

VARV

NR. 2

BLADET MED DE ÆLDSTE NYHEDER

2000



HVAD SKER DER UNDER ISLAND?

ÆDLE KORALLER

GRØNLAND OG JORDENS TIDLIGSTE HISTORIE

ISSN 0105 - 6301

01-08-2000

Forsidebillede: *Landmannalaugar: Resterne af den tidligere centralvulkan udgør ca. 200 km² rhyolitiske og kvarts-tholeiitiske lavaer. Foto: K Breddam*

Forfattere til artiklerne i dette nummer kan kontaktes på følgende adresser:

Kresten Breddam, Dansk Litosfære Center, Øster Voldgade 10, 1350 Kbh. K.

Ulla Asgaard, Geologisk Institut, Østervoldgade 10 1350 Kbh. K

Minik Rosing, Geologisk Museum, Østervoldgade 5-7, 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 Foug, 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. Serigrافي & Offset.

VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 120 kr i abonnement for 2000 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.

DEN ISLANDSKE KAPPEDIPIR

Kresten Breddam

Jorden er i store træk opbygget af kernen, kappen og skorpen. Skorpen og den yderste del af kappen udgør tilsammen Jordens yderste stive del: Lithosfæren (sfæren af sten), der består af et antal større og mindre plader, hvis tykkelse varierer mellem kontinenter (100-200 kilometer) og oceaner (5-100 kilometer). Lithosfærepladerne ligger ikke fast i forhold til hinanden, men bevæger sig i forskellige retninger, hvorved der opstår spredningszoner og sammenstødszoner. Dette er muligt, idet der umiddelbart under lithosfæren findes et relativt blødt lag, der når ned i omkring 250 kilometers dybde: asthenosfæren (sfæren uden styrke).

Asthenosfæren er karakteriseret ved lave hastigheder for jordskælvsbølger, hvilket indikerer, at der er en vis mængde smelte tilstede. Den kan deformeres og er muligvis karakteriseret ved store konvektionsstrømme. Asthenosfærisk kappemateriale strømmer op i spredningszonerne, langs hvilke lithosfærepladerne typisk glider fra hinanden med 2-20 centimeter om året (total spredningsrate). Herved dannes ny oceanbundsskorpe og lithosfærisk kappe. Omvendt synker oceanisk skorpe/lithosfære ofte ind i asthenosfæren langs sammenstødszonerne (f.eks.: Andesbjergene, Japan, Filipinerne, Aleuterne).

Størstedelen af Jordens vulkanisme foregår langs disse sprednings- eller sammenstødszoner. Ved spredningszonerne dannes der smelte som følge af, at det opstrømmende kappemateriale udsættes for et stadig lavere tryk. Kappemateriale kan eksistere i fast form ved meget høje temperaturer (1.400°C), når blot trykket også er højt (80 kbar=270 kilometer), men flyttes det op til et lavere tryk f.eks. 20 kbar (=100 kilometer) uden tilsvarende temperaturfald, begynder det at smelte. Populært sagt er der ikke plads til at smelte, når trykket er højt. Det virker derfor som et paradoks, når der også dannes smelte i sammenstødszonerne, hvor de indsynkende lithosfæreplader udsættes for øget tryk fra den omgivende kappe.

Smeltedannelsen skyldes imidlertid, at den indsynkende lithosfæreplade afgiver vand til den omgivende asthenosfære, hvis smeltepunkt dermed nedsættes - eventuelt i en grad så smeltedannelse finder sted. Det er altså ikke lithosfærepladen selv, der smelter.

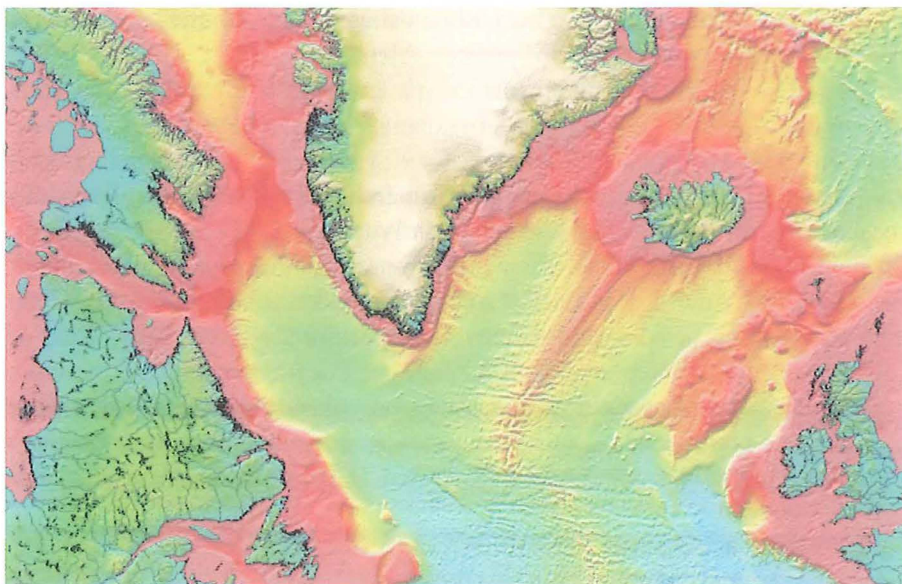
En mindre del af Jordens vulkanisme foregår i såkaldte hotspots, der optræder lokalt inde midt på lithosfærepladerne (kontinentale og oceaniske), eller mellem dem. De største hotspots, som Hawaii og Island, er præget af hyppig vulkansk

aktivitet. Det antages, at kappen nedenunder er meget varmere end den omgivende, hvorfor man taler om en 'termal anomali'. Denne situation er ustabil: Det varmere og derfor lettere kappemateriale søger opad i forhold til det relativt kolde og tunge.

En lokal zone af opstrømmende varmt kappemateriale kaldes en 'kappediapir' eller 'mantle plume'. Denne har gerne form som en cylinder, her kaldet diapirstammen, i modsætning til det dråbeformede diapirhoved, der vælter op gennem kappen ved diapirens begyndelse. I diapirstammen er opstrømnings-hastigheden størst ved midteraksen og falder udefter. I kappediapirer er altså både opstrømning og den relativt høje temperatur medvirkende til en høj grad af magmadannelse under de centrale dele af hotspots.

Magmadannelse i kappen beskrives noget kryptisk som geotermens overskridelse af solidus-temperaturen. Geotermen er temperaturprofilen ind gennem jorden under en given position på overfladen og varierer fra sted til sted. Kappens solidus-temperatur er et andet temperaturprofil, der angiver ved hvilken temperatur smeltedannelse finder sted i en given dybde. Solidus-temperaturen er ikke konstant, men stiger med dybden. Under visse omstændigheder krydser disse profiler hinanden - kappematerialets temperatur er højere en solidus-temperaturen i den givne dybde - og opsmeltning finder sted.

I de senere afsnit omtales både en tør og en 'våd' (hydrøs) solidus. Dette refererer til, at solidus-temperaturen er forøget i tørt kappemateriale i forhold til



Figur 1. Island og den Midt-Atlantiske oceanryg.

vandmættet kappemateriale. Ved at tilføre vand kan solidus-temperaturen altså reduceres til et punkt, hvor den måske overskrider geotermen. Ved omvendt at bortskaffe vand forøges solidus-temperaturen, hvorved mere omfattende opsmeltning forhindres eller forsinkes.

Island

Island er et af Jordens mest aktive hotspots. Aktiv vulkanisme og hyppige jordskælv præger øen i en 400 kilometer lang riftzone, der er Jordens længste midt-ocean spredningszone over havets overflade. Island er således beliggende på grænsen mellem to lithosfæreplader, der glider fra hinanden; i dette tilfælde den Midt-Atlantiske oceanryg, langs hvilken ny jordskorpe dannes kontinuerligt i hele Atlanterhavets udstrækning (figur 1). Den totale spredningsrate ved Island er lige knap 2 centimeter per år.

Spredningen betyder, at den vulkanske aktivitet i riftzonen kommer til udtryk som sprækkeudbrud eller blotlagte vulkanske udbrud under sidste istids iskappe (figur 2). Den del af Island, der ligger vest for riftzonen, bevæger sig i retning VNV med knap 1 cm om året og den del, der ligger øst for riftzonen, bevæger sig diamentralt modsat med samme fart. Dette er i sig selv nok til at forårsage smeltedannelse, idet kappemateriale passivt flyder op mod et lavere tryk og smelter imellem de to lithosfæreplader, efterhånden som de glider fra hinanden. Det forklarer imidlertid ikke, hvorfor smeltedannelsesraten er langt højere ved Island end ved resten af den Midt-Atlantiske oceanryg, eller hvorfor havbunden her befinder sig i et niveau adskillige kilometer højere end normalt. Den generelle opfattelse er, at Island er en manifestation af det dybtliggende fænomen, der ovenfor er kaldt en kappediapir. Jules Verne ramte således ikke helt ved siden af (figur 3): Island er et godt sted at starte, hvis man vil studere jordens indre. Dimensionerne af denne kappediapir er i øjeblikket ét af Dansk Lithosfærecenters indsatsområder og er emnet for denne artikel.

Den islandske kappediapir

På baggrund af en række seismologiske og kemiske observationer er det almindeligvis antaget, at kappen under Island er relativt varm og strømmer aktivt opad, snarere end at flyde passivt op mellem lithosfærepladerne, som den gør langs størstedelen af den Midt-Atlantiske oceanryg. For eksempel er den islandske oceanskorpe usædvanligt tyk (30-35 kilometer imod normalt 7-8 kilometer), hvorfor smeltedannelsesraten, der er en funktion af temperaturen og opstrømningsraten, antageligvis er usædvanlig høj. Endvidere forsinkes seismiske bølger i en tilnærmelsesvis cylindrisk zone under det sydøstlige Island, hvilket antyder, at den lokale øvre kappe er relativt varm.



Figur 2. Den Nordlige Riftzone. Udsigt fra Kverkfjöll central vulkan til Herdubreid table mountain. Orienteringen af den vulkanske ryg til højre i billedet er parallel med riftzonens generelle orientering.

Endelig er sporelement- og isotop-sammensætningen af islandske basalter meget varieret og afviger i mange tilfælde fra normale midt-oceanryg basalter (MORB). Dette afspejler ikke blot varierende opsmeltningforløb, inklusive opsmeltning på meget stor dybde, men også at kilden har en eller flere karakteristiske sammensætninger, der adskiller sig fra sammensætningen af den øvre kappe generelt.

De kemiske karaktertræk, der normalt associeres med den islandske hotspot, kan spores langs mere end 2.000 kilometer af den Midt-Atlantiske Ryg - dvs. langt videre en den termale (seismologiske) anomali. Dette afspejler formentligt radierende udbredelse af smelteforarmet diapirmateriale langs undersiden af lithosfæren. Kappediapirens vandrette dimensioner kan således ikke umiddelbart afgøres på baggrund af kemiske observationer.

Numeriske modeller (computerberegninger) arbejder med både en smal og en bred diapirstamme. Den brede model (600 kilometer i diameter) opererer med en relativt lav temperatur og producerer de korrekte skorpe tykkelser, men stemmer ikke overens med de geokemiske og seismologiske observationer. Den smalle model (200-300 kilometer i diameter) kræver en høj kappetemperatur for at stemme overens med de seismologiske og geokemiske observationer, men



Figur 3. Snæfell. Udsigt fra Reykjavik. Rejsen til Jordens indre startede her i Jules Vernes fortælling af samme navn. Omend på en lidt anden måde giver Island værdifulde oplysninger om Jordens indre.

producerer en alt for tyk skorpe. Den smalle model kan dog tilfredsstille samtlige krav, hvis det antages, at diapirmaterialet afgiver en vand-/kuldioxid-rig (volatilrig) smeltefase på stor dybde. Dette lyder umiddelbart som en konstrueret løsning, men rent faktisk har hypotesen om volatilrige smeltetaser været bredt accepteret længe, men var indtil for nylig ikke indarbejdet i de numeriske modeller. Resultatet er, at model-diapirens opstrømningsrate og smeltedannelsesrate reduceres drastisk og derved genererer de observerede skorpetykkelser.

Vi har foreslået at en sådan tidlig volatilrige smeltefase kan spores kemisk i visse islandske basalter indenfor et geografisk velafgrænset område. Ved at anvende helium-isotopforhold ($^3\text{He}/^4\text{He}$) er det lykkedes at påvise en korrelation mellem islandske basalters kemi og de geofysiske parametre (seismiske hastigheder og tyngde), der normalt anvendes til at angive den omtrentlige position og dimension af diapirstammen. Ifølge vores hypotese angiver udbredelsen af høje $^3\text{He}/^4\text{He}$ -forhold kappediapirens diameter før dens horisontale udbredelse langs undersiden af lithosfæren.

Hvorfor helium-isotoper?

Isotoper (græsk: isos = lige/samme, topos = plads) er en betegnelse der anvendes om forskellige atomer af samme grundstof. Atomerne har samme plads i det periodiske system og samme kemiske egenskaber, men de har forskellig masse, idet antallet af neutrale partikler (neutroner) varierer en smule. Eksempelvis har ^3He (helium-3) en neutron mindre end ^4He (helium-4). $^3\text{He}/^4\text{He}$ -forhold anvendes traditionelt til at spore oceanbasalters oprindelsesområder. ^3He er en stabil isotop: Den sønderdeles (henfalder) ikke til andre grundstoffer og dannes heller ikke fra andre grundstoffer.

Derimod dannes ^4He hele tiden ved henfald af uran (U) og thorium (Th). Henfaldet beskrives bl.a. ved halveringstiden - dvs. den tid det tager at reducere ethvert antal U eller Th isotoper til det halve antal. Halveringstiden for ^{238}U og ^{232}Th er hhv. $\sim 4,5$ og ~ 14 milliarder år. $^3\text{He}/^4\text{He}$ -forholdet falder altså løbende i materialer, hvor der er U og Th tilstede, som f.eks. i Jordens kappe. Forholdet (R) mellem de to isotoper er ekstremt lille i alle naturligt forekommende materialer, og det angives ofte i forhold til $^3\text{He}/^4\text{He}$ -forholdet i atmosfæren (Ra).



Den nedre kappe menes at have et relativt højt forhold (20-50 R/Ra), der afspejler He-sammensætningen i den oprindelige kappe plus et tilskud af He (^4He) dannet ved henfald af det uran og thorium, der også er tilstede i kappen.

Den øvre kappe menes derimod at have et lavt forhold (~ 8 R/Ra), hvilket skyldes afgasning af det oprindelige He til atmosfæren, efterhånden som den øvre kappe er indgået passivt i oceanskorpedannelse igennem milliarder af år.

Figur 4. En forkastningsflade gennem en pudelava-enhed ved Askja har tydeligt blotlagt de sorte glasrande på de enkelte puder.

En stor del af det He, der findes i den øvre kappe, er dannet efter afgasningen. Dette He er stærkt domineret af henfaldsproduktet af U og Th, der engang var tilstede i den øvre kappe: dvs. ^4He . Da det oprindelige He (^3He og ^4He) næsten er forsvundet, er $^3\text{He}/^4\text{He}$ -forholdet lavt. Med andre ord He isotop-studier kan være velegnede til at skelne plume-afledte basalter fra asthenosfære-afledte, hvis plumen har rod i den nedre kappe.

Prøvetagningsstrategi

Ikke alle typer udbrudsprodukter er lige velegnede til at studere heliumsammensætningen af det oprindelige magma. Ædelgasser som He er flygtige og undslipper løbende fra magmaet, når det opholder sig i magmakamre i skorpen, eller når det ekstruderes. Skulle noget He være blevet fanget i inklusioner i et mineral Korn, er det oftest i stand til at diffundere gennem det - for de fleste mineralers vedkommende. Dette gælder dog ikke olivin, hvorfor olivin-rige bjergarter som pikritter og olivin-tholeiitter er brugbare.

Særligt velegnede er dog vulkanske glasser, som f.eks. forekommer som rande på pudelavaer (figur 4) eller som matrix-korn i aggregater af millioner af glaskorn; såkaldte hyaloklastitter (figur 5). Sådanne udbrudsprodukter var særligt hyppige under sidste istid, hvor subglaciale udbrud var den dominerende udbrudstype på Island. Udbruddene fandt sted under relativt stort istryk/vandtryk, og magmaerne



Figur 5. Typisk forvitret hyaloklastit ved Kverkfjöll. Skala: Lup.



Figur 6. Herdubreid (hærdebreid) table mountain i Islands nordlige riftzone. Højden over baggrunds niveauet (ca. 800 m.) er en indikator for istykkelsen under udbruddet. Isoverfladen har formentligt ligget nogen 100 m højere. Trykket ved foden af Herdubreid har altså svaret til omkring 1000 m vand og har i nogen grad forhindret de magmatiske gasser i at undslippe fra magmaet i udbruddets første fase.

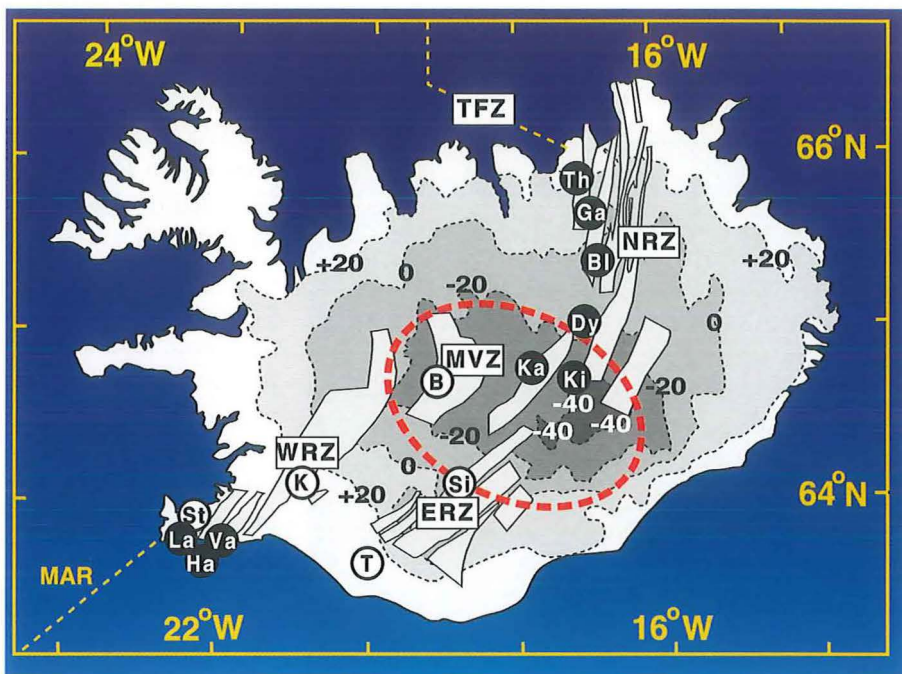
er størknet næsten øjeblikkeligt under kontakt med store mængder smeltevand fra iskappen. Gasbobler i magmaet er således indefrosset i glasserne, hvis amorfe struktur gør dem uigennemtrængelige selv for He (diffusion). Derfor kan original magmatisk gas ofte ekstraheres fra disse glasser ved blot at knuse dem, hvorefter gassen siden kan analyseres i et specielt indrettet massespektrometer.

Et andet prøveudvælgingskriterie i dette studie var bjergarternes udviklingsgrad. Magmaer udvikles i jordskorpen som følge af, at de afkøles. De krystalliserer og mister - f.eks. ved vækst på magmakammerets væg - mineraler, der ikke er repræsentative for smelten som helhed. Denne proces ændrer (udvikler) magmaets sammensætning og kaldes fraktionering. Endvidere kan der forekomme forurening (kontaminering) af det originale magma. Dette kan ske ved opsmeltning af mineraler, der ikke er stabile ved de høje temperaturer, der forekommer ikke blot i magmaet, men også i dets nærmeste omgivelser i jordskorpen.

Vulkanske bjergarter, der er stærkt fraktionerede og kontaminerede f.eks. efter ophold i magmakamre, er uegnede til at karakterisere den del af kappen, de stammer fra. Udbrudsprodukterne i og omkring de islandske centralvulkaner er

meget ofte udviklede tholeiitter, kvarts-tholeiitter og rhyolitter, der i høj grad er præget af kemien af hydrotermalt omdannede metabasalter i den islandske skorpe. Disse vulkanitter, der karakteriserer størstedelen af alle udbrud på Island, er derfor stort set uanvendelige.

De enorme table mountains, tuyas eller stappir (islandsk) udgør derimod et bedre bud (figur 6). Disse er karakteriseret ved at være dannet under sidste istid, oftest i et enkelt udbrud. Basalterne er primitive (uudviklede) og gasindholdet er højt, især i de nederste pudelavaenheder der kom til udbrud under det højeste tryk. Tillige forekommer table mountains jævnt fordelt langs med det meste af den aktive spredningszone i Island. Prøvetagning kan derfor udføres på tværs af de geofysiske gradienter (seismisk hastighed eller tyngde), hvilket giver mulighed for at spore eventuelle forskelle i kappesammensætningen inden- og udenfor den geofysiske anomali i SØ Island (figur 7).



Figur 7. Prøvekort med rift-zonen (aflange parallelforskudte felter), seismisk anomali (tyk stippel) og tyngdekonturer i mGal (tynd stippel). Bemærk tyngde-Bull's eye (<-40m Gal) falder sammen med den seismiske anomali. Prøverne (cirkler) er indsamlet på tværs af de geofysiske gradienter og kan derfor opsnappe evt. kemiske forskelle forbundet med de geofysiske parametre. MAR = Midt-Atlantiske Ryg. (NRZ) Northern Rift Zone, (ERZ) Eastern Rift Zone, (WRZ) Western Rift Zone, (MVZ) Mid-Iceland Volcanic Zone, (TFZ) Tjörnæs Fracture Zone

$^3\text{He}/^4\text{He}$ plateauet i SØ Island

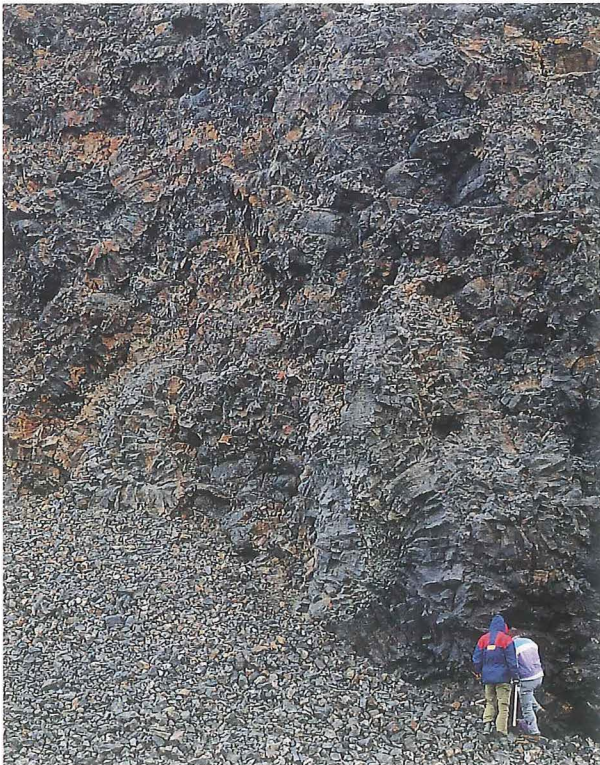
De nye data viser for første gang en klar nord-syd gradient i $^3\text{He}/^4\text{He}$ -værdier langs med den nordlige riftzone. Disse korrelerer omvendt med gradienten i de seismiske hastigheder og tyngdegradienten. Således har prøver fra den nordlige del af riftzonen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -værdier, der er sammenlignelige med typisk MORB (8 R/Ra), hvorimod prøver indsamlet ved centeret for den geofysiske anomali har $^3\text{He}/^4\text{He}$ -værdier > 20 R/Ra.

I kombination med tidligere publicerede data viser heliumdata for vulkanske glasser fra de neovulkanske rift zoner et tydeligt plateau af relativt høje værdier over det centrale og sydøstlige Island (figur 9). Plateauet strækker sig over ca. 150 kilometer og falder sammen med både den seismiske hastighedsanomali og tyngdeanomalien. Det er første gang en sådan korrelation er påvist.

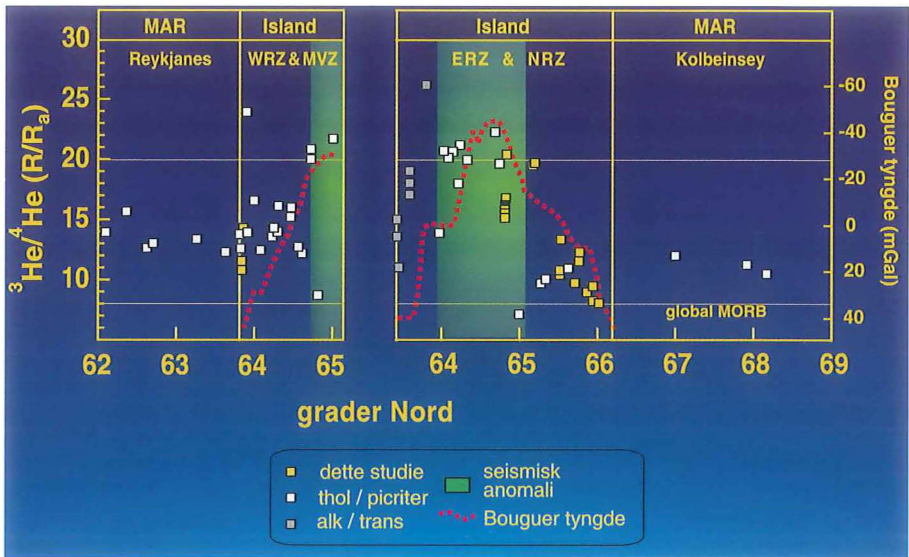
Dette og tidligere studier af He-isotopforhold i hotspot-basalter viser endvidere, at $^3\text{He}/^4\text{He}$ korrelerer dårligt eller slet ikke, med Sr-, Nd-, Pb- isotopforhold. Ej heller med de sporelementforhold, der sædvanligvis anvendes som indikatorer for opsmeltningprocesser eller for, hvorvidt kilden tidligere har afgivet smelte (f.eks.: La/Sm). På Island korrelerer disse øvrige kemiske parametre ofte

indbyrdes, men viser ikke nogen form for korrelation med de geofysiske parametre.

Det vil sige, at der ikke er nogen særskilt region med høje/lave værdier for disse kemiske parametre: korrelationen mellem $^3\text{He}/^4\text{He}$ og den seismiske anomali er med andre ord unik.



Figur 8. Pudelavaenhed nederst i table mountain.



Figur 9. $^3\text{He}/^4\text{He}$ forhold i basaltiske glasser og oliviner fra Island og nærmeste dele af den Midt Atlantiske oceanryg. Figuren er delt i to overlappende dele eftersom riftzonen består af to overlappende dele imellem 63°N og 65°N (Fig. 3). Tyngde (rød stippel), seismisk anomali (grønt felt), prøver fra dette studie (gule firkanter). Bemærk sammenfaldet mellem tyngdeanomali, seismisk anomali og høje $^3\text{He}/^4\text{He}$ forhold. MAR = Midt-Atlantiske Ryg. (NRZ) Northern Rift Zone, (ERZ) Eastern Rift Zone, (WRZ) Western Rift Zone og (MVZ) Mid-Iceland Volcanic Zone.

Hypotese

En mulig forklaring på, hvorfor de høje $^3\text{He}/^4\text{He}$ -værdier forekommer over den geofysiske anomali og ikke udenfor er, at de afspejler en tidlig, meget dyb separation af volatil- og He-rige smelter fra en primitiv del af diapirmaterialet. Udbredelsen af disse basalter med høje $^3\text{He}/^4\text{He}$ -forhold afspejler derfor tværsnittet af kappediapiren i det niveau, hvor disse volatilirige smelter mobiliseres.

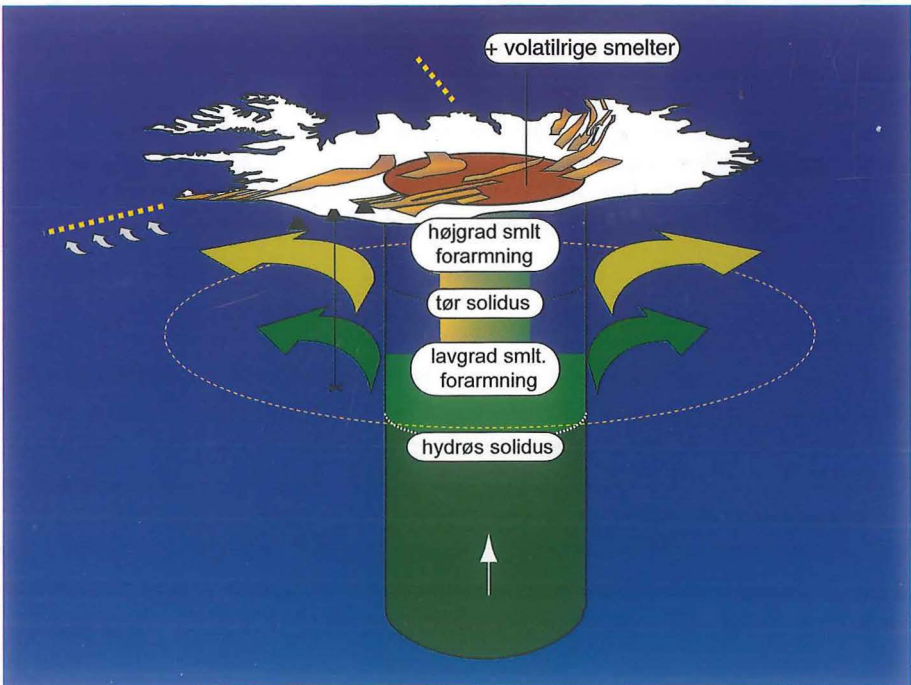
Idet kappemateriale indeholder en lille mængde vand, kan den allerførste opsmeltning ($\ll 1\%$) foregå på meget stor dybde (>125 kilometer). Smeltedannelsen tager først rigtigt fat, når kappematerialet når op til 125 kilometers dybde - såkaldt tør solidus, hvor der ikke behøver at være vand tilstede for at opsmeltningen kan forløbe - og smeltedannelsesraten er formentligt højest i dybdeintervallet 80-40 kilometer. Disse dybe smelter dannet før 'tør solidus' niveau vil være volatilirige med en relativt lav viskositet og massefylde, og de vil endvidere være rige på de mest inkompatible (smeltesøgende) grundstoffer inklusive He.

Selv en meget lille mængde volatilirig smelte kan separeres fra sit oprindelses-

område og vil i områder med aktiv opadgående materialbevægelse migrere direkte opad. Dette står i kontrast til områder med passiv opadgående kappebevægelse som f.eks. ved midt-ocean rygge, hvor smelterne fokuseres/koncentreres under riften. Der er altså en teoretisk mulighed for, at små smeltmængder kan separeres fra kappediapiren inden dennes vandrette udbredelse, når den møder undersiden af lithosfæren.

Model

En skematisk fremstilling af modellen er præsenteret i figur 10. Den opadgående strøm af varmt kappemateriale er repræsenteret ved en cylindrisk zone under SØ Island. Kappematerialet spredes horisontalt ved mødet med undersiden af lithosfæren (pile). Dannelsen af en meget lille mængde (< 1%) volatilrige (og He-rige) smelter sker mellem de to niveauer 'våd (hydrøs) solidus' og 'tør solidus'. Dette betyder, at kappens viskositet forøges stærkt, hvilket igen afstedkommer,



Figur 10. Skematisk model. Se tekst for forklaring. Dyb vandret udbredelse af plume materiale der kun har bidraget med en meget ringe smeltedannelse, eller måske indeholder små smeltelommer der ikke blev mobiliseret, muliggør at høje $^3\text{He}/^4\text{He}$ forhold evt. kan findes udenfor overflade konturen af plumen. (f.eks. i lavt-gradsmelter dannet på stort dyb som de alkaline basalter fra Vestmanna-øerne).

at diapiren begynder at spredes under/før 'tør solidus'. De volatilerige og He-rige smelter er dog dannet før spredningen, og eftersom de søger opad uagtet kappematerialets flyderetning, kommer de til udbrud over et tværsnit, der svarer til diapirstammens diameter i smelternes dannelsesniveau. De 'våde' (hydrøse) smelter kommer imidlertid til udbrud som en komponent i senere smelter dannet ved højere grad af opsmeltning i et højere niveau (over 'tør solidus').

Massiv smeltedannelse sker først i niveauet over 'tør solidus' og i en meget større radius end diapirstammens. Dette hænger sammen med, at en stor del af diapirmaterialet først overskrider 'tør solidus' efter den horisontale spredning. Da det er i dette dybdeinterval mange af de øvrige sporelementer - som f.eks. Sr, Nd, Pb - ender i smeltefasen, kan isotopforhold for disse elementer ikke anvendes som markører for diapirstammens diameter. Denne model er i overensstemmelse med de geofysiske data.

Der kan drages to basale konklusioner på baggrund af $^3\text{He}/^4\text{He}$ værdier for primitive islandske basalter:

- 1) kappediapiren har rod i den nedre kappe.
- 2) kappediapirens diameter er omkring 100-150 kilometer i det nederste smeltedannelses-niveau.

2) stemmer i øvrigt godt overens med de tilbagevendende 100-150 kilometer rift-forskydninger (rift-jumps) der forekommer når spredningscenteret (midt-oceanryggen) har bevæget sig tilstrækkeligt mod vest i forhold til kappediapiren. Dansk Lithosfærecenter planlægger nye seismiske undersøgelser, der kan kaste yderligere lys over kappediapirens dimensioner i den øvre og måske den nedre del af kappen.

**næste VARV udkommer
1. oktober**

ÆDLE KORALLER

Rosenborgs korallerne - fortsat

Ulla Asgaard

Koraller hører hjemme i rækken Cnidaria, der rummer dyr udformet som polypper og/eller meduser (koraldyr og gopler eller vandmænd). Det græske navn betyder egentlig nældecelle dyr. Et ældre navn for gruppen er Coelenterata (græsk: hultarm), som både er langt og ucharmerende. Fælles for denne dyregruppe er nældecellerne, der findes i stor mængde på dyrenes tentakler og bruges til at lamme byttedyr. Selve dyrene er for polyppernes vedkommende simple fastsiddende sække med en tentakelkrave omkring mundåbningen, der fører ind til mavesækken; medens meduserne er fritlevende sække med bunden i vejret og tentaklerne hængende nedad. Vandmænd bærer deres navn med rette, for de består mest af vand og har intet skelet, der kan forstenes. For polyppernes vedkommende er også her langt de fleste 'bløde'. Nogle klasser har vekslende generationer af polypper og meduser, hos andre er kun meduser eller polypper til stede. Indenfor 2 klasser findes former med et mineraliseret skelet, der kan have interesse for geologer og kunsthåndværkere.

Ved den første gennemlæsning af Mogens Bencard's artikel (VARV 1999, 2) - smukt illustreret og her og der spændende som en kriminalroman - gik det pludselig op for mig, at der er koraller og koraller. Der er naturhistorikerens koraller, som er omtalt ovenfor; og så er der kunsthistorikerens!

Som altid i den situation, hvor mit uskyldige natursyn krydser noget, der smager af penge og handel, greb jeg til min fars lærebog fra Aarhus Handelshøjskole i 1918-20: Meyer's Vareleksikon (2. udgave) fra 1907, og slog op på side 410-11. Ganske rigtigt - i handelsverdenen findes der kun én koral: ædelkorallen *Corallium rubrum*.

Det snævrer straks koralbegrebet ind til kun én klasse af Cnidaria: nemlig Anthozoa (græsk: blomsterdyr). Her er meduse-generationen helt undertrykt, og den kønnede formering foregår hos polypperne. Der findes både enkeltformer og koloniformer. De er alle marine.

Hos underklassen Octocorallia findes kun koloniale - kolonidannende - former, hvor hver polyp er forsynet med 8 fjerformede tentakler, der har givet navn til gruppen. De er af geologisk interesse, idet de har karakteristiske spikler (nåle) i kødet. De kan blive flere millimeter lange og kan således ses med det blotte øje eller en lup. Spiklerne består af kalciumkarbonat (CaCO_3) i form af kalcit, der

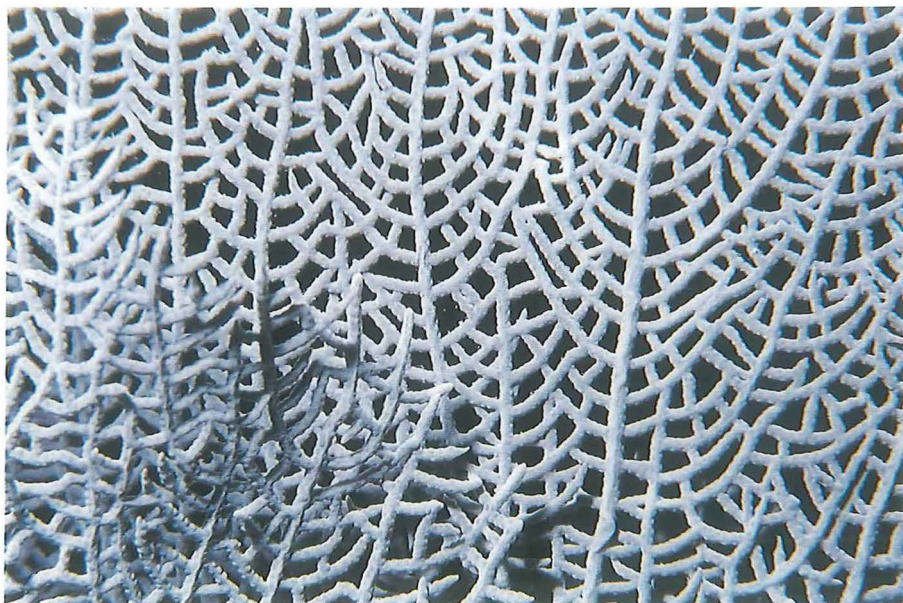


Figur 1. 'Blød' oktokoral (8 meters dybde), Elat, Israel. Læg mærke til de store spikler i det røde kød. Den lådne, sorte organisme, der klynger sig til korallen, er en stilkløs sølilje (foto R. Bromley).

er stabilt i det normale marine miljø. Zoologerne bruger spiklerne til at bestemme de nulevende arter. Vi kender oktokoralspikler fra marine sedimenter helt tilbage til Kultiden.

Medens langt de fleste oktokoraller er 'bløde' og bøjelige og efter deres død kun efterlader sedimentkorn i silt- og sandfraktionen (figur 1), er der en enkelt orden - Gorgonacea - der er mere solid. Her findes i grenene og de rodlignende tilhæftninger en central stav af et organisk stof kaldet gorgonin. Det er beslægtet med horn og hår, og dets elasticitet gør, at disse 'hornkoraller' kan klare sig i områder med bølgebevægelser og strøm og ofte udnytte planktonet i strømmen optimalt ved at vokse vifteformet, vinkelret på strømretningen. En typisk repræsentant er *Gorgonia* - 'Venusvifte' (figur 2).

Gorgonin er ikke bestandigt, men hos nogle former, der kendes tilbage til øvre Kridt, er gorgoninen centralt erstattet af et massivt kalcitskelet af sammensmeltede spikler. Der findes 2 typer. 'Ledkorallerne' har vekslende aksestykker af gorgonin og kalcit, hvilket gør, at grenene kan ligne rygsøjler med hvirvler og ledskiver. Også disse koraller kan bøjes i strøm og bølgeslag. Til denne gruppe hører *Moltkia isis*, som man blandt andet kan finde i Fakse. En udbredt tropisk slægt

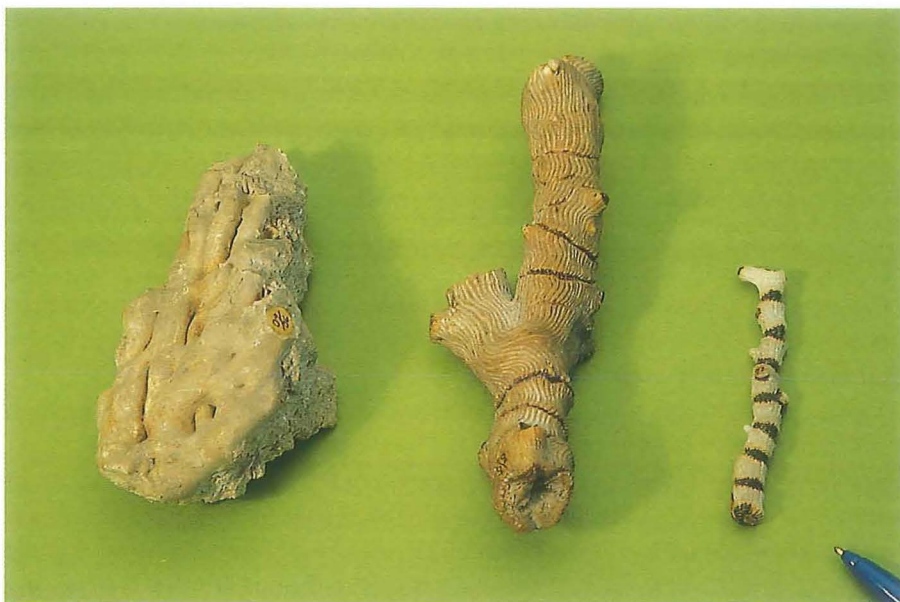


Figur 2. Detalje af Venusvifte (20 meters dybde), Bahamas. Polypperne har trukket tentaklerne ind (foto R. Bromley).

idag er *Isis* (figur 3). Hos gamle kolonier af *Moltkia isis* kunne grenene få en tyk 'bark' af sammensmeltede spikler, der dækkede både kalcit og hornled. Den anden type - 'ædelkoraller' - (slægten *Corallium*) har et helt massivt centralt skelet af kalcit med omgivende tæt spikelbark. De er stive og hører derfor hjemme på noget dybere vand nedenfor bølgezone. I 1925 blev en ædelkoral fundet og beskrevet fra Danienkalk i Fakse.

Typearten for slægten er *Corallium rubrum*, der er udbredt i Middelhavet og i Atlanterhavet fra Portugal til de Kap Verdiske Øer. Dens farve går fra den klassiske 'koralrøde' over sartrosa til hvid. Der eksisterer imidlertid også andre repræsentanter for slægten *Corallium* i det Caraibiske Hav og i den vestlige del af Stillehavet. Nogle af disse er røde eller orange, men der findes også hvide og gule former; endelig er der også en enkelt blå, der er meget sjælden. Farven er indbygget i skelettet og er lysægte modsat farverne hos de moderne revkoraller. Det vides ikke, om skelettet hos vor hjemlige *Moltkia* var farvet.

Ved læsningen af vareleksikonet gik det for alvor op for mig, at det ikke er junglen til lands, der alene er truet! Tallene fra 1907 talte deres eget sprog: ' - - Ædelkorallens hovedsagelige Hjemsted er Middelhavet, hvor den, særlig ved



Figur 3. Gammel koloni af Moltkia isis med overvoksning af gorgoninled. Stribningen skyldes de sammensmeltede spikler. Fragment af Isis sp. visende vekslende kalk- og hornled (foto O. Bang Berthelsen).

den afrikanske Kyst forekommer fastvokset på Stenene ved Kysterne eller på Havbunden, på Klippevægge og i Kløfter o.s.v., ved Dybder, der varierer mellem 3 og et Par Hundrede Meter. I Almindelighed naar hver særskilt Koralgren kun en højde af 30 Cm. og en Maksimumstykkelse af 3 Cm. --- Korallerne 'fiskes' ved Kysterne af Tunis, Algerie, Corsica, La Calle o.s.v. ved Skrabere, der fæstes ved Tov og manøvreres fra Fartøjer, der er særligt udrustede dertil, og som findes i Hundredetal. Alene ved Kysterne af Algerie og Tunis fiskes aarligt 10 000 Kg. Koraller til en Værdi af over en halv Million Kroner. Korallerne skæres i Stykker efter den Brug, der skal gøres af dem; en Del beholder de oprindelige, grenede Former, gattes og poleres samt gennembøres på tværs for at hænges på Traade; en anden Del skæres i korte Stykker, gennembøres og formes til 'Koralperler', skæres til i Form af Blomster, Dyr- eller Menneskefigurer eller forarbejdes paa anden Maade. Forarbejdelsen foregaar navnlig i Torre del Greco, Marseille, Genova og Livorno. - Forbruget i Europa er, med Undtagelse af Rusland, ubetydeligt, men til Orienten er Afsætningen meget stor, til en Værdi af flere Millioner Kroner, da enhver Tyrk gerne vil have nogle Rækker af Koralsnore omkring sin Turban, og enhver indisk Kvinde ønsker at smykke sin Hals og Arme med 'Koralbaand'. Korallen værdsættes der som Ædelsten. - -'

Og nu tilbage til Mogens Bencard og nogle af de spørgsmål, han stiller til naturhistorikeren.

Der er absolut ingen tvivl om, at pragtstykkerne i rød koral fra Rosenborg stammer fra Middelhavet, der er heller ikke tvivl om, at de er forarbejdet et sted ved Middelhavskysten. Men hvor og hvornår? Bencard foreslår havnebyen Trapani på Sicilien baseret på en afhandling om koralindustrien der, men tilføjer at 'almindeligt tilgængelige oversigtsværker nævner hverken koralproduktionen her, eller koralrev i havet udenfor byen - '. Jeg har en trumf i ærmet og vil nu vove mig ind i kulturhistorien! Jeg har giftet mig til 3 reolmeter af opslagsværket: Encyclopaedia Britannica (9. udgave) fra 1875-90. Den mest voluminøse og grundige af alle udgaverne.

Opslaget om koraller fylder 19 tætskrevne sider, og den sidste er helliget koralindustri. Her igen er talen kun om *Corallium rubrum*. Et historisk afsnit fortæller, at allerede i det første århundrede havde Romerriget en stor eksport af koraller til Indien. Gennem hele middelalderen og op til omkring år 1500 var fiskeriet domineret af de italienske stater. Derefter tiltog Frankrig sig monopolet på den Afrikanske kyst lige til Marokko, Algier og Tunis blev frie. Det franske centrum for koralhandel var Marseille. Men det franske koralfiskeri var aldrig særligt stort. Lige til nu har fiskeriet omkring øerne og kysterne i Middelhavet og helt ned til de Kap Verdiske Øer i Atlanten været domineret af de italienske stater med en specialiseret flåde, der i den franske periode betalte en høj afgift for at fiske ved Afrikas kyst; men udgiften var småpenge sammenlignet med eksporten af italiensk forarbejdede koraller. I 1877 hørte de fleste både hjemme i Torre del Greco i Napolibugten. I 1873 fiskede 311 både med en besætning på 3.150 mand koraller for en værdi af £113.000.

Det er interessant at se, at allerede da var man opmærksom på, at korallerne var truede af overfiskeri, og det afrikanske område var opdelt i 10 zoner, der fiskedes i rotation i håbet om, at korallerne kunne vokse sig store nok i løbet af 10 år. Korallerne fandtes da 3-15 kilometer fra land på en dybde af 55-240 meter - mest almindelige omkring 150 meter. Store både (12-14 ton) fiskede kun i sommerhalvåret og fik 300-400 kilogram koraller, de små (3-4 ton) fiskede hele året og fik 175-225 kilogram. I 1877 var store rosa stykker mest på mode og kostede £80-120 for 30 gram, koralrøde mindre stykker £2 for 30 gram og små grenfragmenter til halskæder 5 shilling for 30 gram. Store kugler var en stor eksport til Kina, hvor de blev lavet til knapper i mandarindragter. Måske blev det samme skæbnen for nogle af de mindre forarbejdede 'koraltræer' i den sending, der blev afskibet fra Danmark til Kina i 1826. Næst efter Kina gik eksporten i 1877 til Indien og Centralasien.

Opslag under Italien fra 1879 har et interessant afsnit om fiskeri under 'stati-



Figur 4. To sorte koraller. En buskformet og en 'telefonledning'. Sri Lanka (foto: O. Bang Berthelsen).

stik'. Napoli-området har ca. 500.000 indbyggere. 55 både med 321 mand fanger fisk; medens 378 både med 3.793 mand skraber koraller. Næsten alle bådene hører hjemme i Torre del Greco, der på det tidspunkt har 25.842 indbyggere. Trapani med 37.778 indbyggere har 5 både med 33 mand til koralfiskeri og 26 både med 471 mand, der fisker svampe ved Tunis; medens 37 både med 195 mand fanger fisk (mest tunfisk).

Opslag under Trapani og Torre del Greco fra 1888 giver supplerende oplysninger. Begge byer har en historie gående tilbage til den græske kolonisation før vor tidsregning. Trapani er kornsegl på græsk og hentyder til formen på den

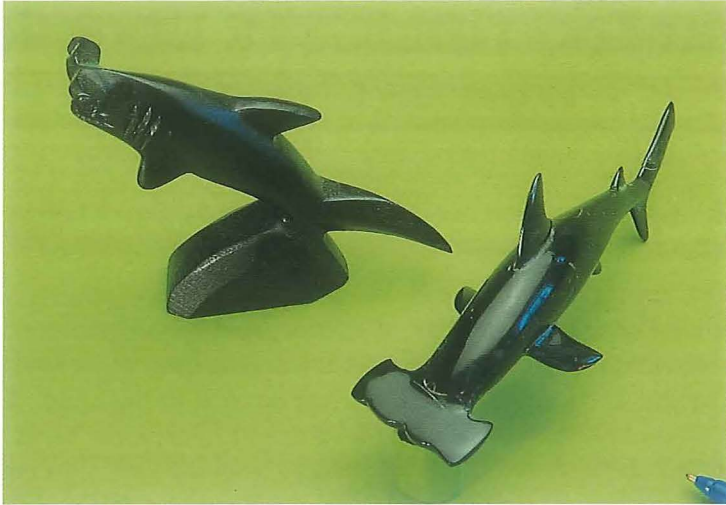
store naturhavn. Under industri nævnes linnedvævning og arbejder i koral, træ, jern, marmor, alabast og perlemor. Torre del Greco har vin og oliven og fiskning og forarbejdning af koral. Den ligger på flanken af Vesuv ved Napolibugten. Husene er af lava, og den står på lavastrømmen fra udbruddet i 1631, der ødelagde 2/3 af byen. Udbrud sendte lavastrømme gennem byen og ud i havet i 1737 og 1794. Jordskælv i 1857 og udbrud i 1861 forårsagede også store ødelæggelser; men alle gange rejste byen sig hurtigt igen takket være koralindustrien.

Nu tilbage til Rosenborg-korallerne. Det fornemme sølvsmedearbejde kan dateres til ca. 1650. Korallerne er naturligvis udskåret før da og kan være solgt til en sølvsmed fra et helt andet sted. Spørgsmålet er: Kunne indtægten fra disse pragtstykker (grendiameter op til ca. 8 centimeter) have medvirket til opbygningen af Torre del Greco efter 1631?

Tilbage til spørgsmål til naturhistorikeren. Angående 1694 inventariet fra Gottorp så nævnes der hvide stykker, bl.a. et som et blomkål, her er vi inde på de mere massive revbyggende koraller fra underklassen Zoantharia (græsk: dyreblomster) i ordenen Scleractinia (græsk: skeletstråler, eller -stjerner, grundet de radierende septa i polyppernes skelet - en karakter der ikke findes hos de andre koraldyr). De kaldes også heksakoraller, fordi der er en tilsyneladende sekstalsymmetri i skeletterne, der består af den mindre stabile udgave af kalciumkarbonat (CaCO_3): aragonit. De levende scleractinier i revene har strålende farver, der skyldes symbiotiske alger i kødet; skeletterne er hvide. Blomkålsformen kunne være en ostindisk repræsentant for slægten *Acropora*, der har meget små polypper og derfor et ret massivt skelet. Man ser dem ofte anvendt i billige perlekæder og ørenringe kunstigt farvede under navnet 'Madreporare' i Middelhavslandene - side om side med dyre 'Coralle'.

Endelig nævnes også 'Sorte Koraller' indkøbt fra Holland. Det drejer sig om den lille klasse Antipatharia, som er koloniformer med polypper med 6 tentakler og et skelet af et hornagtigt stof, der ikke kan bevares fossilt. De er tropiske og kan findes på relativt dybt vand. De fleste ligner madrasfjedre eller velbrugte telefonledninger, men nogle ligner solbærbuske i vintertilstand (figur 4). De buskformede har været meget efterstræbte til mindre billedskærerearbejder og smykker og står nu på den Røde Liste over udryddelsestruede arter (CITES)! Det omtalte eksemplar stammede uden tvivl fra hollandske kolonier eller handelsstationer i Vest- eller Ostindien.

Forfalskning af ædelkoraller og sorte koraller har alle dage fundet sted (figur 5). Meyer's vareleksikon nævner dyreben, hjortetak og celluloid. I dag er det plastic. En lup kan imidlertid straks afsløre, om korallen er ædel. Den ægte vare viser en tydelig, slynget nålestribning af de sammensmeltede spikler som en mikroskopisk egetræs bark.



Figur 5. Skulpturer af hammerhaj. Til venstre i sort koral fra Belize. Til højre i farvet træ fra Bahamas (foto O. Bang Berthelsen).

Til sidst et lille hjertesuk! Vi kan ikke umiddelbart bruge statistikken fra 1887 på begyndelsen af 1600-tallet. Fiskeflådernes og forarbejdningscentrenes områder er nok de samme; men de små både har fisket lokalt med fri dykkere fra 0-50 meter. Dog var koralstammer på de skønnede 8 cm diameter nok sjældne. I dag er der ingen kystnære koraller. Der er heller ikke nogen vaskesvampe, der kan fiskes med SCUBA-dykning. I 1950 købte jeg i Genoa en koralhalskæde af grenstumper, de længste er ca. 3 centimeter, den passede til en skolepiges sparsomme lommepenge. I dag har den billigste kæde grenstumper på 3 millimeter og koster mere end en tung sølvkæde.

Fra 1984 til 1993 blev der afholdt 4 internationale symposier om ædelkoraller resulterende i 4 tykke bind afhandlinger. Her kan man læse om kontrolleret fiskeri, mulig dyrkning, vækstrater, snyltende og eroderende organismer, mulig fredning, og endelig totalfredning og anbringelse på den Røde Liste!

Således findes der i dag ingen fuldt udvoksede kolonier af ædelkoral. Der er heller ingen udvoksede torsk, hummer og kaskelothvaler. Dette er en vel tiltrådt sti mod uddøen. Vi ved godt på hvilken længde- og breddegrad skurkene findes, men ingen kan tilsyneladende standse dem.

Rosenborgsamlingen af ædelkoraller er enestående og uerstattelig, den burde bevogtes bedre end kronjuvelerne!

JORDENS TIDLIGSTE HISTORIE

en beretning fra Grønland

Minik Rosing

Den tyske filosof og matematiker G. W. Leibniz og Isac Newton nærrede en dyb afsky for hinanden. Newton mente, at Leibniz, som publicerede principperne for differentialregning i 1684, havde stjålet ideen fra ham, og Leibniz følte, at Newton brugte sine forbindelser og indflydelse til at forfølge ham. Desuden havde de en grundlæggende forskellig holdning til Jordens udvikling. Leibniz mente, at Jorden var et deterministisk system. At Jorden var at sammenligne med et urværk, der i al evighed ville opføre sig forudsigeligt ifølge de fysiske love, når det først var sat i gang. Denne opfattelse af verden var anstødelig for Newton og de fleste af deres samtidige. Man mente, at Gud ikke kunne reduceres til en passiv tilskuer til en Verden, hvis gang ikke stod til at ændre.

Mennesket har til alle tider været optaget af spørgsmålet om, hvordan Verden blev til, og om vi kan forudsige Jordens udvikling i fremtiden ud fra en viden om dens historie. I dag har vi indset, at selv om Jorden er et deterministisk system, er det for kaotisk et system til, at vi kan forudsige fremtiden, eller 'regne baglæns' og forstå Jordens tidlige historie ud fra vor viden om den moderne Jord og om fysik og kemi. Der er ingen vej udenom – Jordens historie kan kun forstås gennem studier af de bjergarter, som er dannet ved geologiske processer gennem tiden.

Jorden er varmere end det omgivende rum og må derfor afgive varme. Lord Kelvin mente i midten af 1800-tallet, at den højere temperatur skyldtes, at Jorden engang havde været en del af Solen. Han kunne regne ud, hvor lang tid passiv afkøling til den nuværende temperatur måtte have taget, og kom frem til, at Jorden måtte være ca. 100 millioner år gammel. Han havde imidlertid ikke taget højde for den varme, som produceres ved krystallisation af Jordens flydende jernkerne og ved radioaktivt henfald, og kom derved til at undervurdere Jordens alder ganske alvorligt. Hans erkendelse af, at varme strømmer fra Jordens indre til Universet er imidlertid korrekt, og er nøglen til en forståelse af Jordens dynamik. Denne varmestrøm sætter materialet i Jordens indre i bevægelse, den driver de pladetektoniske bevægelser, og den har forårsaget en kemisk opsplitning af Jordens oprindeligt homogene materiale i et virvar af forskellige bjergarter.

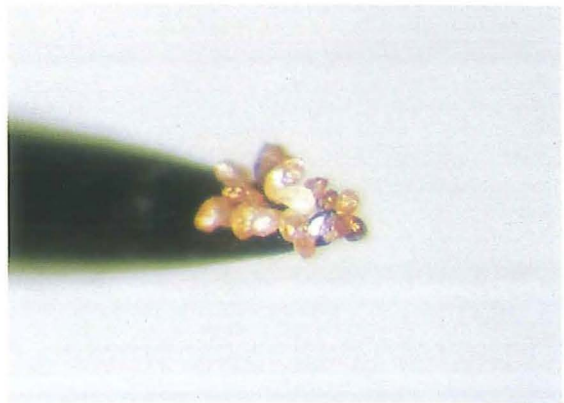
Varmestrømmen fra Jordens indre er aftaget jævnt gennem hele dens historie. Dels fordi en store kapital af varme fra den oprindelige sammenklumpning af

mindre himmellegemer den gang Jorden blev dannet er forbrugt, og dels fordi indholdet af radioaktive stoffer aftager med tiden. På grund af den højere varmestrøm var Jordens dynamik derfor langt mere hektisk i de tidligste tider, og derfor er ingen bjergarter bevaret fra den første halve milliard år af Jordens historie. Det ældste materiale vi har bevaret på Jorden er nogle bittesmå krystaller af det meget resistente mineral zirkon fundet i nogle 2,7 milliarder år gamle sandsten fra Australien. Zirkoner dannes normalt kun i kontinenternes bjergarter, og mange mener, at de gamle zirkoner beviser, at der var kontinenter på Jorden for 4,3 milliarder år siden, selv om de bjergarter zirkonerne oprindeligt blev dannet i for længst er nedbrudt og forsvundet.

I det nordlige Canada på en lokalitet ved navn Acasta er der fundet en lille blotning af gnejs, der oprindelig størknede som den granittoide bjergart tonalit for ca. 4 milliarder år siden. Acasta gnejsen har været udsat for omfattende geologisk hærgen, og man kan stort set kun konstatere, at tonalit var til stede på Jorden på den tid.

Det ældste rigtige sammenhængende bjergartskompleks der er bevaret rummer bjergarter dannet for omkring 3,8 milliarder år siden og betegnes samlet som Itsaq gnejskomplekset. Dele af komplekset findes i Labrador, mens de største og bedst bevarede dele findes omkring Nuuk i Vestgrønland. Her findes bjergarter, som oprindeligt er aflejret på Jordens overflade, enten som lava eller som sediment, og her findes plutoniske bjergarter dannet ved størkning af smelter dybt i Jordens skorpe.

Sådanne komplekser giver mulighed for at studere miljøet på Jordens overflade, og de giver os et indtryk af, hvordan et kontinent var opbygget på den tid. Alle bjergarter i det gamle kompleks har været påvirket af tektoniske processer ved talrige geologiske begivenheder gennem tiden. Det er derfor ikke muligt umiddelbart at afgøre hvilke af bjergarternes strukturelle eller geo-kemiske parametre, som skyldes processer i Jordens tidligste historie, og hvilke der skyldes senere overprægninger. En tolkning af Jordens tidligste miljøer må derfor begynde med en udredning af alle de senere påvirkninger, bjergarterne har været udsat for.



3800 millioner år gamle zirkon-krystaller på spidsen af en knappenål.



Gnejser fra Itsaq gnejskomplekset. Gnejserne er dannet ved størkning af smelter i perioden mellem ca. 3800 og 3650 millioner år siden.



Omdannet vandholdig metabasalt, som har undergået en delvis opsmeltning. Lommer af lyse granitisk smelter er udskilt fra basalten. Miki Fjord, Østgrønland.

Itsaq gnejskomplekset er domineret af tonalit (se side 63) og granit. Tonalit kan dannes ved delvis opsmeltning af amfibolit, som dannes når havbundens basalt reagerer med havvandet og danner vandholdige mineraler. Medens den friske basalt begynder at smelte ved omkring 1.100 °C, begynder den vandholdige amfibolit at smelte allerede ved omkring 600 °C.

Amfibolitens letsmeltelege bestanddele danner en vandholdig smelte som er rig på de grundstoffer som danner mineralerne kvarts og feldspat. De tidligste kontinenter blev således dannet ved delvis smeltning af havbundsbasalt, enten ved at oceanbund blev ført ned i Jorden ved pladetektoniske processer, eller simpelthen under vedvarende vulkanisme, hvor nytålført basalt opvarmede basalt som allerede havde reageret med havvand.

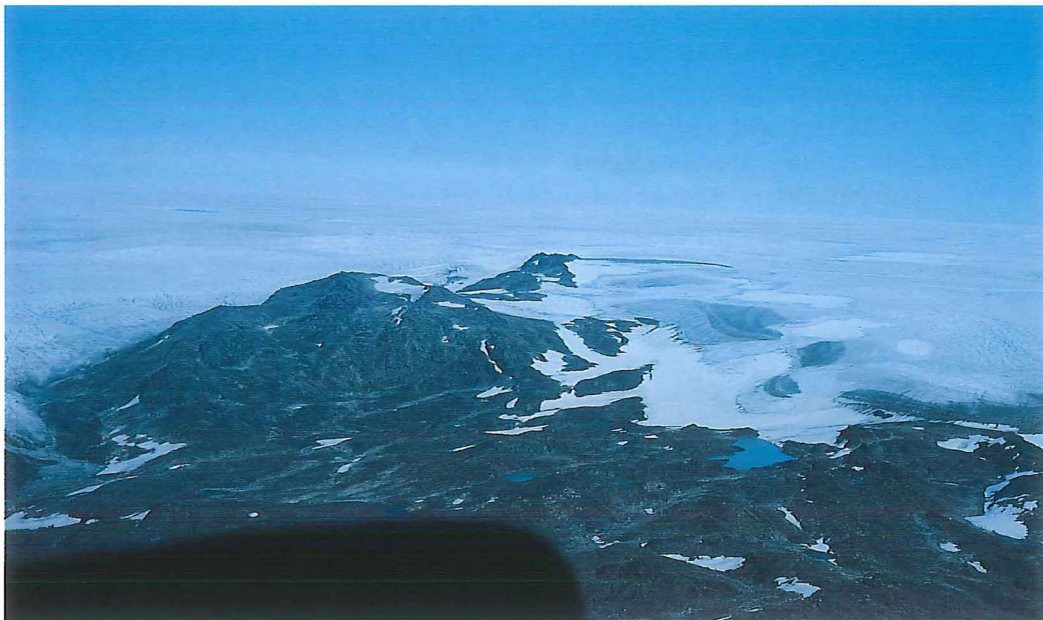
Den nydannede tonalit var let sammenlignet med basalt, og blev koncentreret i skorpens øverste lag. I takt med at de tidligste kontinenter blev tykkere, smeltede bunden af tonalitskorpen delvis og dannede granitsmelte som igen trængte op i de øvre dele af den tidlige tonalitskorpe. Kontinenterne opstod således ved gentagne episoder af delvis opsmeltning af skorpens dybere dele, og dannelse af mere og mere kvarts- og feldspatrige bjergarter. Disse kvartsofeldspatiske bjergarter er så lette, at de ikke lader sig føre tilbage i Jorden ved pladetektoniske bevægelser, og derfor voksede kontinenterne gradvis gennem tiden.

I Itsaq gnejskomplekset kan man gennem nøjagtige dateringer følge opbygningen af et tidligt kontinent. De ældste dele af komplekset er opbygget af tynde lag af tonalit dannet i perioden for mellem 3,85 og 3,70 milliarder år siden. Ved at studere forholdet mellem isotoper af grundstofferne bly, neodymium og strontium kan man konstatere, at tonalitten er dannet ved smeltning af basalt.

For omkring 3,65 milliarder år siden var det tidlige kontinent tykt nok til at bunden begyndte at smelte. Nydannet granit trængte op i de ældre tonalitter. Man finder således i dag, at Itsaq gnejsernes ældste dele overvejende er tonalitter, medens de yngre dele består af granit.

Isotoperne af bly, neodymium og strontium viser at granitten blev dannet ved smeltning af tonalit som var ca. 100-200 millioner år gammel da smeltningen fandt sted. Granitten blev altså dannet ved smeltning af bjergarter som var identiske med de ældste dele af komplekset.

Itsaq gnejskomplekset rummer imidlertid bjergarter som kan bringe os en smule længere tilbage i tiden. Indlejret i de gamle tonalitter findes lag af endnu ældre oceanbund. Det største og bedst bevarede fragment af denne tidlige jordskorpe findes ved Isua ved randen af Indlandsisen ca. 150 kilometer nordøst for Nuuk. Her findes et 30 kilometer langt og op til 4 kilometer bredt bælte af suprakruster – bjergarter som oprindelig er aflejret på Jordens overflade.



Isuaområdet set fra helikopter.



Pudelava dannet ved undersøisk vulkanudbrud for ca. 3800 millioner år siden. De lyse pletter er blærerum udfyldt med kvarts og feldspat.

Bjergarter som dannes ved aflejring på Jordens overflade spejler det miljø de blev dannet i. Forekomsten af suprakrustaler giver derfor mulighed for at studere overflademiljøet på Jorden for ca. 3,8 milliarder år siden.

Størstedelen af bjergarterne i Isua suprakrustalbæltet er oprindeligt aflejret som pudelava på oceanbunden. Disse lavaer er ikke meget forskellige fra dem man kan finde på oceanbunden i dag. Selv om lavaerne er stærkt påvirkede af metamorfose og deformation, kan man få et indtryk af sammensætningen af Jordens kappe på det tidspunkt, hvor lavaerne blev dannet.

Isotoper af grundstofferne neodymium og hafnium medbringer en slags kontoudtog over beholdningen af forskellige grundstoffer i kappen på det tidspunkt, hvor basaltsmelte ekstraheres fra kappen og danner lavaer på overfladen. Man kender den oprindelige sammensætning af kappen ved Jordens fødsel, fordi den svarer til sammensætningen af stenmeteoritter, som er det materiale Jorden er opbygget af.

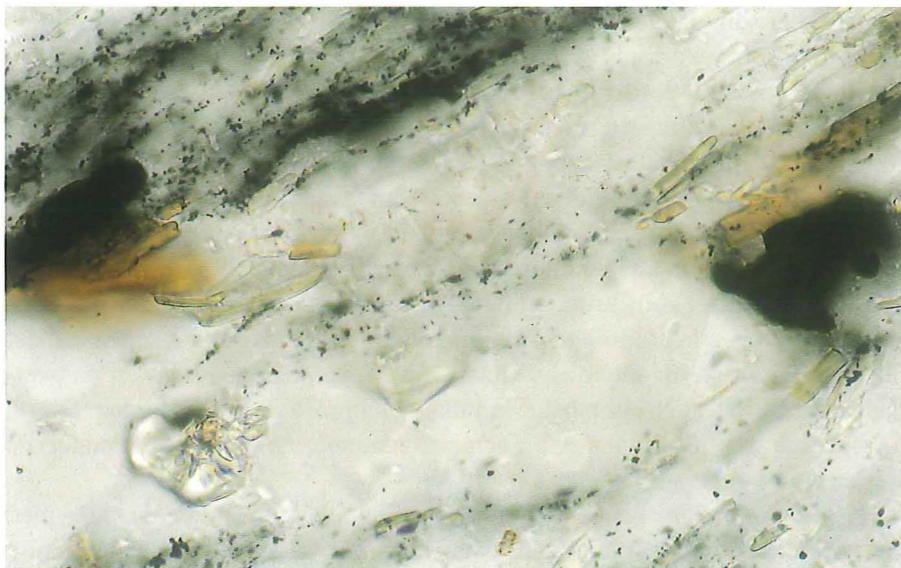
Ved at sammenligne kappens sammensætning for 3,8 milliarder år siden med den oprindelige sammensætning kan man konstatere at der allerede havde været 'trukket på kontoen' i mere end 200 millioner år – altså at skorpemateriale havde været isoleret fra kappen i hvert fald så længe. Man kan også konstatere, at der ikke fandtes stabile kontinenter tidligere end for ca. 4,100 milliarder år siden, fordi isotoperne viser at kappe og skorpe var under konstant opblanding og homogenisering under den voldsomme varmeproduktion i Jordens indre.

Isua suprakrustalerne rummer også lag af sediment, som er aflejret i perioder med sparsom vulkanisme. De mest udbredte sedimenter er bandede jernmalme. De er dannet som kemiske udfældninger fra havvandet. Bandede jernmalme kendes kun fra Prækambrium. Man mener, et deres dannelse er betinget af tilstedeværelsen af en iltfattig atmosfære.

Endvidere findes sjældne og tynde lag af skifer, som oprindeligt er aflejret gennem meget lang tid ved



Velbevarede sedimentlag fra Isua. De mørke lag er aflejret langsomt og over lang tid som fint ler på oceanbunden, mens de lyse lag er afsat af mudderstrømme fra undersøiske vulkaner.



Kulpartikler fra de mørke lag i Isua havbundssedimenterne. De 0,02-0,05 mm store korn af grafit er dannet ud fra organisk materiale opbygget af plankton. De repræsenterer dermed de ældste spor af liv på Jorden.

bundfældning af ler i oceanet. De fine lerlag er med mellemrum afbrudt af aflejringer dannet af mudderstrømme, som er hvirvlet ned af undersøiske vulkaner, eller af fine vulkanske askelag, som er drysset til bunds.

Skiferlagene er farvet sorte af fint fordelt støv af kulstof, som er aflejret sammen med leret. Kulstoffet har et markant lavt forhold mellem isotoperne kulstof-13 og kulstof-12 i forhold til Jordens gennemsnitsværdi. Dette kan kun skyldes at kulstoffet stammer fra levende organismer. Alt tyder på, at kulstofpartiklerne er rester af plankton – muligvis blå-grønalger – som har levet i de øverste meter af havet og udnyttet solens energi til fotosyntese.

Ved at studere Isuas sedimenter kan vi konstatere, at livet allerede havde indtaget oceanerne på Isua-tid, og at levende organismer sandsynligvis have overtaget kontrollen med atmosfærens sammensætning og etableret et stabilt klima på Jorden. Tilstedeværelsen af liv, som gennem omsætning af kuldioxid har stabiliseret atmosfæren meget tidligt i Jordens historie, kan være en af årsagerne til, at Jorden er bevaret som en vandrig oase, til forskel fra søsterplaneterne Mars og Venus.

TONALIT dagens bjergart

Bjørn Hageskov

Bjergartsnavnet tonalit stammer fra en granit i de italienske alper (tonale passet), der siden 1864 har været kendt som tonale granitten. I den bjergartsklassifikation, vi bruger i dag, udgør tonalit sammen med granodiorit og granit de overordnede medlemmer i granit-familien (= granitoiderne). Disse magmatiske dybbjergarter (plutonitter) karakteriseres af høje indhold af kvarts og feldspat (alkalifeldspat + plagioklas), som almindeligvis udgør mere end 70% af bjergartens volumen. Kvarts skal udgøre mindst 20% af det totale kvarts+feldspat indhold for, at bjergarten overhovedet kan betegnes en granitoid.

Tonalit er en granitoid bjergart, hvor stort set hele feldspatindholdet udgøres af plagioklas (Ca-Na feldspat) idet højst 10% af den totale feldspatmængde må være alkalifeldspat (K-Na feldspat). Til sammenligning udgør plagioklas henholdsvis 90-65% og mindre end 65% af feldspatmængden i granodiorit og granit. Tonalit fremtræder almindeligvis som en mellem- til mørkegrå bjergart, der præges af sit plagioklas indhold og et ofte ret højt (20-30%) indhold af mørke mineraler (hornblende og biotit).

Tonalit er en ganske almindelig intrusiv bjergart, som ses i dybere erosionssnit i subduktions-relaterede bjergkæder og vulkanske buer (øbuer såvel som kontinentale buer) af alle aldre. Bjergarten er særdeles udbredt i de urgamle Arkæiske (ældre end 2500 Mill. år.) jordskorpeområder.

Tonalittiske magmaer er først og fremmest knyttet til subduktionszone miljøet, hvor de kan dannes ved: 1) processer som involverer opsmeltning af den astheno-



Nærbillede af tonalit.

sphæriske kappekile, dvs. den kileformede kappe-masse, som ligger mellem den neddykkende lithosfæreplade og overridende lithosfære, 2) opsmeltning af den basaltiske oceanbundsskorpe i en neddykende plade, og 3) ved opsmeltning af basaltisk materiale beliggende dybt (>50 km) i en usædvanlig tyk kontinent- eller øbueskorpe beliggende over en subduktionszone.



Tonalitisk gnejs dannet ud fra en magmatisk tonalit med nu langstrakte indeslutninger (xenolither) af forskelligt materiale, samt en større xenolith af en året gnejs, som det tonalitisk magma oprindeligt intruderede. Mange tonaliter, som den på billedet, ses idag som bjergarter, der har været udsat bjergkædedeformation og metamorfose. En af årsagerne til dette er, at tonalit typisk dannes i forbindelse med det pladetektoniske subduktionssceneri, hvor de bjergkædedannende processer også udspiller sig.