

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.

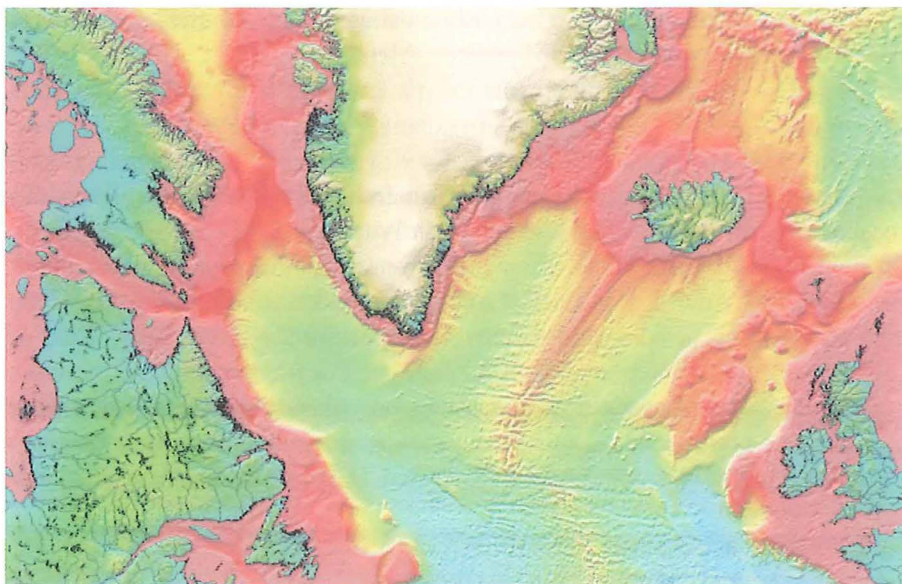
En mindre del af Jordens vulkanisme foregår i såkaldte hotspots, der optræder lokalt inde midt på lithosfærepladerne (kontinentale og oceaniske), eller mellem dem. De største hotspots, som Hawaii og Island, er præget af hyppig vulkansk

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.

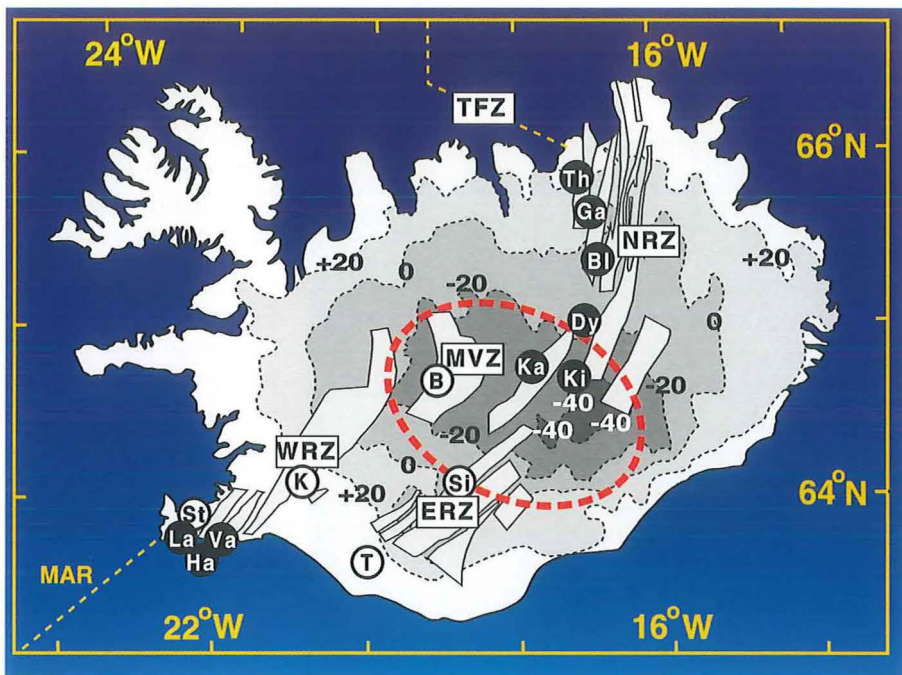
er størknet næsten øjeblikkeligt under kontakt med store mængder smeltevand fra iskappen. Gasbobler i magmaet er således indefrosset i glasserne, hvis amorfe struktur gør dem uigennemtrængelige selv for He (diffusion). Derfor kan original magmatisk gas ofte ekstraheres fra disse glasser ved blot at knuse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

Et andet prøveudvælgningskriterie 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 (af lange parallelforskydede felter), seismisk anomali (tyk stippel) og tyngdekonturer i mGal (tynd stippel). Bemærk tyngde-Bull's eye (< -40 m 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 = Mid-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

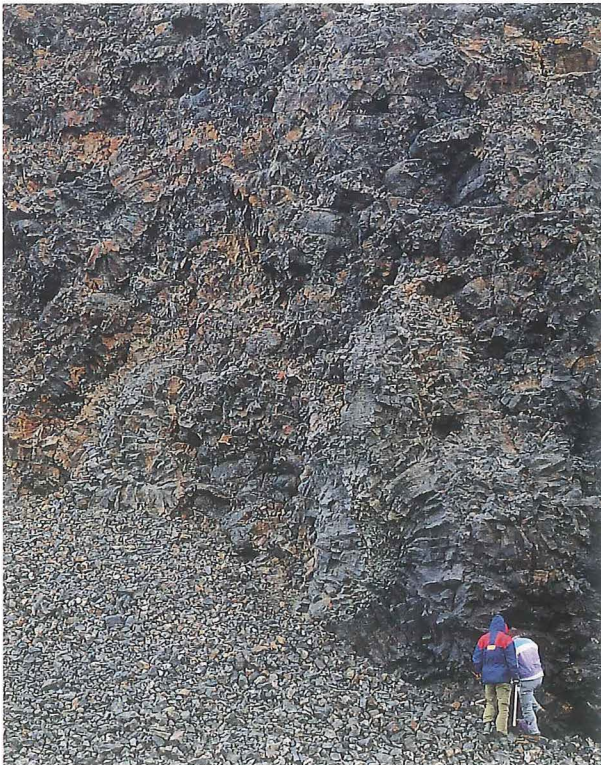
De nye data viser for første gang en klar nord-syd gradient i $^3\text{He}/^4\text{He}$ -værdier langs med den nordlige riftzone. Disse korrelerer omvendt med gradienten i de seismiske hastigheder og tyngdegradienten. Således har prøver fra den nordlige del af riftzonen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -værdier, 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.

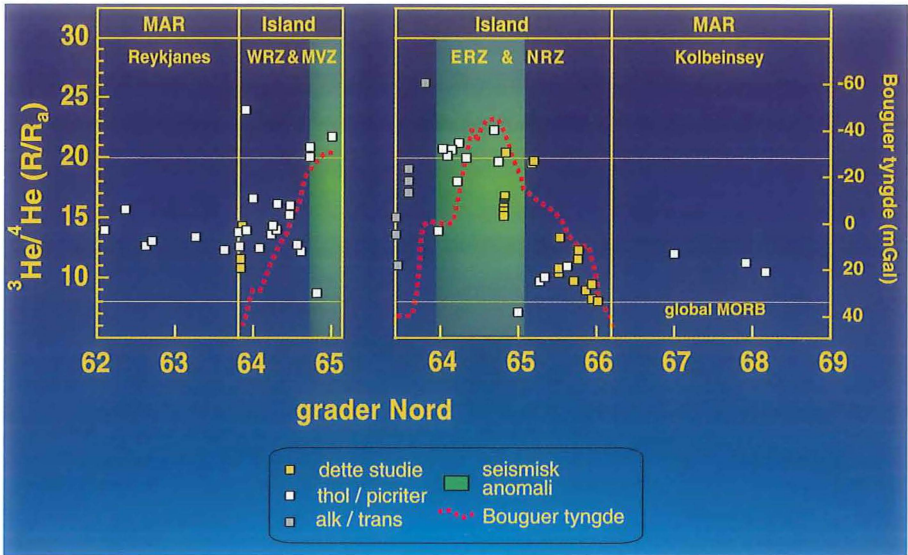
Dette og tidligere studier af He-isotopforhold i hotspot-basalter viser endvidere, at $^3\text{He}/^4\text{He}$ korrelerer dårligt eller slet ikke, med Sr-, Nd-, Pb- isotopforhold. Ej heller med de sporelementforhold, der sædvanligvis anvendes som indikatorer for opsmeltningprocesser eller for, hvorvidt 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.

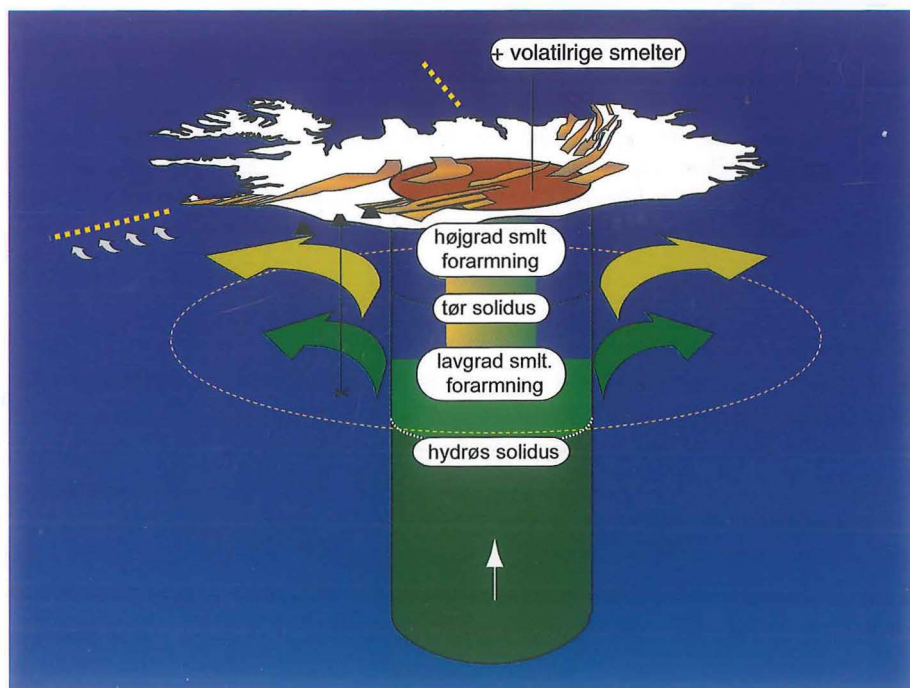
Idet kappemateriale indeholder en lille mængde vand, kan den allerførste opsmeltning ($\ll 1\%$) foregå på meget stor dybde (>125 kilometer). Smeltedannelsen tager først rigtigt fat, når kappematerialet når op til 125 kilometers dybde - såkaldt tør solidus, hvor der ikke behøver at være vand tilstede 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**