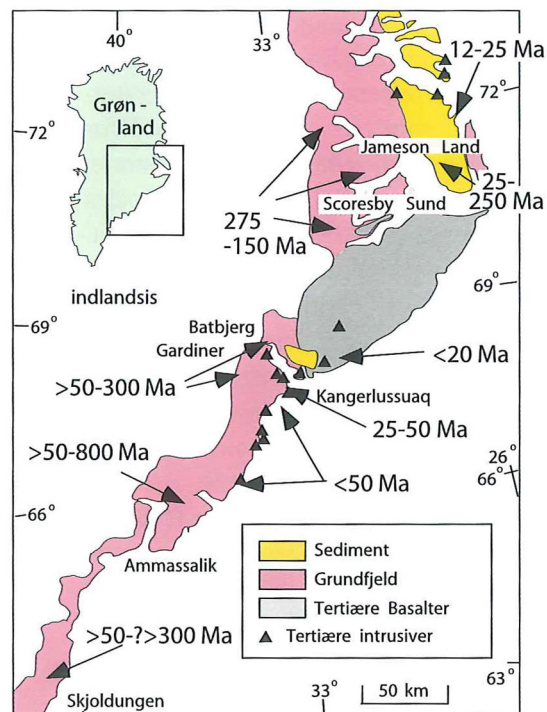
Olie- og gasdannelse foregår ved temperaturer, som nøje svarer til det temperaturområde, hvor sporene i apatit er mest følsomme, hvilket har betydet en stor interesse for udviklingen af metoden til brug ved olieefterforskning. Metoden har også store muligheder ved studier bl.a. af lodrette bevægelser 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.

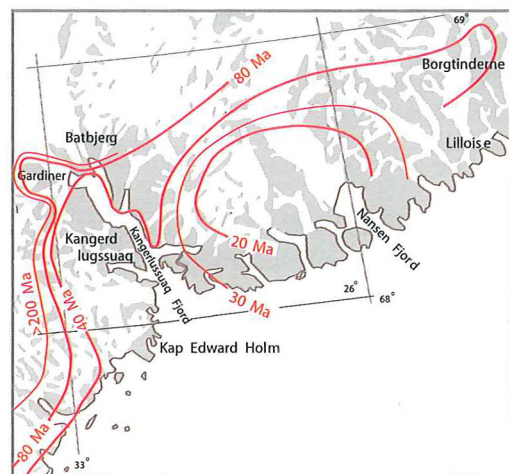
Østgrønland

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 fissionssporsaldre 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 kendskab 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-

Snart viste smelteforsøg, at silikat- og karbonatsmelter af typen, der erupterede fra Lengai, ikke blandes, når de dannes under lavt tryk. Det gav anledning til at postulere, at karbonatit dannes fra en silikatsmelte, der bevæger sig fra høje mod lave tryk i skorpen. Andre postulerede, at et karbonatrigt silikatmagma under en krystallisationsproces, hvor tidligt dannede mineraler fjernes fra smelten (fraktioneret krystallisation), herved kunne beriges på karbonater og andre grundstoffer, og at den fraktionerede krystallisation således var baggrund for dannelsen af karbonatit.

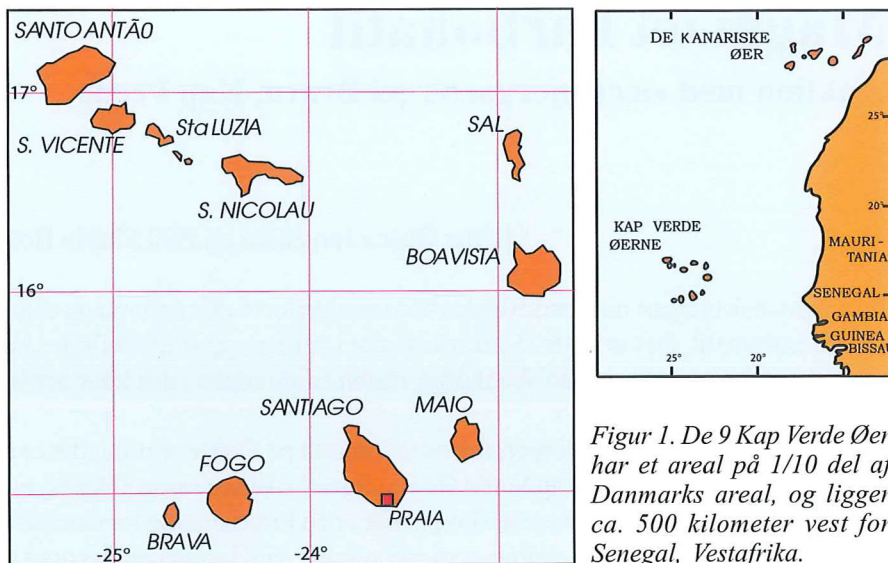
I dag er der geologer, der mener, at den særprægede karbonatit fra Oldoinyo Lengai er dannet ved fraktioneret krystallisation af en mere almindelig karbonatit, der kommer fra den nedre lithosfære. Uantastet udfaldet af Lengai diskussionen peger en voksende datamængde på, at karbonatit også dannes ved selvstændige smeltebegivenheder i kappen og den nedre lithosfære. Karbonatit på Kap Verde er dannet ved delvis opsmeltning i den øvre kappe.

Forekomstmåde

Karbonatit forekommer som lavaer og løse udbrudsprodukter, som gange eller oftere som en serie ringformede legemer (intrusioner). De plutoniske ringformede intrusioner varierer typisk mellem at bestå overvejende af mineralerne calcit (CaCO_3) eller dolomit ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$).

Meget karbonatit intruderer almindelige skorpebjergarter. Mange steder, hvor karbonatit forekommer, ses dog en række andre sjældne bjergarter, der menes at være dannet i forbindelse med karbonatitten. Disse bjergarter er f.eks. ijolit (bestående af mineralerne clinopyroxen og nefelin), glimmerit (hovedsageligt glimmermineralet phlogopit), nefelinsyenit (alkalifeldspat og nefelin), foskorit (serpentiniseret olivin, apatit og magnetit) og pyroxenit (clinopyroxen). I nogle tilfælde er der overbevisende dokumentation for en genetisk sammenhæng mellem karbonatit og de nævnte sjældne bjergarter. F. eks. menes nogle ijolitter og nefelinsyenitter i Sydafrika at være remobilisering af henholdsvis gabbro og granit fra den kendte Bushveld intrusion med introduktion af navnlig natrium fra karbonatitmagmaet. I dette tilfælde betyder det, at karbonatitten oprindeligt var mere natriumrig, men mistede dette grundstof ved reaktion med de bjergarter, den intruderede.

Omdannelsen af karbonatits værtsbjergarter går under den generelle betegnelse fenitisering efter typelokaliteten Fen i Norge, og er meget almindelig. Fenitisering er et interessant fænomen, fordi der i forbindelse med omdannelsen sker et tilskud af grundstoffer til værtsbjergarten. Grundstoffer der derved afgives og forsvinder fra karbonatitten. Karbonatit består ofte næsten udelukkende af kun ét mineral (calcit eller dolomit), fenit derimod er kemisk ekstremt variabel, selv hvor værtsbjergarten er den samme. Det betyder at variationen af grundstoffer, der

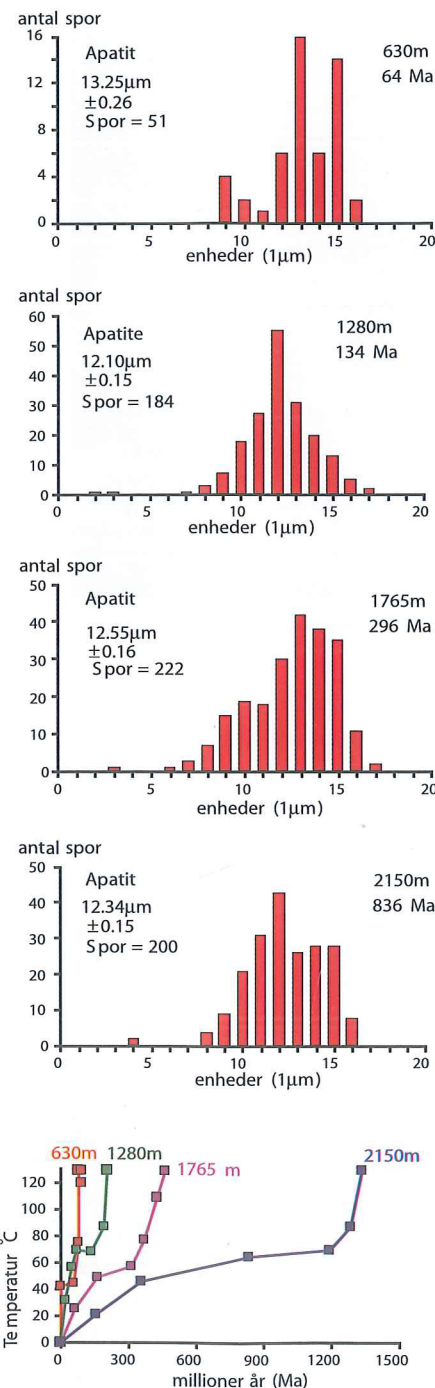


Figur 1. De 9 Kap Verde Øer har et areal på 1/10 del af Danmarks areal, og ligger ca. 500 kilometer vest for Senegal, Vestafrika.

Studier af karbonatit på Kap Verde er gunstige ved, at magmaet her er passeret gennem den relativt tynde oceaniske skorpe og derfor er meget tættere på den oprindelige sammensætning end karbonatitter, som er passeret gennem den langt tykkere kontinentale skorpe.

Dannelsen af karbonatit diskuteres i den ældre litteratur ved de mest eksotiske og forskelligartede processer. Da karbonatit er en uhyre sjælden bjergart, der udgør en forsvindende del af Jordens magmatiske bjergarter, har mængden af forskning været meget mindre end forskning i 'almindelige' magmatiske silikatbjergarter. Ikke desto mindre har dannelsen af karbonatit ført til en ophedet og vedvarende diskussion, der nu i høj grad er polariseret i to forskellige tanke-retninger. Nogle mener, at karbonatit er afledt af silikatsmelter. Andre foreslår, at karbonatit også opstår ved selvstændige smelteprocesser i Jordens kappe. Blandt moderne afhandlinger om karbonatitgenese (-dannelse) af individuelle forekomster findes overbevisende eksempler på begge typer dannelse, og resultatet bliver vel en konstatering af, at mere end én proces leder til karbonatit.

I første halvdel af det 20. århundrede studerede feltgeologer over besynderlige karbonatrige bjergarter, der i mange tilfælde havde tydelige magmatiske træk. Dengang gik forskningen i andre retninger, så teorier om karbonatiternes dannelse strandede i en konsensus om, at de var dannet ved delvis opsmeltning af skorpen. Debatten tog først en anden retning i 1960'erne, da verdens eneste aktive karbonatitvulkan, Oldoinyo Lengai i den østafrikanske riftzone, gik i udbrud og lod bomber, aske og glødende lava eruptere. Dette satte også ild i forskning og teorier.



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 fissions-sporsalder (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 opspækning 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 er 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 sporlængdefordeling 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

Magmaet karbonatit

reaktion med værtsbjergarter på Brava, Kap Verde

Jesper Øksne Jørgensen og Paul Martin Holm

En magmatisk bjergart med end 50% karbonatminerale (f.eks. dolomit og calcit) kaldes karbonatit. Der er godt 350 forekomster i verden, og af disse findes kun to i forbindelse med den oceaniske skorpe, resten er intruderet i den kontinentale skorpe.

I forbindelse med oceanskorpen findes karbonatit på Fuerteventura, der er en af de Kanariske Øer, og på Kap Verde Øerne (figur 1). Eksistensen af karbonatit i oceanskorpen viser, at kontinental skorpe ikke er en forudsætning for dannelsen af karbonatit. Den oceaniske skorpe er meget tyndere end kontinental skorpe og reaktion mellem magma og skorpe vil derfor have en ringe indflydelse på magmaets sammensætning, da magmaet kun kan reagere med skorpen i kort tid. De oceaniske karbonatitter giver derfor en mere direkte indsigt i dannelsen af denne type magma end de kontinentale forekomster.

Interessen for magmaers kemiske sammensætning, når de dannes i kappen, er af fundamental betydning for geovidenskaben. Når et magma dannes i kappen ved delvis opsmeltning af kappeminerale, vil magmaet have en anden kemisk sammensætning end kappen. Dette skyldes, at nogle grundstoffer passer dårligt ind i de eksisterende kappemineralers krystalgitter, hvorfor de hurtigere vil bevæge sig ud i smelten end de grundstoffer, der sidder fast bundet i krystalgitterne. Delvis opsmeltning af kappeminerale ændrer kappens sammensætning, idet smelten opkoncentrerer nogle grundstoffer. Smelten med de koncentrerede grundstoffer stiger derefter opad som følge af smeltens lavere massefylde, og de opkoncentrerede grundstoffer forsvinder således fra kappen. Denne proces har været aktiv i hele Jordens historie og har ændret dele af kappens sammensætning dramatisk. Studier af Jordens historie kræver derfor en indsigt i kappedannede magmaers sammensætning (den primære sammensætning) på forskellige tidspunkter.

Den mest direkte adgang til at studere magmaers primære sammensætning fås ved at se på magmaer, som er kommet hurtigt op på Jordens overflade og er størknet der. Den hurtige opstigning minimerer processer knyttet til afkøling af smelten og dannelse af krystaller, som ændrer magmaets kemi. Samlet betyder det, at et sådant magma vil have omtrent samme kemiske sammensætning, når det når overfladen, som da det blev dannet i kappen ved delvis opsmeltning.

og hævnning, som førte til dannelse af den post-kaledone 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 kontinentsskorpen 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



Figur 8. Stauings 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 Stauings 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 temperaturmønstret 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 sedimenter (<65 millioner år gamle), der er bevaret i den centrale del af Jameson Land bassinet, 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.

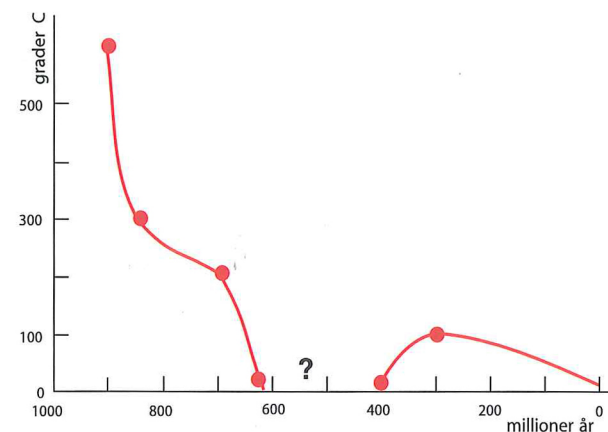
Undersøgelser af væske-gas indeslutninger i bjergarterne viser samtidig, at dybden på det tidspunkt var 4-5 kilometer. Dette betyder at temperaturstigningen med dybden var på ca. 50°C/km. Fissionssporsresultater, resultater fra væske-gas indeslutninger samt K/Ar- og Rb/Sr-isotopdatering gør det sandsynligt,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

området undergik en hurtig hævning 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-kaledonsk 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 det 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 hævning og erosion af et tykt basaltdække indenfor de sidste ca. 10 millioner år. Hævningshastigheden er øget i forbindelse med den tertiære kontinentopsprækning 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