

VARV

NR. 4

BLADET MED DE ÆLDSTE NYHEDER

2002



FRA URBAN HJÄRNE TIL ALBERT STRECKEISEN

BLYISOTOPER

GEOCENTER KØBENHAVN

VULKANERNE I DET ARKTISKE OCEAN

Forsidebillede: Historisk møde mellem 3 forskningsisbrydere i det Arktiske Ocean d. 23. august 2001. I forgrunden det svenske Oden, bagved det tyske Polarstern og i baggrunden USCGC Healy.

Forfatternes adresser:

Henning Sørensen og Robert Frei: Geologisk Institut, Østervoldgade 10, 1350 Kbh. K.
Martin Ghisler GEUS, Østervoldgade 10. 1350 Kbh. K.
Jörn Thiede, Christian Haas, Wilfried Jokat: AWI, Bremerhaven
Richard Mühe: Institut für Geowissenschaften, CAU, Kiel
Jonathan Snow: MPI für Chemie, Mainz
Robert Spielhagen: GEOMAR, Kiel



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, Knud Binzer, Bjørn Buchardt, Bjørn Hageskov,
Henrik Foug, Mikkel Hede, Arne Thorshøj Nielsen, Mikael Pedersen
(webmaster) 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: Dansk Erhvervstryk A/S

VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 140 kr i abonnement for 2003.
Abonnement kan tegnes ved at indsende beløbet til VARV, postgiro 9 06 88 80,
eller 160 SEK til VARV's svenske postgirokonto: 4388-5, eller 160 NOK til V
VARV's norske postgiro: 7877.08.15672.

På VARV's hjemmeside www.varv.dk er det bl.a. muligt at søge i VARV'S data-
base, hvor reference til alle artikler er lagt ind, ligesom der er et lille resume af artik-
lerne. Der er også oplysninger priser på gamle numre, særnumre etc. som sammen
med tegning af abonnement kan bestilles on-line.

Adresseændringer bedes meddelt 

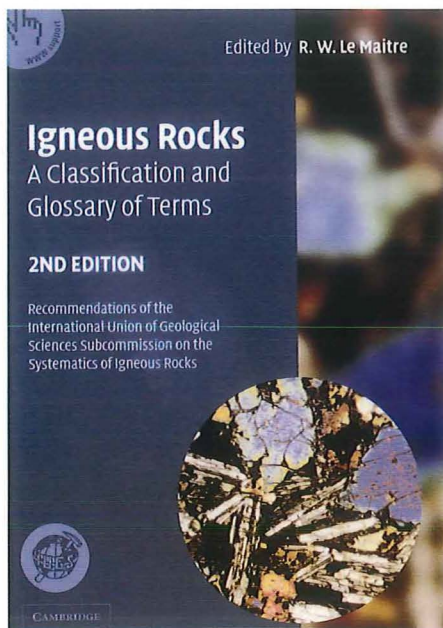
©  eftertryk af tekst og billeder kan kun ske efter aftale.

ORDEN I MAGMABJERGARTERNE - FRA URBAN HJÄRNE TIL ALBERT STRECKEISEN

Henning Sørensen

I april 2002 udkom på Cambridge University Press bogen 'Igneous Rocks - a classification and glossary of terms' (236 sider, £ 45). Den er redigeret af R.W.LeMaitre og har 14 medforfattere, deriblandt under tegnede. Der er tale om anden, reviderede udgave af et værk, som først udkom i 1989. Det indeholder de anbefalinger vedrørende magmabjergarternes nomenklatur og klassifikation, som er udarbejdet af en subkommission nedsat af den Internationale Geologiske Union (IUGS). Initiativtageren til dette arbejde var schweizeren Albert Streckeisen (1901-1998).

Jeg har netop i en artikel i GeologiskNyt nr. 4, 2002, givet et rids af baggrunden for nedsættelsen af Subkommissionen og af arbejdets forløb, hvortil der henvises. Her skal jeg beskæftige mig med nogle af de problemstillinger, Subkommissionen har arbejdet med og give en kortfattet præsentation af klassifikationssystemet.



LIDT FORHISTORIE

Det er blot ca. 200 år siden, at man begyndte at få overblik over, hvad bjergarter er for noget, og hvordan de kan inddeles. Før den tid blev mineraler, bjergarter, forsteninger og andre af naturens luner behandlet i en sand forvirring. Et eksempel er Urban Hjärnes bog 'En kort Anledning till Atskillige Malm- och Bergarters/ Mineraliers/Wäxters/ och Jordelags/ samt flere sällsamme Tings efterspöriande och angiftvande/', som udkom i Stockholm i 1694. Første del af bogen beskriver hovedmiljøerne vandet og jord og landskap i gemeen. Så følger korte afsnit om Mull og Jordarter, Gråberg og andre slag Berg/Sand, allehande gemena Stenar, allahande nyttiga gemena Stenar, Stenar som har någon serdeles Figur, Stenar

som findes i dyr, Metaller, Halftva Metaller/ eller Bergarter, om Saltlag, om sulfuriske Arter og Swafwelslag. Det viser den samlede daværende viden i en vis orden på 23 små sider.

Den første på videnskabelige principper baserede bjergartsklassifikation skyldes A.G. Werner (1749-1817) i Freiberg. Den kom i 1787, men har kun svag lighed med nutidens viden om emnet. På det tidspunkt kom der imidlertid gang i bjergartsbeskrivelsen og opstillingen af nye bjergarter. Et eksempel er J. Pinkerton, som i 1811 i London udgav værket 'Petralogy, a treatise on rocks', bind. I og bind II på henholdsvis 599 og 654 sider. Heri blev præsenteret 24 nye bjergarter. (Det skal her forudskikkes, at kun en af disse bjergarter, granitoid, indgår i Subkommissionens anbefalede bjergartsnavne).

Først i 1857 blev bjergarter inddelt i magmatiske, sedimentære og metamorfe af H. Coquand. Derefter gik det stærkt, ikke mindst på grund af Henry Sorby, som i 1849 fremstillede de første tyndslib af bjergarter. Man kunne nu i beskrivelsen af bjergarter bygge på forekomstmåden i naturen, mineralindholdet og den kemiske sammensætning. Dette satte skub i beskrivelsen af nye bjergarter,

opstillingen af bjergartssystemer og i udviklingen af såvel petrografi som petrologi som egentlige videnskaber.

Et godt eksempel er nordmanden W.C. Brøgger (1851-1940), som i en lang række monografier beskrev Oslo-området geologi, herunder dets petrologi. Han opstillede 65 nye bjergarter, de fleste navngivet efter de lokaliteter, hvor han studerede dem. De mest kendte eksempler er larvikit efter Larvik og nordmarkit efter Nordmarka.

Brøgger opstillede som den første carbonatit som en magmabjergart på grundlag af undersøgelser i Fen-området sydvest for Osloområdets bjergarter. Flot set.

Seh Kort

Andledning

Till

Bestillige Malm- och Bergarters/ Mineraliers
Vårters/ och Jordbeslags/ samt flere sållsamme
Tings efterspörande och angifvande/

Efter

Kongl. May:te

Allernådigste Behag

Ställt till

Alla uti Riket/ som kunna hafwa Lust at låta i
Daggluset komma/ hwad som i hwar och
en Ort kan finnas.
ANNO 1694.

STOCKHOLM,

Trykt uti Kongl. Bocktryckeriet/ hos Sal. Wankijfs Andra.

Forsiden af Urban Hjærnes bog om bjergarter fra 1694.

Et andet eksempel er franskmænden Alfred Lacroix (1861-1948), som sad i det Mineralogiske Museum i Paris. Hertil sendte franske geologer og andre prøver af ukendte geologiske materialer fra alle dele af det da vidtstrakte franske kolonirige. Lacroix undersøgte disse prøver og opstillede på grundlag heraf og på egne omfattende geologiske feltundersøgelser hele 70 nye bjergarter, ofte med malabariske navne som f. eks. anabohisit, fasikbikit og ampasimenit, bl.a. opkaldt efter lokaliteter på Madagaskar.

Resultatet var, at der blev opstillet en syndflod af bjergartsnavne, ofte bjergarter, som allerede var beskrevet under et andet navn. Samme bjergart kunne derfor hedde forskelligt i forskellige lande.

Der blev derfor gjort en række forsøg på at bringe orden i tingene. Jeg skal som eksempel nævne amerikaneren Albert Johannsen, der opstillede et system til klassifikation af magmabjergarterne publiceret i fire informative bind fra 1920 til 1938. Dette er en af de vigtigste kilder til oplysninger om magmabjergarter og kan meget varmt anbefales. Anbefalingen gælder dog ikke Johannsens klassifikationssystem, der bestod af fire klasser inddelt i 4 ordener, som igen var inddelt i 25 familier. Dette komplicerede system skabte behov for systematiske navne, Johannsen opstillede 134 sådanne.

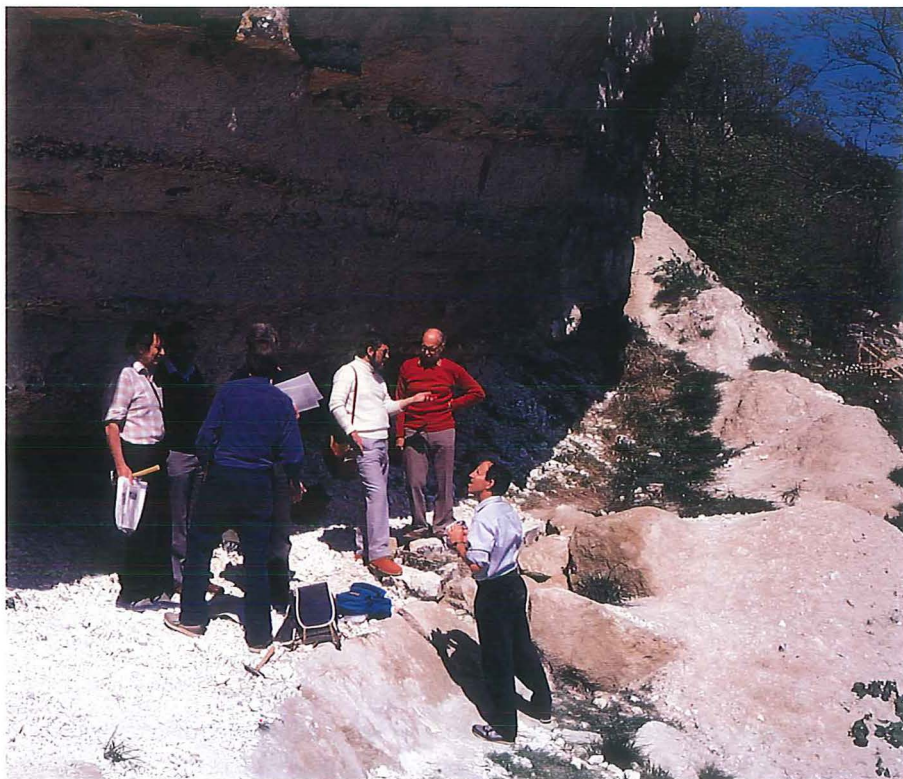
ALBERT STRECKEISENS INITIATIV - IUGS'S SUBKOMMISSION

Det virvar, som efterhånden prægede dette område, inspirerede Albert Streckeisen til at gå i gang med en systematisk analyse af magmabjergartsklassifikationen. Han udsendte et spørgeskema og publicerede resultaterne af denne undersøgelse i et debatoplæg i 1965. Det gav anledning til, at IUGS nedsatte en petrologisk kommission og under den en subkommission, som skulle se på magmabjergarterne.

Subkommissionen indledte arbejdet i 1972 og holdt sit indtil videre sidste møde i 1999. Streckeisen var formand indtil 1980.

Albert Streckeisen på ekskursion til vulkanen Kaiserstuhl i Sydtyskland under Subkommissionens møde i Freiburg im Br. i 1986.





Subkommissionen lagde altid, når det var muligt, en ekskursion ind i mødeprogrammet. Under mødet i København i 1988 besøgte Kridt-Tertiær-grænsen på Stevns Klint under Hans Jørgen Hansens kyndige vejledning. På billedet ses som nr. 2 fra venstre i skyggen og med solbriller Roger LeMaitre, redaktør af Subkommissionens bog om magmabjergarter; til højre med rød trøje Mike LeBas, Subkommissionens formand 1984-2001 og nederst til højre Jörg Keller, formand for den petrologiske kommission siden 1989.

Subkommissionen har registreret 1637 navne på magmabjergarter og begreber vedrørende disse. De er alle opført i et glossarium i den ovennævnte bog med karakterisering af hvert enkelt navn. Mens Johannsens og andre tilsvarende klassifikationssystemer satte en ære i at finde en plads til alle beskrevne bjergarter, besluttede Subkommissionen at foretage en sortering. Kun 282 af de mange navne indgår i dens klassifikationssystem. Af de 282 har Streckeisen opstillet 75 og Subkommissionen 35 bjergartsnavne for at få udfyldt alle pladserne i systemet på en logisk måde. I næste afsnit beskrives hovedtrækkene af systemet, som er hierakisk opbygget, dvs. at bjergarter klassificeres i en bestemt rækkefølge.

IUGS'S KLASSIFIKATIONSSYSTEM

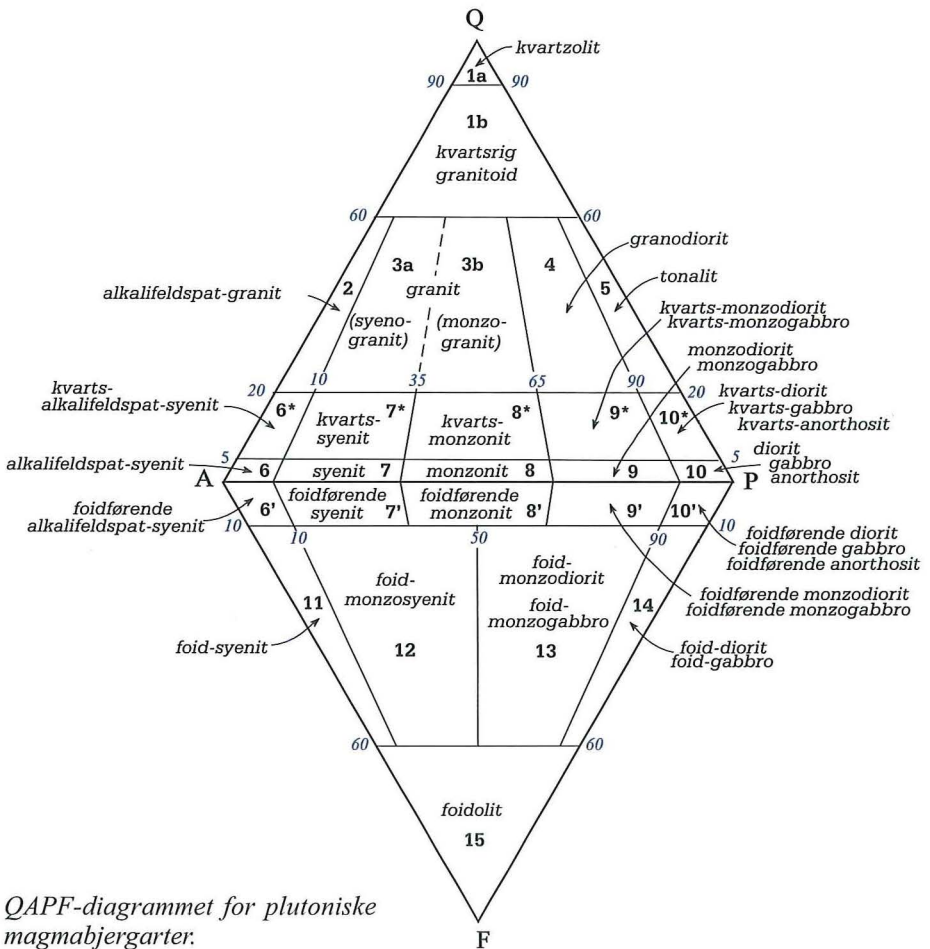
Først udskilles de pyroklastiske bjergarter, dvs. de løse vulkanske udbrudsprodukter. Dernæst udskilles bjergarter med specielle karaktertræk i rækkefølgen: carbonatitter, melilithholdige bjergarter, kalsilitholdige bjergarter, kimberlitter, lamproitter, leucitholdige bjergarter, lamprofyrer og charnockitter. For hver af disse grupper er foreslået specielle klassifikationssystemer. De nævnte bjergarter er så specielle, at de vanskeligt kan indarbejdes i et system, som gælder for det store flertal af bjergarter. Og de er forholdsvis lette at identificere på grund af karakteristiske mineraler og teksturer. Et eksempel: carbonatitter defineres som magmabjergarter, der indeholder mere end 50% carbonatmineraler, først og fremmest calcit.

Tilbage er nu det store flertal af magmabjergarter. De inddeles i plutoniske og vulkanske bjergarter på grundlag af kornstørrelse. Plutoniske bjergarter er dannet på så stor dybde, at de er størknet langsomt og er blevet grovkornede. Definitionen er derfor, at bjergarter, hvor mineralerne kan skelnes med det blotte øje, er plutoniske, de øvrige vulkanske. Finkornede bjergarter kan ganske vist dannes i plutonisk miljø, men man kan ikke se på et håndstykke, om en meget finkornet bjergart er vulkansk eller plutonisk. Dertil behøves viden om bjergartens forekomstmåde i naturen. I øvrigt er der selvfølgelig en gradvis overgang fra vulkansk til plutonisk miljø, når man i et vulkanområde bevæger sig fra overfladen mod dybet. Man har anvendt betegnelsen hypabyssal for denne overgang, en term som dog ikke er med blandt de af Subkommissionen anbefalede betegnelser. Finkornede bjergarter i plutonisk miljø foreslås angivet med forstavelsen mikro- som f. eks. mikrosyenit.

Klassifikationen af plutoniske bjergarter består af tre dele: 1. Bjergarter hvor begrebet M er mindre end 90. M står for det modale indhold af mafiske, dvs. mørke mineraler som olivin, pyroxen, amfibol, glimmer, jern-titan-oxidmineraler, m.fl. (modal vil sige mineralindhold, oftest angivet som rumfangsprocenter). 2. Bjergarter, hvor M er lig med eller større end 90, de såkaldte ultramafiske bjergarter. 3. Et forenklet diagram til anvendelse i de tilfælde, som f. eks. under feltarbejde, hvor en bjergarts mineralindhold ikke kan bestemmes nøjagtigt.

QAPF-DOBBELTTREKANTEN

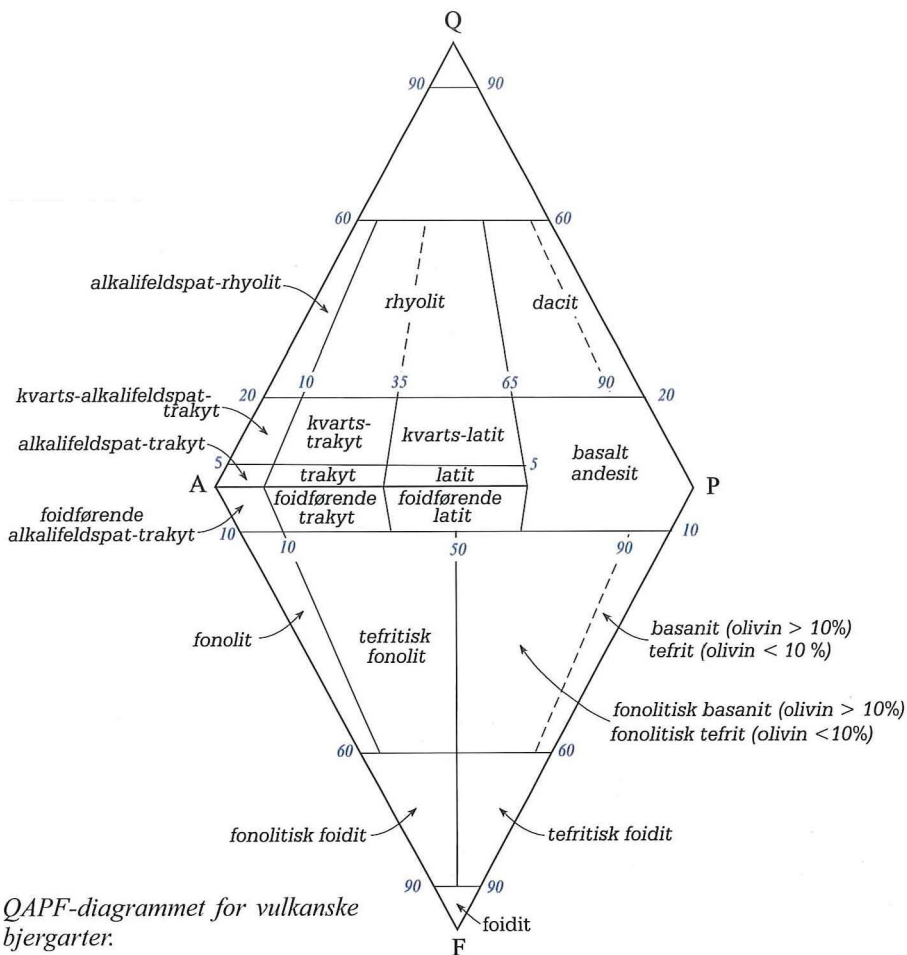
Grundelementet i klassifikationen af plutoniske magmabjergarter er den efterhånden velkendte QAPF-dobbelttrekant (Q = quartz, kvarts; A = alkalifeldspat inklusive albit (natrium)- delen af plagioklasfeldspat med fra 0 til 5 % anorthit (calcium-plagioklas); P = plagioklas fra 5 til 100 % anorthit (og skapolit); F = foider eller feldspatoider). Diagrammet benyttes for bjergarter med op til 90 % M, dvs. med helt ned til 10 % af QAPF mineraler, som er



QAPF-diagrammet for plutoniske magmabjergarter.

bjergarters lyse eller felsiske mineraler. Diagrammet kendes Jordan over som Streckeisen-diagrammet, men det skal understreges, at han ikke har hittet på det, men har overtaget det fra sine forgængere, som f. eks. ovennævnte Johannsen.

Når en bjergart skal indtegnes i QAPF-diagrammet, skal indholdet af QAPF mineraler omregnes til 100 %. De udgør sædvanligvis kun en del af bjergarterne, resten udgøres af M mineraler og accessoriske mineraler. Det skal her huskes, at Q og F ikke kan findes sammen i en bjergart, de vil i givet fald reagere med hinanden og danne feldspat. Man skal altså efter omstændighederne omregne $Q + A + P$ eller $F + A + P$ til 100 %. Når en given bjergart dernæst er indtegnet i diagrammet, angiver navnet på det felt, den findes i, dens 'root name', rodnavn, som ikke altid vil være det samme som bjergartens rigtige navn. Falder bjergarten f. eks. i felt 7 er dens rodnavn syenit, hvilket også er det rigtige navn. Ser vi på



QAPF-diagrammet for vulkanske bjergarter:

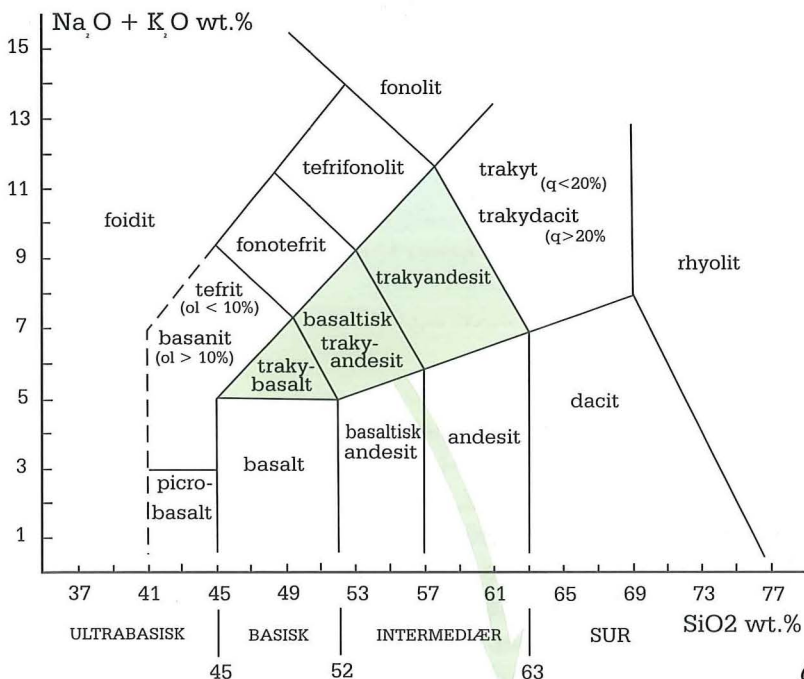
felt 10 er angivet navnene diorit, gabbro og anorthosit. Det rigtige navn finder man ved at se på andre parametre, som f. eks. M. Er M mindre end 10, dvs bjergarterne består af mere end 90 % plagioklas, kaldes bjergarten anorthosit. Diorit og gabbro adskilles ved hjælp af plagioklasens anorthitindhold, er det større end 50 er det en gabbro, mindre end 50 en diorit. Men derved er en gabbro ikke endeligt beskrevet, det er jo en bjergart som består af plagioklas samt et eller flere mafiske mineraler, vigtigst er clinopyroxen, orthopyroxen, olivin og amfibol. Der er derfor udarbejdet hjælpediagrammer til fastlæggelse af det korrekte navn.

Foid-syenit, som er rodnavnet for bjergarter i felt 11 er et eksempel på et navn, som aldrig vil blive brugt om en konkret bjergart. Er feldspatoidmineralet nefelin kaldes bjergarten nefelin-syenit, er det sodalit fås en sodalit-syenit.

For plutoniske bjergarter med M større end 90 benyttes særlige diagrammer til klassifikation af de forskellige ultramafiske bjergarter, som f. eks. peridotit og dunit.

Når vi kommer til de vulkanske bjergarter er forholdene mere komplicerede. Man har vedtaget at bruge QAPF-diagrammet overalt hvor det er muligt, dvs. hvor bjergarternes mineralindhold kan erkendes ved undersøgelse af tyndslib. I de tilfælde, hvor bjergarterne er meget finkornede eller består af vulkansk glas, således at en modalanalyse ikke kan gennemføres, har Subkommissionen efter et større udredningsarbejde valgt at bruge det såkaldte TAS diagram til fastlæggelse af bjergarternes rodnavn.

Udvælgelsen af dette diagram var baseret på jonglering med 24.000 analyser af vulkanske bjergarter i mange forskellige diagrammer. TAS står for total alkali silica diagram, som er et diagram med en x og en y akse. Langs x angives bjergartens indhold af SiO_2 (silica på engelsk) som vægtprocent, langs y-aksen angives summen af Na_2O og K_2O , begge som vægtprocenter. Man skal altså



Øverst TAS-diagrammet for vulkanske bjergarter med vægtprocent (wt.%) SiO_2 som x-akse og summen af vægtprocenter af Na_2O og K_2O som y-akse. Nederst en yderligere opdeling af de med grønt markerede felter i TAS-diagrammet.

| | | | |
|---|-----------------------|------------------------|--------------|
| yderligere opdeling af grønne felter | trakybasalt | basaltisk trakyandesit | trakyandesit |
| $\text{Na}_2\text{O} - 2,0 \geq \text{K}_2\text{O}$ | hawaiiit | mugearit | benmoreit |
| $\text{Na}_2\text{O} - 2,0 < \text{K}_2\text{O}$ | kaliurigt trakybasalt | shoshonit | latite |



Larvikitbruddet ved Tjølling i Sydnorge. Larvikit sprænges ud i store massive blokke uden sprækker og skæres op i tynde plader, der poleres og anvendes som facadesten.

have en kemisk analyse for at kunne klassificere ved hjælp af dette diagram. Det giver som nævnt bjergarters rodnavn og må i en række tilfælde suppleres med andre diagrammer, når det korrekte navn skal bestemmes.

Det tredje hoveddiagram, som er forenklede udgaver af QAPF-diagrammerne for plutoniske og vulkanske bjergarter, skal der ikke ofres plads på, det er simple diagrammer til brug for en foreløbig klassificering udført under feltarbejdet.

NAVNGIVNING AF BJERGARTER

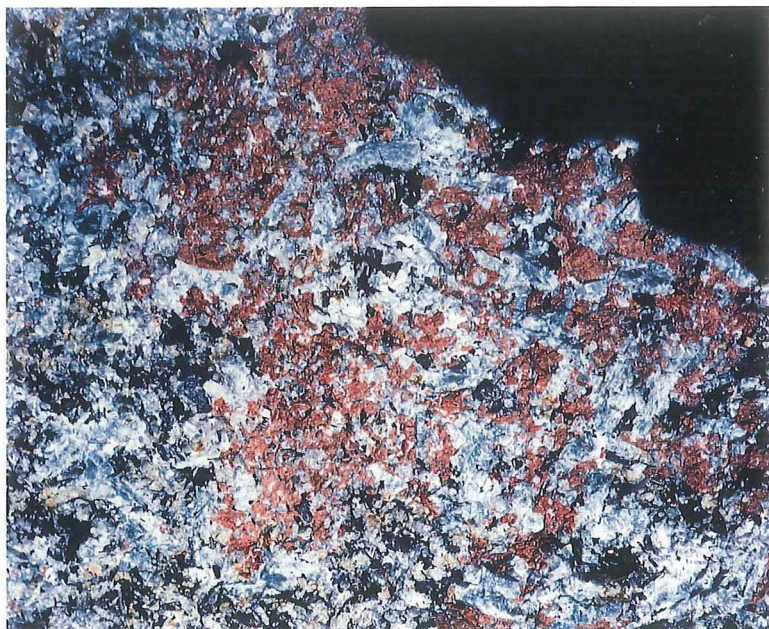
Af de 316 af Subkommissionen anbefalede bjergartsnavne og begreber er de 179 rodnavne, 103 udfyldende navne som f.eks. ovennævnte nefelin-syenit, og 34 vedrører bjergartsbeskrivende udtryk som leukokrat, melanokrat, ultramafisk osv. Disse tre begreber fortæller om bjergarter er lyse, mørke eller meget mørke. Ved udvælgelsen af de anbefalede navne er lagt vægt på, at veletablerede og entydige navne anvendes overalt, hvor det er muligt. Det gælder navne som granit, syenit, gabbro, rhyolit, trachyt og basalt. Men for at dække hele spektret af kombinationsmuligheder i hoveddiagrammerne har det som allerede nævnt været nødvendigt at konstruere logiske navne. Streckeisen bidrog med 75 navne, Subkommissionen med 35. Navnene konstrueres hovedsagelig ved at kombinere de tilgrænsende felter i diagrammerne, som f. eks. basaltisk andesit, eller ved at sætte et mineralnavn foran hovedbegrebet, som f. eks. analcim-gabbro. Allerede



Poleret flade af larvikit fra Tjølling. Det karakteristiske blå farvespil i feldspatkrystallerne ses tydeligt.

Johannsen konstruerede den slags navne og 15 af hans 134 bjergartsnavne er medtaget i det nye system.

Af IUGS-systemets 1.637 navne og begreber anbefales som nævnt 316. Herudover angives, at 312 bjergartsnavne er af lokal betydning. Et eksempel er Brøggers larvikit fra Osloområdet. De bjergarter, som sammensætter de store larvikitmassiver, varierer fra syenit til monzonit, dvs. fra bjergarter med klar dominans af alkalifeldspat til bjergarter med et større indhold af plagioklas. En petrografisk beskrivelse, som kun baseres på de korrekte navne syenit og monzonit, vil blive næsten umulig at gennemføre, idet der er alle mulige overgange mellem de syenitiske og monzonitiske varieteter. Derfor er det en betydelig forenkling kun at anvende ét navn: larvikit. Et andet eksempel er bjergarten naujait fra Ilímaussaq-komplekset i Sydgrønland. Den er meget rig på sodalit og kunne derfor betegnes sodalitolit, navnet for sodalitrige plutoniske bjergarter. Men den har også en helt speciel tekstur og et karakteristisk indhold af sjældne mineraler. Skal det udtrykkes efter principperne i IUGS-systemet, fås et meget langt navn, noget i retning af poilitisk eudialyt-arfvedsonit-mikroclin-sodalit-syenit. Det er da meget lettere kun at sige naujait, som per definition omfatter såvel tekstur som mineralindhold.



Bjergarten naujait fra Ilimaussaq-komplekset i Sydgrønland. Små grønne korn af mineralet sodalit er indlejret i store korn af mineralerne hvid feldspat, rød eudialyt og sort arvedsonit og ægirin.

BJERGARTSNAVNES TOPTI-LISTE

Til slut kan det være interessant at se, hvor mange af de navne, som storproducenterne af bjergartsnavne har opstillet, der er blevet anvendt i IUGS systemet. Her følger bjergartsnavngivernes topti liste:

| | | | | |
|----------------------------|------------------|-----|----------------|----|
| 1. A. Johannsen | foreslåede navne | 134 | heraf genbrugt | 15 |
| 2. A. Streckeisen | | 97 | | 75 |
| 3. A. Lacroix | | 70 | | 6 |
| 4. W.C. Brøgger | | 65 | | 9 |
| 5. Subkommissionen | | 35 | | 35 |
| 6. H. Rosenbuch | | 34 | | 13 |
| 7. J.P. Iddings | | 27 | | 4 |
| 8. H.S. Washington | | 27 | | 1 |
| 9. F.Yu. Loewinson-Lessing | | 26 | | 0 |
| 10. J. Pinkerton | | 24 | | 1 |

Det er ikke overraskende, at Subkommissionens ankermand Albert Streckeisen og Subkommissionen selv har de største succesrater. Fremtiden må vise, om det

af Subkommissionen foreslåede klassifikationssystem vil blive afløst af andre systemer og i så fald, hvor mange af de her opstillede navne der vil overleve. Det er i denne sammenhæng interessant at se, at kun 15 af de 134 navne, som Albert Johannsen konstruerede til sit system efter nogenlunde samme principper som de af Subkommissionen anvendte, har kunnet genbruges.

Men, nu findes et gennemarbejdet og testet klassifikationssystem og en nomenklatur, som, hvis anbefalingerne bliver fulgt Jorden over, i hvert fald på det område vil bidrage til at formindske den globale forvirring.

HVORDAN ARBEJDER MAN MED STRECKEISEN-DIAGRAMMET

Som beskrevet i hovedteksten er diagrammet opbygget af en ligesidet dobbelttrekant, dvs. to trekanter med en fælles side. Den ene trekant har mineralerne kvarts (Q), alkalifeldspat (A) og plagioklas (P) placeret i hjørnerne, den anden trekant har foidminerale (F), alkalifeldspat (A) og plagioklas placeret i hjørnerne. Det er vigtigt at huske, at enten er der kvarts, eller også er der foidminerale i en bjergart (eventuelt ingen af dem). Det betyder, at kun den ene trekant bliver brugt for en given bjergart. Bjergarter med mere end 90% mørke mineraler kan ikke navngives efter Streckeisen-diagrammet.

Et trekanthjørne i diagrammet repræsenterer 100% af det mineral, der befinder sig i det pågældende hjørne, dvs. har man f.eks. en bjergart med 100% kvarts, befinder den sig i Q-hjørnet. Har man en bjergart med 0% kvarts, befinder den sig et sted på linien modsat Q-hjørnet, dvs. at den kun vil indeholde plagioklas og/eller alkalifeldspat. Tilsvarende overvejelser gør sig gældende for plagioklas og alkalifeldspat. Vender vi tilbage til eksemplet med kvarts, vil en bjergart med 20% kvarts befinde sig på en linie, der er parallel med 0%-linien, og som ligger 1/5 'oppe' mellem Q-hjørnet og 0%-kvartslinien. Tilsvarende gælder for de øvrige mineraler.

Den nøjagtige placering af en bjergart i Streckeisen-diagrammet

Proceduren er som følger: Mineralindholdet bestemmes så nøjagtigt, det er muligt. De mørke mineraler 'trækkes' ud og bruges ikke ved navngivningen ud fra dette diagram. De lyse mineralers procentindhold regnes om, således at summen bliver 100 (se tabel). Derefter placerer man rette linier i diagrammet svarende til de lyse mineralers %-indhold, se figuren. Dvs. at kvartsindholdet angives med en linie, der er parallel med 0%-kvartslinien, men udfør den korrekte %-sats. Tilsvarende med alkalifeldspat og plagioklas. De tre linier skærer hinanden i et fælles punkt, som angiver placeringen af bjergarten i diagrammet. Tilbage er så at finde ud af, hvad feltet det fælles punkt befinder sig i, hvorefter bjergartens rodnavn er fundet.

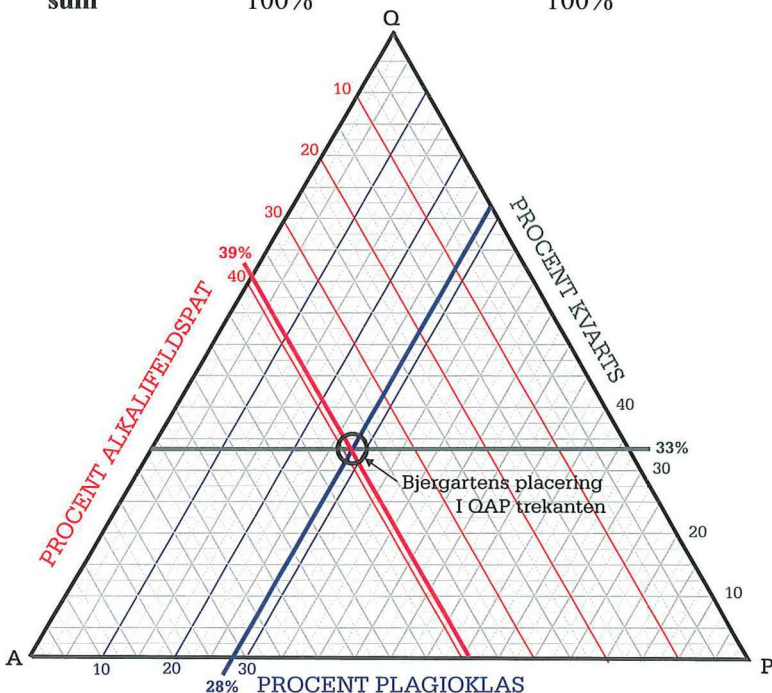
Hurtig navngivning ved hjælp af Streckeisen-diagrammet

Diagrammet kan uden videre anvendes til feltbrug - dog med nogen varsomhed -

idet det kan være vanskeligt nøjagtigt at bestemme mængden af mineraler i en bjergart. Proceduren vi da være følgende for en bjergart, der befinder sig i QAP-trekanten: Er der en del kvarts i bjergarten - hist og her og allevegne - vil kvartsindholdet ofte være mellem 20 og 60%. Er der kun lidt kvarts eller intet, vil der være mellem 0 og 20%. Bjergarten er da placeret i diagrammet med hensyn til kvartsindhold. Dernæst vurderes mængdeforholdet mellem plagioklas (ofte hvid eller grålig) og alkalifeldspat (ofte rødlig). Er der lige store mængder af de to feldspatter, vil bjergarten ligge på en linie, der begynder i kvartshjørnet, og som deler diagrammet i to lige store halvdele. Afhængig af kvartsindholdet er bjergarten da en granit eller en monzonit. Er der mere alkalifeldspat end plagioklas, vil bjergarten rykke mod venstre, hvor langt afhænger af dominansen af alkalifeldspat. Er der mere plagioklas end alkalifeldspat, rykker bjergarten til højre.

Eksempel på anvendelse af Streckeisen-diagrammet

| Mineraler | Sammensætning | Omregnet |
|----------------|---------------|-------------|
| kvarts | 30% | 33% |
| alkalifeldspat | 35% | 39% |
| plagioklas | 25% | 28% |
| biotit | 10% | _____ |
| sum | 100% | 100% |



VARV priser 2003

| | | |
|---|-----------------|---------------|
| Årgang 1964 -1979 | pr. årg. 10 kr | pr. nr. 5 kr |
| Årgang 1980 -1985 | pr. årg. 20 kr | pr. nr. 10 kr |
| Årgang 1986 -1990 | pr. årg. 50 kr | pr. nr. 25 kr |
| Årgang 1991 -1994 | pr. årg. 75 kr. | pr. nr. 25 kr |
| Årgang 1964 -1985 samlet (- 1964,1 og 1965,3) | 200 kr | |
| Årgang 1986 -1994 samlet | 450 kr | |
| Årgang 1995 | årg. 100 kr | pr. nr. 30 kr |
| Årgang 1996 | årg. 100 kr | pr. nr. 30 kr |
| Årgang 1997 | årg. 100 kr | pr. nr. 35 kr |
| Årgang 1998 | årg. 100 kr | pr. nr. 35 kr |
| Årgang 1999 | årg. 100 kr | pr. nr. 35 kr |
| Årgang 2000 | årg. 120 kr | pr. nr. 35 kr |
| Årgang 2001 | årg. 120 kr | pr. nr. 35 kr |
| Årgang 2002 | årg. 140 kr | pr. nr. 40 kr |

Særnumre

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

Palæoklima (1996, 3+4 & 1997,2) 80 kr

Bornholms geologi

| | |
|-----------------------------|--------------|
| I Generel oversigt (1988,2) | 25 kr |
| II Palæozoikum 1988,3) | 25 kr |
| III Grundfjeldet (1989,1) | 25 kr |
| IV Mesozoikum (1989,3) | 25 kr |
| holms geologi samlet | 80 kr |

Andre

| | |
|-------------------------------------|-------|
| Iviglut (1998,1) | 50 kr |
| Livet i kridthavet (2000,4) | 55 kr |
| Skåne i 1.800 millioner år (2002,1) | 40 kr |

Alle priser er ekskl. forsendelse

BLYISOTOPER OG DERES ANVENDELSE

Robert Frei

VARV vil i dette og i et følgende nummer give en introduktion til blyisotoper og deres anvendelse bl.a. til datering af geologiske begivenheder og til at modellere Jordens skorpe - kappe udvikling.

Blyisotoper, og her menes variationer i mængden af de forskellige blyisotoper, er et nyttigt værktøj ved løsning af mange geologiske problemstillinger. De kan 1) give informationer om alder baseret på det radioaktive henfald af uran (U), thorium (Th) og deres datterprodukter til stabile blyisotoper samt 2) give informationer om forholdene uran/bly (U/Pb) og thorium/uran (Th/U) på et hvilket som helst tidspunkt i de reservoirer, hvor det undersøgte bly er udviklet. Sådanne reservoirer varierer meget i skala og kan eksempelvis omfatte kappen, den kontinentale skorpe, en malmforekomst, en grundfjeldsenhed, en lithostratigrafisk enhed eller atmosfære/hydrosfære systemet.

Da uran, thorium og bly er grundstoffer, der opfører sig indbyrdes meget forskelligt under varierende geologiske forhold, vil forholdene mellem grundstofferne U/Pb og Th/Pb ændres i forbindelse med de begivenheder, de bliver udsat for. Det kan f. eks. være delvis opsmeltning, fraktioneret krystallisation - der er en proces, hvor forskellige mineraler fjernes under afkøling af en smeltmasse (se VARV 2001,4) - regionalmetamorfe processer under en bjergkædedannelse og cirkulation af varme vandige opløsninger (hydrotermal cirkulation). Man taler om, at grundstofferne fraktioneres. Forholdene påvirkes også på kompleks måde af forvitring, biologisk aktivitet og lav-temperatur processer knyttet til Jordens overflade. Resultatet er, at de relative mængder af de forskellige blyisotoper varierer meget i naturen, afhængigt af alder og ikke mindst af den geologiske historie af et givent reservoir.

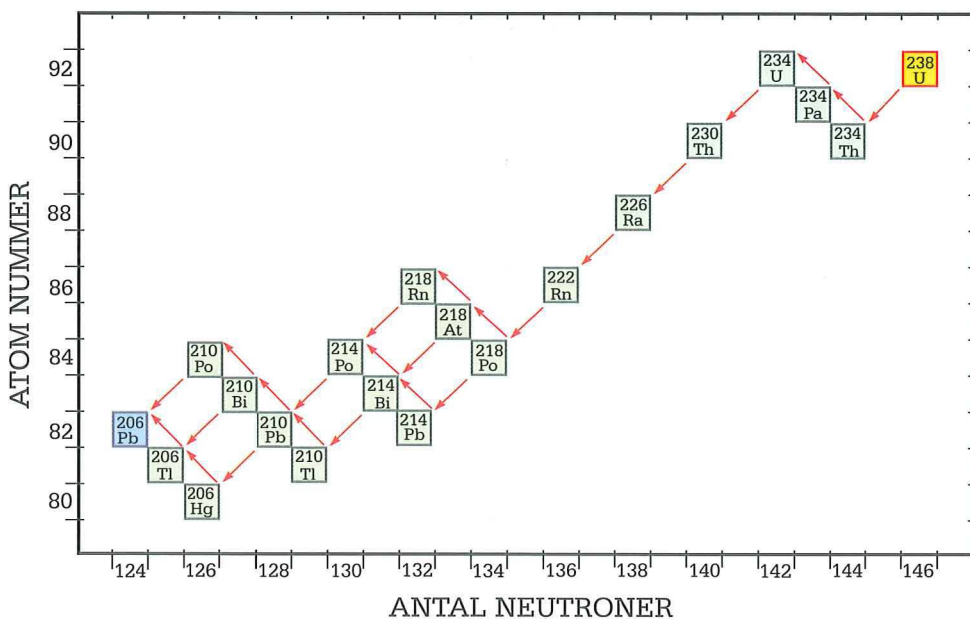
I modsætning til isotoper af lette grundstoffer fraktioneres de tunge blyisotoper ikke ved fysisk-kemiske processer som f. eks. opløsning, transport gennem metaller og udfældning (se nedenfor).

PRINCIPPER

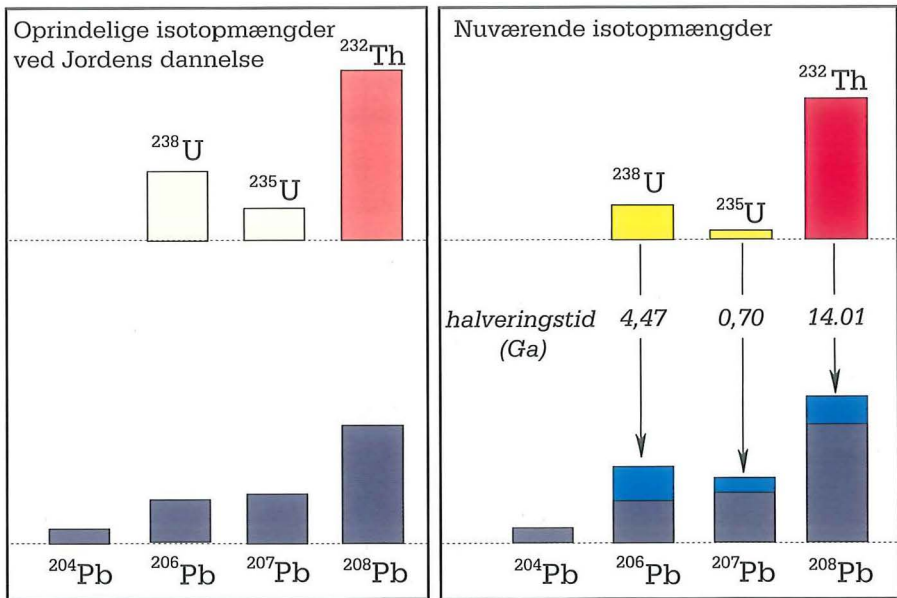
Kernen i et atom består af et antal positivt ladede protoner samt et antal uladede neutroner. Alle atomer af et grundstof har samme antal protoner. Dette antal angiver grundstoffets atomnummer. Derimod kan antallet af neutroner i et

grundstofs atomkerne variere. Atomer af et grundstof med forskelligt antal neutroner kaldes isotoper. Da et atoms massetal er udtrykt ved summen af kernens neutroner og protoner, vil isotoper af et grundstof have forskellige massetal. Alle atomer af f.eks. uran (U) har 92 protoner i kernen. Uran optræder f.eks. som isotoperne ^{238}U og ^{235}U , hvor massetallet er angivet i forhøjet position foran symbolet for uran (U). Antallet af neutroner findes ved at fratække atomnummeret (92) fra massetallet. ^{238}U og ^{235}U har således henholdsvis 146 og 143 neutroner i deres atomkerner. Grundstoffernes isotoper kan være stabile eller ustabile (radioaktive), hvor sidstnævnte med tiden ved radioaktivt henfald omdannes til stabile isotoper. Stabile isotoper, der er et resultat af radioaktivt henfald, siges at være radiogent dannet og omtales som radiogene isotoper.

Bly har 4 stabile isotoper: ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb og ^{208}Pb . De sidste tre er radiogene og delvist dannet som de endelige produkter ved radioaktive henfald af isotoperne ^{238}U , ^{235}U og ^{232}Th . Henfaldet ^{238}U til ^{206}Pb er vist i skematisk form i figur 1. Som det fremgår er henfaldet meget kompliceret og omfatter mange mellem-liggende produkter (datterprodukter), med ^{206}Pb som det stabile endelige produkt af samtlige mulige reaktioner. De relative mængder af de tre radiogene isotoper



Figur 1. Skema, der viser ^{238}U 's henfald til ^{206}Pb . Lodret akse: atomnummer = antallet af protoner, vandret akse: antallet af neutroner. I henfaldet indgår isotoper af følgende grundstoffer: Uran (U), protactinium (Pa), thorium (Th), radon (Rn), astat (At), polonium (Po), bismuth (Bi), bly (Pb), tallium (Tl) og kviksølv (Hg)



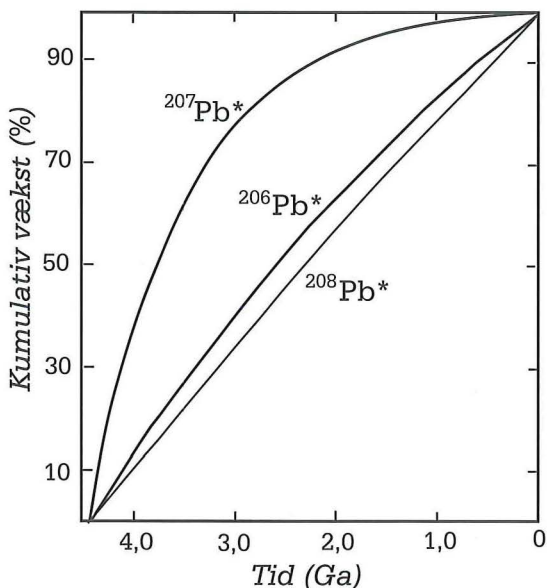
Figur 2: Relationer mellem mængderne af blyisotoper ved Jordens dannelse for 4,588 milliarder år siden og i dag. I figuren til højre viser de lyseblå 'tilskud' mængderne af radiogent dannet bly ud fra radioaktivt henfald af uran- og thoriumisotoper. De mørkeblå bokse på figuren til højre svarer til boksene i venstre figur.

(figur 2) udtrykkes almindeligt som forhold, hvor ^{204}Pb står i nævneren og de radiogene isotoper står i tælleren, f.eks.: $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. ^{204}Pb har ingen kendte radioaktive 'forældre' og er ikke selv radioaktiv. De nævnte isotopforhold øges med tiden, da ^{204}Pb er konstant og mængden af de tre radiogene blyisotoper øges på grund af det radioaktive henfald af 'forældre' - isotoperne, dvs. de radioaktive uran- og thoriumisotoper. Væksten i forholdene mellem et begyndelsestidspunkt t_0 og et sluttidspunkt t_1 i uran- og thoriumførende systemer beskrives ved nedenstående ligninger, idet det dog er en forudsætning, at der ikke har været udveksling af uran og thorium og alle deres datterprodukter med omgivelserne:

- 1) $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_1} = (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_0} + (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}) \cdot (e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1})$
- 2) $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_1} = (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_0} + (^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}) \cdot (e^{\lambda' t_0} - e^{\lambda' t_1})$
- 3) $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_1} = (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_0} + (^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}) \cdot (e^{\lambda'' t_0} - e^{\lambda'' t_1})$

hvor λ , λ' og λ'' er henfaldskonstanter for henholdsvis ^{238}U , ^{235}U og ^{232}Th .

Henfaldskonstanten defineres som en proportionalitetsfaktor, der relaterer hastigheden, hvormed en radioaktiv 'forældre-isotop' nedbrydes, til det antal forældreatomer der er tilbage til ethvert tidspunkt t . Sagt på en anden måde svarer henfaldskonstanten til antal henfald per tidsenhed per radioaktivt atom.



Figur 3: Udviklingsdiagram, der viser den samlede - kumulative vækst af de tre radiogent dannede blyisotoper fra det tidspunkt, hvor Jorden blev dannet for 4,588 milliarder år siden og til i dag.

Henfaldskonstantens værdi er karakteristisk for den givne radioaktive isotop og udtrykkes i enheden reciprok tid, dvs. 1:tid.

Halveringstiden af en radioaktiv isotop er den tid, der er nødvendig, for at halvdelen af et givet antal radioaktive kerner kan henfalde. Halveringstiden ($T_{1/2}$) kan matematisk udtrykkes som

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \text{ hvor } \ln 2 \text{ er den naturlige logaritme til } 2 (=0,693)$$

Uran har to radioaktive isotoper med en lang halveringstid. Forholdet mellem de to isotoper er for nærværende $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 137,88$. Uran-bly isotopsystemet er specielt ved, at det giver to uafhængige muligheder for at kontrollere produktionen af datter-isotoper af et enkelt grundstof - bly (^{206}Pb , ^{207}Pb), som en funktion af det radioaktive henfald af isotoper af samme grundstof - uran (^{238}U , ^{235}U). Da begge henfaldsserier indeholder samme forældre- og dattergrundstof (uran og bly), er uran-bly systemet optimalt til at undersøge geokemiske systemer, og det er yderligere et ideelt geokronologisk værktøj, idet det tillader en krydskontrol af resultaterne fra de to henfaldsserier. I de fleste andre henfaldssystemer er der kun én henfaldsserie per forældre-datter grundstoffer, der kan bruges til ovennævnte formål, og derfor ingen mulighed for kontrol. Koblingen af $^{238}\text{U} \Rightarrow ^{206}\text{Pb}$ og $^{235}\text{U} \Rightarrow ^{207}\text{Pb}$ henfaldsserierne giver en tidskontrol udelukkende baseret på forholdene mellem blyisotoper (datterprodukter), som gør det muligt at anvende forskellige variationsdiagrammer, dvs. diagrammer hvor forskellige isotopforhold er afbildet mod hinanden.

Da isotopen ^{235}U henfalder seks gange så hurtigt som isotopen ^{238}U (figur 3) var den væsentlig mere almindelig i Jordens tidligste historie. Forholdet $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ændres med tiden og kan beregnes af ligningen:

$$(^{238}\text{U}/^{235}\text{U})_t = 137,88(e^{(\lambda - \lambda')t})$$

Eksempelvis udgjorde ^{235}U godt 24% af alt uran, da Jorden blev dannet, ca. 6% i sen Arkæikum (for godt 2,5 milliarder år siden) og ca. 1,2% i sen Proterozoikum (for knap 1 milliard år siden). Dette er et vigtigt princip, når man tolker variationen i sammensætningen af blyisotoper: dannelseshastigheden af ^{207}Pb gennem den sidste milliard år har været så lav, at man næsten kan se bort fra den, simpelthen fordi mængden af 'forældre-isotop' (^{235}U) har været så ringe.

I Phanerozoikum (de sidste 540 millioner år) overstiger produktionen af ^{206}Pb i stort omfang produktionen af ^{207}Pb , hvorimod det modsatte var tilfældet i Arkæikum, dvs. i Jordens ældste historie. Enhver væsentlig variation i mængden af ^{207}Pb , der ikke modsvares af en lignende variation i ^{206}Pb , kan kun tilskrives meget gamle geologiske begivenheder.

HENFALDSKONSTANTER OG HALVERINGSTIDER

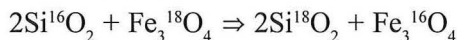
| Isotop | Hyppighed i % | Halveringstid i Ga | Henfaldskonstant i 1/år |
|-------------------|---------------|--------------------|--------------------------|
| ^{238}U | 99,27 | 4,47 | $1,55125 \cdot 10^{-10}$ |
| ^{235}U | 0,72 | 0,70 | $9,8485 \cdot 10^{-10}$ |
| ^{232}Th | 100 | 14,01 | $0,49475 \cdot 10^{-10}$ |

Ga: Giga-år = milliarder år. $10^{-10} = 1/10.000.000.000$

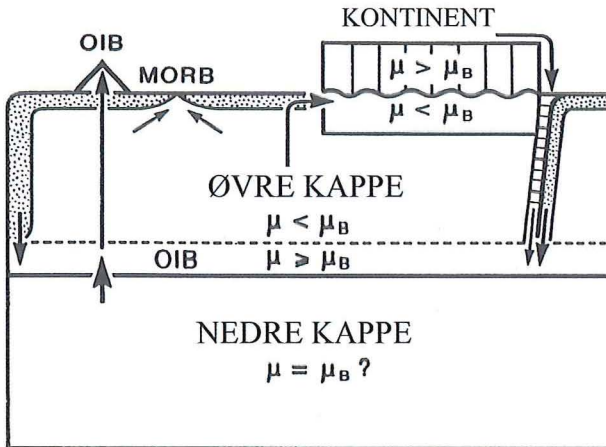
FRAKTIONERING

Hovedformålet med at studere stabile isotoper er at undersøge de processer, som i naturen adskiller isotoper på baggrund af deres masse i højere grad end på baggrund af deres kemiske egenskaber. Dette kaldes isotopfraktionering og foregår i naturen på tre forskellige måder:

1. Isotopudvekslingsreaktioner: Isotopfraktionering finder sted i form af udvekslingsreaktioner mellem grundstoffer, som når iltisotoper f. eks. udveksles mellem mineralerne kvarts og magnetit:



Isotopfraktioneringen er kontrolleret af styrken af bindingerne i mineralerne og



Figur 4: Skematisk diagram der viser de kappe- og skorpereservoirer, der er relevante for blyisotopstudier. OIB = Ocean Islands Basalts, MORB = Mid Ocean Ridge Basalts. μ = reservoirets nuværende $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ -forhold, $\mu_B = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ af den totale Jord.

følger den almindelige regel, at de lette isotoper danner en svagere binding end de tunge isotoper.

2. Kinetiske processer. Kinetisk kontrolleret fraktionering af stabile isotoper viser, i hvor høj grad en bestemt isotop har muligheder for at reagere. Et eksempel er den bakterielle reduktion af havvands-sulfat til sulfid, som går 2,2% hurtigere for den lette isotop ^{32}S end for den tunge isotop ^{34}S .

3. Fysisk-kemiske processer som fordampning og kondensation, opsmeltning og krystallisation, samt diffusion. Temperaturen kan f.eks. være en vigtig parameter ved isotopfraktionering. Et andet eksempel er destillationsprocesser, i hvilke lette isotoper først og fremmest går over i dampfasen.

Den gruppe grundstoffer, hvis isotoper er specielt følsomme for naturlig isotopfraktionering, omfatter de relativt lette som f.eks. brint, kulstof, kvælstof og svovl. Disse er blandt de almindeligste grundstoffer på Jorden og er intimt knyttet til biosfære, hydrosfære og lithosfære.

I modsætning til disse isotoper fraktionerer isotoper af tunge grundstoffer som f.eks. uran og bly ikke i naturen. Derfor anvendes blyisotoper i vid udstrækning som tracers for mange processer i naturen og vel at mærke ikke kun geologiske.

RESERVOIRBEGREBET

Antager man, at de grundstoffer, artiklen behandler, intetsteds i eller på Jorden har gennemgået fraktioneringsprocesser, som har påvirket forholdene U/Pb og Th/Pb, så ville alle bjergarter uafhængig af alder og type have samme sammensætning af blyisotoper i dag. Nu er det sådan, at der rent faktisk er foregået meget komplekse grundstof-fraktioneringsprocesser i Jorden, hvorfor

et nøgleproblem bliver at forstå de grundstof-transportprocesser, der har været involveret. Da det har vist sig, at der ofte sker en blanding af grundstoffer fra forskellige reservoirer, er det også nødvendigt at fokusere på isotopsammensætningen i de forskellige reservoirer før blanding.

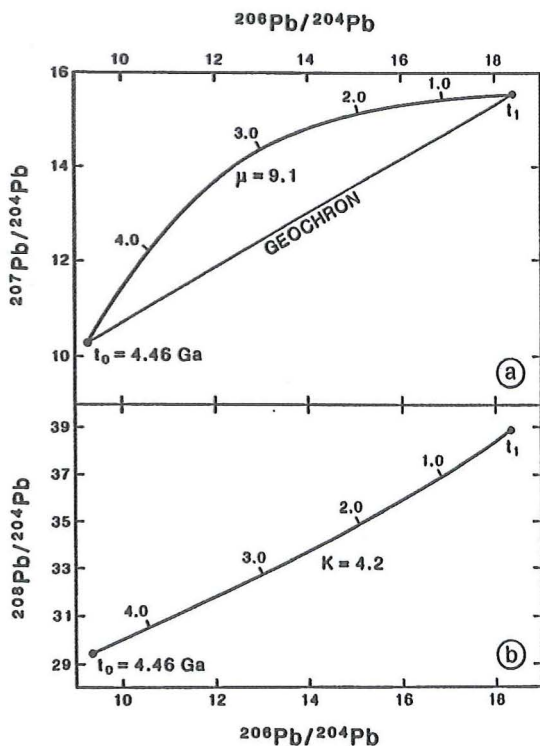
Gennem de sidste 30 år er der opstillet 4 hovedreservoirer med hensyn til bly. Reservoirerne er opstillet med udgangspunkt i pladetektoniske begreber og omfatter følgende stor-skala reservoirer (figur 4):

- 1) kappen (opdelt i en øvre og nedre kappe), som er blevet karakteriseret med udgangspunkt i studiet af oceaniske basalter fra spredningsrygge (MORB=Mid Ocean Ridge Basalts) og oceanøer (OIB= Ocean Island Basalts).
- 2) den øvre kontinentale skorpe
- 3) dybe dele af skorpen, som er bragt op til overfladen
- 4) kernen, som man ikke kan undersøge direkte.

UDVIKLINGEN AF RESERVOIRER

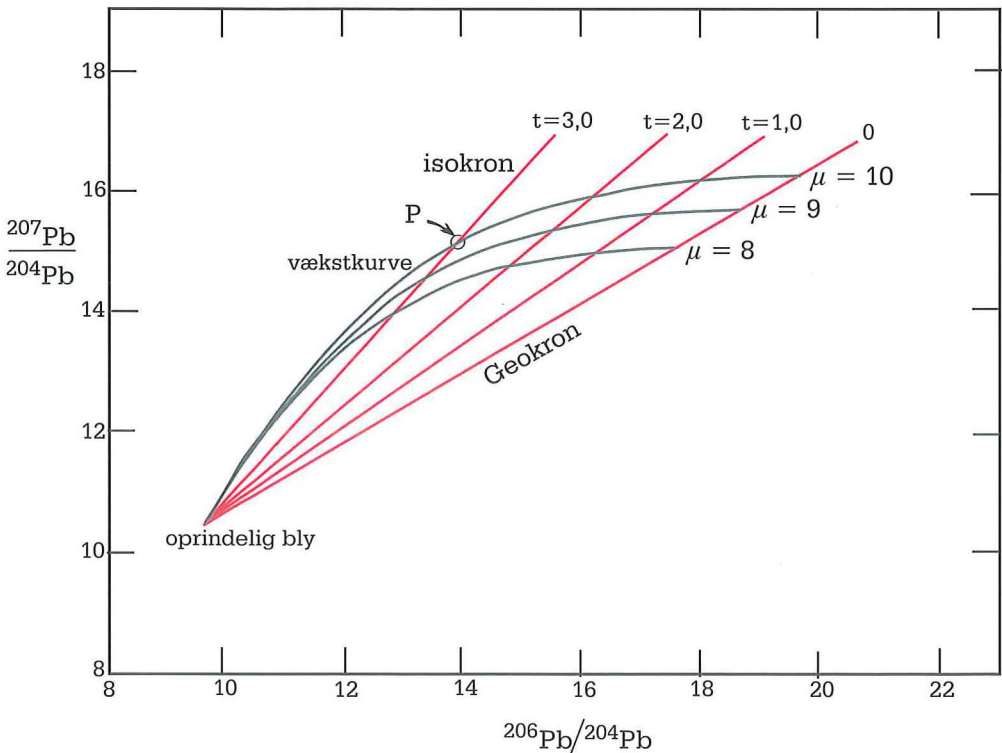
Væksten i radiogen ^{207}Pb og ^{206}Pb i et reservoir følger ligningerne for radioaktivt henfald. Dette illustreres i figur 5a, som er et almindeligt anvendt variationsdiagram, hvor forholdet $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ er afsat mod forholdet $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for en given værdi af tiden t_0 (Jordens alder = 4.588 millioner år), $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_0}$ og $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_0}$, dvs. Jordens oprindelige blyisotopforhold, samt μ (my), som er det endelige - eller nuværende - forhold af $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ i reservoiret. Kurven flader typisk ud med tiden, hvilket skyldes at mængden af ^{235}U - som nævnt - reduceres mærkbart. Forbindelseslinien mellem den oprindelige og endelige (nuværende) blyisotopsammensætning er en isokron, dvs. en linie (her kaldt en 'geokron') hvis hældning er et udtryk for reservoirets alder. En isokron er en linie, hvorpå datapunkter med samme alder vil ligge.

Figur 5: Bly udviklingsdiagrammer for uranafledte (a) og uran-thorium-afledte (b) blyisotoper; der viser vækst-kurver for den gennemsnitlige totale Jord. Talangivelserne i diagrammerne er i milliarder år. t_0 er Jordens oprindelige blyisotop-sammensætning, t_1 sammensætningen af den gennemsnitlige totale Jord på nuværende tidspunkt.



I dette tilfælde vil datapunkter med forskellig sammensætning fra alle reservoirer, der er udviklet fra samme udgangssammensætning, men med forskelligt μ ($= {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$), ligge på linien. Hældningen af linien, der er udtryk for alderen, fås ved at dividere ligningerne 2) og 1) (se ovenfor). Hvis isokronen er stejl er alderen høj, og er isokronen flad er alderen lav (figur 6).

Væksten i radiogent ${}^{208}\text{Pb}$ illustreres almindeligvis i et variationsdiagram, hvor forholdet ${}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ er afbildet mod forholdet ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ (figur 5b), idet man anvender ligningerne 1) og 3) (se ovenfor). Kurvens form afhænger af udgangsparametrene til tiden t_0 , nemlig $({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_0}$, $({}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_0}$ og κ (kappa), der er det nutidige isotopforhold ${}^{232}\text{Th}/{}^{238}\text{U}$, og den er næsten en ret linie på grund af begge 'forældre'-isotopernes lange halveringstider (figur 2).



Figur 6: Diagram der viser tilvæksten af blyisotoper i reservoirer med forskellige μ -værdier; idet de alle er begyndt med en sammensætning svarende til det oprindelige bly for 4,55 milliarder år siden. De rette linier er isokroner for udvalgte værdier af t (= tiden i milliarder år). Prøven 'P' blev 'trukket ud' af et kildeområde for 3,0 milliarder år siden. Kildeområdets nuværende ${}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$ forhold (μ) er 10.



Figur 7: Krater dannet af Canyon Diablo meteoritten i Arizona, USA

JORDENS OPRINDELIGE PARAMETRE

For at kunne redegøre detaljeret for udviklingen af de forskellige reservoirer vores planet består af, er det nødvendigt at præcisere nogle få nøgleparametre som Jordens alder, dens oprindelige og nuværende blyisotopsammensætning og relative mængder af uran, thorium og bly.

Jordens alder kender man på baggrund af dateringer af jernmeteoritter. Man antager, at den blev dannet samtidig med, at der dannedes planetsimaler, der ligner Jorden. Jernmeteoritterne repræsenterer således deres jern-nikkel rige kerner, som er dannet på samme måde som Jordens kerne. Jernmeteoritterne har tilsyneladende ikke gennemgået nogen mærkbar udvikling efter dannelsen. Studier af blyisotoper peger på, at de er mellem 4,550 og 4,650 milliarder år gamle.

Sammensætningen af bly ved Jordens dannelse er blevet undersøgt på mineralet troilit (Fes: jernsulfid) fra jernmeteoritten 'Canyon Diablo' (figur 7). Troilit indeholder forholdsvis store mængder bly, hvorimod der stort set ikke er hverken U eller Th. Det betyder, at den radiogene tilvækst af blyisotoper, siden mineralet

blev dannet, er minimal. Forholdene mellem blyisotoper på 'Canyon Diablo' troilit er de laveste, man kender til, og betragtes som den bedste tilnærmelse til det bly, der blev indlejret i Jorden ved dens dannelse.

JORDENS GENNEMSNITLIGE VÆRDIER AF FORHOLDENE U/Pb OG Th/U

De såkaldte chondritiske meteoritter, der består af en blanding af metal- og silikatfaser, menes fra et geokemisk udgangspunkt at komme tættest på Jordens gennemsnitlige kemiske sammensætning. Det er dog ikke muligt helt at stole på meteoritsammenligningen med hensyn til Jordens gennemsnitlige U/Pb-forhold. Dette skyldes, at Pb fordampes ved høje temperaturer, hvorfor mængden af oprindeligt bly i chondritter - ligesom det er tilfældet for andre grundstoffer, der let fordampes - vil variere meget. Den eneste mulighed for at løse problemet er at bruge den basale ligning for vækst af bly på følgende måde:

$$\mu_B = \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_T - \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_{\text{Canyon Diablo}} / (e^{\lambda T - 1})$$

hvor μ_B er ${}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$ forholdet af den totale Jord, $\left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_{\text{Canyon Diablo}}$ Jordens oprindelige forhold, T Jordens alder, $\left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_T$ den nuværende gennemsnitlige sammensætning af den totale Jord og λ henfaldskonstanten af ${}^{238}\text{U}$. Ligningen kan løses med μ_B som den ubekendte. Jordens gennemsnitlige sammensætning er beregnet til $\mu_B \sim 9,1$.

I modsætning til bly fordampes uran og thorium ikke særlig nemt, og man har i længere tid antaget, at Jordens Th/U-forhold er sammenligneligt med forholdet i primitive meteoritter, dvs. tæt på 3,7-3,8 på tidspunktet for dannelsen.

Sammenfattende har Jorden i dag et forhold mellem uran og bly, U/Pb=0,12 og thorium og uran, Th/U=4,1-4,2.

Den næste artikel vil bl.a. handle om udviklingen af Jordens skorpe-kappe system.

DET NYE GEOCENTER –

FRA IDÉ TIL VIRKELIGHED

FORHISTORIEN ved Henning Sørensen

IDÉEN FREMSÆTTES

Tanken om at samle de geologiske institutioner i Københavnsområdet i et geocenter er ikke af ny dato. I 1960 nedsatte Undervisningsministeriet på henstilling fra Københavns Universitets (KU's) rektor et udvalg til drøftelse af mulighederne for en koordinering af det da forventede byggeri for Københavns Universitets Mineralogiske og Geologiske Museum og Institut med byggeri for Danmarks Geologiske Undersøgelse (DGU) og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GGU). Udvalget, som bestod af embedsmænd fra de implicerede ministerier, lederne af DGU og GGU samt professorer ved KU og Danmarks Tekniske Universitet (DTU, tidligere DTH), konkluderede i sin betænkning af 1. juni 1961, at der ville være store ideelle og praktiske fordele ved en miljømæssig samling af de nævnte geologiske institutioner i et geologisk centralinstitut. Dette kunne placeres på Nørre Fælled i det område, hvor en udbygning af institutter under det Matematisk-Naturvidenskabelige Fakultet allerede var i gang, i DTH's bygning på Østervold eller på et andet egnet sted i København eller eventuelt i Københavns nærmeste omegn. Hvis samlingen kunne ske på Østervold, skulle Universitetets Geografiske Institut medtages i centret.

Parallelt hermed arbejdede et af undervisningsministeriet nedsat udvalg med universiteternes byggeprogram i tiåret 1961/62-1971/72. I Betænkning nr. 296 af 27. november 1961 udtalte udvalget, at det ville være meget ønskeligt, om Danmarks Tekniske Højskoles Øster Voldgade 10-kompleks efter højskolens udflytning kunne omdannes til et geologisk centralinstitut, der skulle omfatte ikke alene Universitetets Mineralogisk-Geologiske Institut, men også DGU (under Ministeriet for offentlige arbejder) og GGU (under Ministeriet for Grønland). I marts 1962 nedsatte det Matematisk-Naturvidenskabelige Fakultet ved Københavns Universitet et udvalg bestående af professorerne i geografi, geologi og geofysiske fag, som skulle overveje den mulige samling af geofagene. I udtalelse af 7. juni 1962 konkluderedes under henvisning til ovennævnte betænkning af 1. juni 1961, at der i den da foreliggende situation ikke syntes at være levnet plads til de geologiske fag på Nørre Fælled, og at der efter hvad der

var oplyst over for udvalget, næppe heller ville være mulighed for overtagelse af Øster Voldgade 10-komplekset. Man gik derfor ind for en samling af geofagene på et areal i Ryvangen, hvor der dengang var planer om at bygge et nyt Geodætisk Institut. Ingen af disse forslag nød som bekendt fremme.

IDÉEN UDVIKLES OG INDARBEJDES I UNIVERSITETETS PLANLÆGNING

Næste initiativ var Undervisningsministeriets nedsættelse af Dispositionsplansudvalget for Københavns Universitet. I Betænkning nr. 451 af 30. december 1966 påpegede udvalget, at det i ovennævnte Betænkning nr. 296 foreslåede geocenter sammen med Geografisk Institut eventuelt ville kunne placeres i Ryvangen på arealer, som militæret forventedes at fraflytte. Udvalget skønnede imidlertid, at en sådan placering kun levnedes ringe mulighed for senere udvidelse (og militæret råder i øvrigt fortsat over disse arealer). I stedet pegedes på, at Øster Voldgade 10-komplekset på længere sigt skulle stilles til rådighed for et geologisk centralinstitut bestående af Mineralogisk-Geologisk Institut og Mu-



Geocentrets hovedindgang og facade mod Øster Voldgade. Foto: J. Laurup

seum, DGU og GGU, idet komplekset dog i en længere overgangsperiode skulle huse en række humanistiske fag, indtil disse kunne flyttes til nybyggede arealer i Høje Taastrup. Sidstnævnte plan blev imidlertid ikke realiseret. Udvalget foreslog, at Geografisk Institut indtil videre forblev i lejede lokaler i Haraldsgade.

Af Universitetets årbøger for de efterfølgende år fremgår af Rektors årsberetning og beretningerne om lokaleforholdene, at KU fortsat regnede med på længere sigt at samle de geologiske institutioner i Øster Voldgade 10-komplekset, idet dog humanistiske fag måtte forventes at blive midlertidigt huset i dele af komplekset. Det blev godkendt, at GGU og dele af universitetsgeologien fik midlertidig placering kompleksets teknisk-kemiske fløj, hvilket blev realiseret i 1969.

Årbogen for 1970/71 er særlig interessant. På side 8 står der i Rektors beretning, at gennemførelsen af et geologisk center i Øster Voldgade 10 må afvente udflytning af sprogfag mv. til Københavns Universitet Amager, KUA, som kun i en – forhåbentlig kortere – årrække skal benytte dele af bygningen. Ombygningen (af Øster Voldgade 10) til humaniora skal foregå i et samarbejde med de kommende brugere, således at 'væsentlige udgifter til lokaleindretning kan undgås'. Denne meget positive omtale af geocentret står i kontrast til et referat af en konference afholdt den 30. april 1971 for de fagområder, som holdt til i den indre by. På side 27 i samme årbog refereres fra denne konference, at opgivelse af planen om at lade humaniora få rådighed over hele Øster Voldgade 10-komplekset kritiseredes kraftigt. Hvad der menes hermed, skal blive forklaret senere. En efterfølgende konference den 13. maj samme år opstillede fire modeller for den fremtidige placering af indre by fagområderne. I en af modellerne var afsat 14.000 m² til sprogfagene i Øster Voldgade 10. Inden vi går videre, er der grund til at indflette nogle bemærkninger om de humanistiske fags lokaleforhold på daværende tidspunkt.

ANDRE INTERESSENER I ØSTER VOLDGADE 10-KOMPLEKSET

I de gode gamle dage arbejdede de humanistiske professorer mest hjemme i studereværelset, undervisningsassistenterne havde ikke kontorer, og institutter eksisterede næsten ikke. Man planlagde at samle de humanistiske fag i studiegårds-karreen mellem Studiestræde og Skt. Peders Stræde. Der blev derfor løbende opkøbt huse (med kakkelovnsfyrede lejligheder og WC i gården) i dette område. Men op gennem 1960erne skete en eksplosiv vækst i antallet af studenter ledsaget af en tilsvarende vækst af lærere. Det ovennævnte Dispositionsplanudvalg påviste i sin betænkning, at det derfor var nødvendigt at opgive de hidtidige planer og i stedet forsøge at placere de humanistiske institutter på et tilstrækkelig stort areal, nemlig det nævnte areal i Høje Taastrup, med midlertidig placering af nogle faggrupper på Østervold.

DET SIDSTE SLAG OM ØSTER VOLDGADE 10-KOMPLEKSET

I 1970 fik et udvalg under rektor Mogens Fog til opgave at stille forslag om den fremtidige placering af de forskellige fag. Mange af udvalgets medlemmer viste ringe forståelse for, at et lille, for nogle næsten ukendt, fag skulle disponere over Øster Voldgade 10-komplekset, som hidtil havde rummet det meste af en læreanstalt. Udvalgets humanistiske medlemmer mente tidligt i udvalgsarbejdet, under henvisning til områdets fortvivlede pladsforhold, at det var mere rimeligt, at de fik stillet dette kompleks til rådighed, hvilket et flertal i udvalget tilsluttede sig. Dette er forklaringen på ovennævnte citat, at humaniora skulle overtage hele Øster Voldgade 10. Den dermed opståede situation blev dernæst diskuteret af ledelsen af Geologisk Institut og Museum og GGU (DGU var ude af billedet på det tidspunkt). Det kunne være en fordel at blive skubbet ud af Østervold, hvis dette kunne resultere i bygning af et helt nyt geocenter. Vi vurderede imidlertid, at chancen for at få et nyt bygningskompleks til geologi alene var meget lille, og at det var mest sikkert at satse på Østervold. Vi samlede derfor argumenter sammen til støtte for geologiens krav på Øster Voldgade 10, argumenter som vandt tilslutning på det næste møde i planlægningsudvalget. Et argument var, at det ville blive opfattet som værende helt uforsvarligt at fjerne kostbare tekniske installationer i en bygning, som var indrettet til natur-videnskabelig og teknisk forskning, for dernæst at indrette nye lokaler med tilsvarende installationer andet steds. Humanisterne blev endvidere overbevist om, at komplekset ikke rummede tilstrækkelige ekspansionsmuligheder for dem.

Udvalget foreslog i stedet, at de humanistiske fagområder skulle placeres på et område på det nordlige Amager lige syd for Serum instituttet. Konsistorium på Københavns Universitet godkendte i juni 1971 denne plan og dermed at Øster Voldgade 10-komplekset skulle danne rammen for et geologisk center. Finansudvalget havde allerede i april 1971 godkendt købet af Amagerområdet.

GEOFAGENES OVERTAGELSE AF ØSTER VOLDGADE 10-KOMPLEKSET SIKRES

Konsistorium nedsatte i juni 1971 et planlægningsudvalg, som skulle udarbejde de detaljerede planer for den fremtidige udbygning, og det naturvidenskabelige hovedområde nedsatte et udvalg til udarbejdelse af dets udbygningsplanlægning for 1973-1988. I dette udvalgs rapport af maj 1974 foreslås, at Geologisk Centralinstitut inklusive Geologisk Museum overflyttes til Øster Voldgade 10 i takt med ombygningen af komplekset og humanisternes udflytning til KUA, og at Geografisk Centralinstitut overtager Geologisk Centralinstituts hidtidige arealer i Øster Voldgade 5-7 med mulighed for at inddrage observatoriet. Disse planer nød som bekendt ikke fremme, men placeringen af geocentret i Øster Voldgade 10 blev fastholdt i den overordnede planlægning af KU's fremtidige udbygning.

I 1976 blev gjort et nyt forsøg på at samle geofagene i Øster Voldgade 10 efter udflytningen af humanisterne til KUA, men pladsforholdene vurderedes at være for begrænsede. Komplekset blev derefter overtaget af Geologisk Centralinstitut og GGU, idet dog Geologisk Museum forblev i Øster Voldgade 5-7. Stokhusgade-fløjen af Øster Voldgade 10-komplekset blev overtaget af Statens Erhvervs-pædagogiske Læreruddannelse (SEL).

I 1985 flyttede Geografisk Centralinstitut ind i en af fløjene i Øster Voldgade 10, idet det var besluttet, at Geologisk Museum skulle forblive i Øster Voldgade 5-7.

REALISERINGEN AF GEOCENTRET ved Martin Ghisler

SAMMENLÆGNING AF DGU OG GGU I 1995

I 1994 kom der igen liv i overvejelserne om at etablere et geocenter. Anledningen var dannelsen af den nye mindretalsregering bestående af Socialdemokratiet og Det Radikale Venstre i september 1994. Man havde besluttet at lægge Miljøministeriet og Energiministeriet sammen til et nyt stort ministerium, Miljø- og Energi-ministeriet med Svend Auken som minister. På dette tidspunkt lå DGU i Miljøministeriet, mens GGU efter nedlæggelsen af Grønlandsministeriet i 1987 var havnet i Energiministeriet. Tanken om at slå de to geologiske undersøgelser sammen lå snublende nær, især i betragtning af hvad der var foregået i årene umiddelbart inden.

Efter etableringen af Grønlands Hjemmestyre i 1979 var flere og flere områder blev 'hjemtaget' af Grønland. Det var især de to giganter Den Kongelige Grønlandske Handel (KGH) og Grønlands Tekniske Organisation (GTO). Men også det tidligere Grønlands Fiskeriundersøgelser var flyttet til Nuuk, hvor man havde grundlagt Grønlands Naturinstitut. Nu lå kun GGU og Grønlands Miljøundersøgelser (GM) tilbage i Danmark, begge institutioner tilknyttet Råstof-forvaltningen for Grønland.

Grønland ønskede større indflydelse på råstofudviklingen og pressede på, for at få forvaltningen med tilhørende institutioner overflyttet til Nuuk. Råstofferne var et fællesanliggende, men der var ikke noget principielt i vejen for, at forvaltningen og den tilhørende ekspertise lige så godt kunne ligge i Grønland som i Danmark. Grønlands Hjemmestyre havde i flere omgange i begyndelsen af 1990'erne, først under Schlüter-regeringen, men også efter at Poul Nyrup Rasmussen var blevet statsminister i 1993, forsøgt at få overført forvaltningen og GGU og GM.

Som en af sine første embedshandlinger rejste Svend Auken til Nuuk til forhandlinger med Landsstyreformand Lars Emil Johansen. De nåede til en forståelse om, at administrationen på sigt skulle flyttes til Nuuk, mens forskningsinstitutionerne skulle forblive i Danmark, men fortsat levere det faglige grundlag for råstofudviklingen.

Nu var vejen banet for en fusion af DGU og GGU, og tilsvarende en indlejring af GM i Danmarks Miljøundersøgelser. De involverede institutioner blev spurgt, om de ville fusioneres. GGU tog imod tilbuddet med kyshånd, og også DGU gik varmt ind for tanken. Siden 1946 havde der været to danske geologiske undersøgelser for henholdsvis Danmark og Grønland. De to institutioner kompletterede hinanden fagligt. Det blev en stor institution på over 300 medarbejdere, hvis dannelse blev vedtaget enstemmigt i Folketinget den 14. juni 1995. Det var et krav fra grønlandsk side, at Grønland skulle indgå i den nye institutions navn. Institutionen kom derfor til at hedde Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, forkortet GEUS (Geologisk Undersøgelse). Det blev tillige aftalt, at der på de årlige finanslove skulle anføres, hvor stor en del af bevillingen der skulle anvendes til Grønlandsopgaver med udgangspunkt i den daværende GGU-bevilling.

I en overgangsperiode forblev Råstofforvaltningen for Grønland i Danmark, men sideløbende blev der opbygget et råstofkontor i Nuuk. I 1998 blev administrationen helt overført til Grønland. Takket være den nye IT-teknologi er kommunikationen mellem København og Nuuk problemløs, og samarbejdet mellem Hjemmestyret og GEUS velfungerende.

IDÉEN OM GEOCENTRET GENOPSTÅR

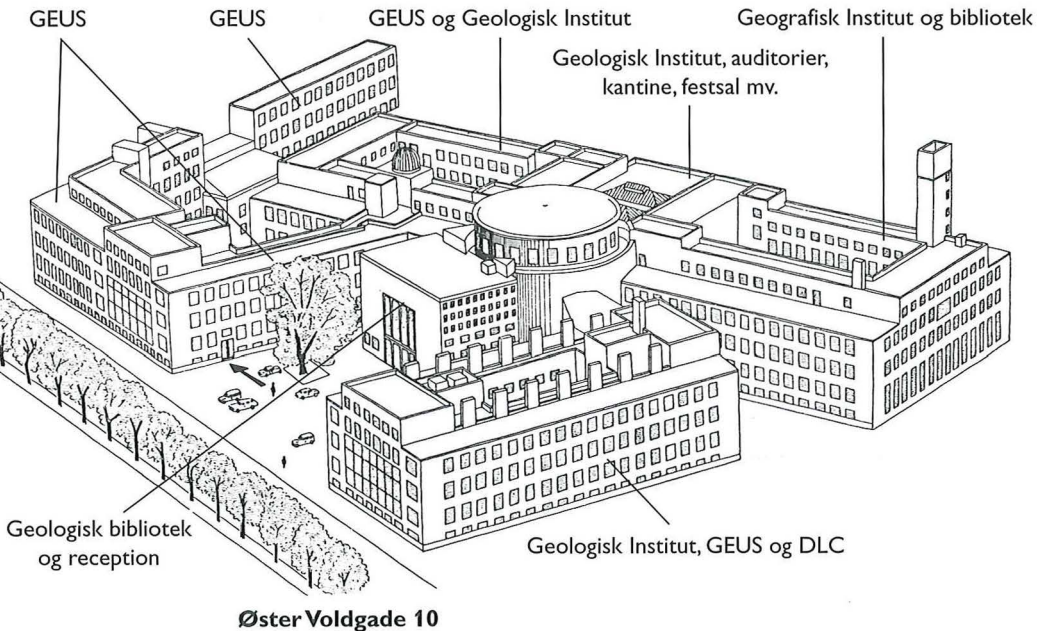
Da den nyudnævnte Miljø- og Energiminister Svend Auken kom tilbage fra Dronningen, blev han modtaget i sit nye ministerium. Han kom under receptionen hen til de to direktører fra DGU og GGU og sagde med begejstring, at nu skulle vi se at få dannet en slagkraftig geologisk institution - 'second to none in Europe'. Fusionstoget blev sat på skinner, men hurtigt opstod den tanke, at hvis Svend Aukens vision skulle realiseres på længere sigt, måtte de geovidenskabelige institutter på Københavns Universitet og Dansk Lithosfærecenter (DLC) involveres.

Statsministeriet viste interesse for idéen, der bl.a. kunne sikre Grønland den nødvendige forskning og rådgivning på længere sigt. Den øverste ledelse på Københavns Universitet bakkede initiativet op, og også Miljø- og Energi ministeriet syntes, at tanken var så interessant, at den burde undersøges nærmere. En OECD - evaluering havde peget på det u hensigtsmæssige i det manglende samspil mellem universiteterne og sektorforskningen. Regeringen havde i sin

netop udkomne hvidbog 'Forskning i perspektiv' lagt vægt på, at dette samarbejde skulle udnyttes, hvor det var muligt. GGU og KU havde samarbejdet i årevis under fælles bygningsmæssige rammer med stort gensidigt udbytte. Der var dog også betænkeligheder. En fysisk sammenflytning af GEUS og universitetsinstitutterne ville blive dyr, og geocentret blive så stor i dansk sammenhæng, at der reelt ville blive tale om en monopol-situation, der ville marginalisere de øvrige geologiske forskningsmiljøer i Danmark.

Den 11. april 1995 blev det i Statsministeriet besluttet at nedsætte et tværministerielt udvalg bestående af topembedsmænd fra Forskningsministeriet, Undervisningsministeriet (Byggedirektoratet), Miljø- og Energiministeriet, Finansministeriet, KU, DGU, GGU og en repræsentant fra Videnskabernes Selskab med Statsministeriet for bordenden. Udvalget blev nedsat den 2. juni 1995 med afsluttende møde den 19. december. I juleferien 1995 forelå den trykte 'Betænkning om Geocenter'.

Betænkningen anbefalede etableringen af et nyt Geocenter i universitetets bygninger på Øster Voldgade 10 og Øster Voldgade 5-7. Centret skulle blive et geovidenskabeligt center for forskning, undervisning og rådgivning på internationalt



Geocenterkomplekset i Øster Voldgade 10 og placeringen af dets institutioner.

niveau. Det skulle rumme ca. 550 medarbejdere og 1000 studerende fra Geologisk Institut, Geografisk Institut, Geologisk Museum, Dansk Lithosfærecentrum og GEUS. Geologisk Museum skulle forblive i bygningerne på Øster Voldgade 5-7, mens Øster Voldgade 10-komplekset skulle gennemgå en gennemgribende renovering og ombygning. De enkelte institutioner skulle bevare deres selvstændighed og ressortmæssige tilknytning, men i størst muligt omfang samarbejde især om forskning og forskeruddannelse. På finansloven for 1997 blev der ultimo 1996 bevilliget de nødvendige midler til, at projektet kunne igangsættes.

OMBYGNING AF ØSTER VOLDGADE 10-KOMPLEKSET

Der forestod nu et større ombygningsprojekt med en række konsekvenser for brugerne af bygningen. Det blev besluttet midlertidigt at flytte de tidligere GGU-medarbejdere ud af komplekset. De blev genhuset på Thoravej i Nordvestkvarteret hos det tidligere DGU, dels ved at man der rykkede sammen, dels ved supplerende lejemål i nabofløje. For at skaffe nok plads til geocentret blev Statens Erhvervs-



Et kig ind i centrets nye fælleskantine. Foto: J. Laurup

pædagogiske Læreruddannelse (SEL) flyttet til et nyt domicil andetsteds i byen. KU-institutterne og DLC skulle blive i komplekset, mens ombygningen stod på. De arealer, som det tidligere GGU og SEL havde rømmet, kunne bruges til midlertidig placering af medarbejdere under byggeriet.

I efteråret 1996 etableredes ledelsen af geocentret - Geocentrets Chefkollegium. Det kom til at bestå af to direktører fra GEUS, de to institutledere fra Geologisk og Geografisk Institut, suppleret med et eksternt medlem udpeget af Forskningsministeriet. Desuden var lederen af Geologisk Museum og DLC tilforordnet Chefkollegiet. Samtidig nedsattes et byggeudvalg under ledelse af Byggedirektoratet. Chefkollegiet kom til at spille en central rolle i planlægningen af byggeriet, fordelingen af arealerne på institutionerne og i de økonomiske prioriteringer.

Det viste sig hurtigt, at bygningerne var i langt i dårligere stand end først antaget. Det var derfor nødvendigt at tilføre yderligere midler, hvilket skete på finansloven for 1999. Inden byggeriets start blev der i alt afsat 230 millioner kr.



Geus' nybyggede kemifløj (forrest til venstre) og en ny gangbro som forbinder to af Geocentrets områder. Foto: J. Laurtrup

til projektet. Byggeriet gik i gang i sommeren 1999 og strakte sig over 3 år. Ud over en generel renovering var de største ændringer nedrivning af de gamle hydrauliske forsøgsanlæg fra DTU, hvor der skulle indrettes kantine, bibliotek og øvelseslokaler. Desuden skulle der bygges tre etager oven på den gamle maskinhal, således at GEUS fik samlet de fleste af sine laboratorier i en ny laboratoriefloj. Ombygningen var til stor gene for især undervisningen, der i perioder blev umuliggjort især på grund af støj og støv i forbindelse med nedrivningen af de store betonkonstruktioner.

I foråret og sommeren 2002 kunne GEUS flytte ind. Inden var især Geologisk Institut rykket sammen og omplaceret, således at der kunne stilles de nødvendige sammenhængende arealer til rådighed for GEUS. Der var desværre ikke blevet råd til en renovering af Geologisk Museums lokaler på Øster Voldgade 5-7. Geologisk Museums bibliotek har fået tilført bibliotekerne fra DGU og GGU og er placeret i ligeledes fuldt renoverede lokaler, hvor tidligere Danmarks Tekniske Bibliotek holdt til i Bogtårnet over hovedindgangen

INDVIELSEN AF GEOCENTER KØBENHAVN

Den 16. september 2002 fandt den officielle indvielse af Geocenter København sted ved Minister for Videnskab, Teknologi og Udvikling Helge Sander. I stedet for at klippe den sædvanlige røde snor over, markerede han begivenheden ved at dreje på en globus. Det udløste et spektakulært vulkanudbrud med ild, røg, støj og lava fra en til lejligheden opbygget vulkan i papmache, efterfulgt af trompetfanfarer. Nu blev kræfterne sluppet løs for en nyt samarbejde mellem universitet og sektorforskning. Geocentret fik mange gode ønsker med på vejen af rektor for KU, dekanen for det naturvidenskabelige fakultet og departementschefen fra Miljøministeriet, mens formanden for Chefkollegiet på brugernes vegne takkede for det nye flotte center.

Umiddelbart inden den officielle indvielse blev der i centrets store festsal med plads til 600 mennesker - den var fyldt til sidste plads - præsenteret forskellige faglige indlæg med overskriften : Jorden - menneskenes planet. Fem forskere fra de fem institutioner gav nogle eksempler på det faglige spektrum, den nye centerkonstruktion spænder over. Stikordene var: Menneskets interaktion med det naturlige miljø, jordens indre liv, olie - en kilde til velstand, dansk grundvand - en dyrebar ressource og Jorden - skabt til liv.

Efter indvielsen blev ministeren og hans følge vist rundt. Geocentret fremstår nu som et gennemrenoveret bygningskompleks, hvis oprindelige karakteristiske arkitektur er bevaret. Arbejdsværelserne er lyse og venlige, der er højt til loftet og et godt indeklima. Moderne, veludstyrede laboratorier, auditorier og øvelses-

sale til de mange studerende, en stor flot fælleskantine, samt to veludstyrede biblioteker. Der er skabt ideelle fysiske rammer for et nyt samarbejde mellem universitet og sektorforskning på det geovidenskabelige område.

GEOCENTRETS SAMFUNDSMÆSSIGE PERSPEKTIVER

Idéen om at etablere et geocenter blev første gang seriøst overvejet for 41 år siden. Siden den endelige beslutning om at realisere tanken og bevilge pengene dertil er der dog 'kun' gået 6 år. Vi er relativt få aktive på jobbet tilbage fra 1961, for hvem en drøm nu er gået i opfyldelse. Samfundet har investeret en



Minister for Videnskab, Teknologi og Udvikling Helge Sander har netop åbnet Geocenter København ved at dreje globen og dermed aktivere vulkanen. Foto: J. Laurrup

kvart milliard kroner i projektet. Hvad er forventningerne til geocentret, som en ny generation skal leve op til at realisere?

- Geocenter København bliver et nyt attraktivt center for geovidenskabelig forskning og uddannelse, både nationalt og internationalt.
- Der udvikles et bedre fagligt grundlag for rådgivning af offentlige myndigheder på miljø-, energi- og råstofområdet.
- Den tværvidevidenskabelige forskning bliver styrket, især samspillet mellem naturvidenskabelige og socio-økonomiske fagområder.
- Der sker en styrkelse af de økonomiske, sociale og forvaltningsmæssige aspekter af ressourceanvendelse og naturforvaltning.
- Der dannes nye forskningskonstellationer til sikring af rent drikkevand og fremtidig energiforsyning - olie/gas og geotermi.
- Det faglige grundlag for at råstofudnyttelse udvikles til et fremtidigt bærende erhverv i Grønland styrkes.
- Der sker en forøgelse af bredden i den danske miljøbistand i Østeuropa og U-landene bl.a. vedrørende vandforsyning, landbrug og en miljøvenlig udnyttelse af olie- og mineralressourcer.
- Geocentret lægger op til et øget samarbejde med erhvervslivet på energi-, råstof- og miljøområdet, både nationalt og internationalt.
- Der skabes nye muligheder for en samlet populærvidevidenskabelig formidling af geografi og geologi over for offentligheden og især de unge.

Henning Sørensen, professor ved Geologisk Institut, KU, 1962-92, var medlem af de fleste af de nævnte udvalg inklusive Geocenterudvalget. Martin Ghisler, direktør for GGU 1984-95 og administrerende direktør for GEUS siden 1999, var medlem af Geocenterudvalget og er p.t. formand for Geocentrets Chefkollegium.

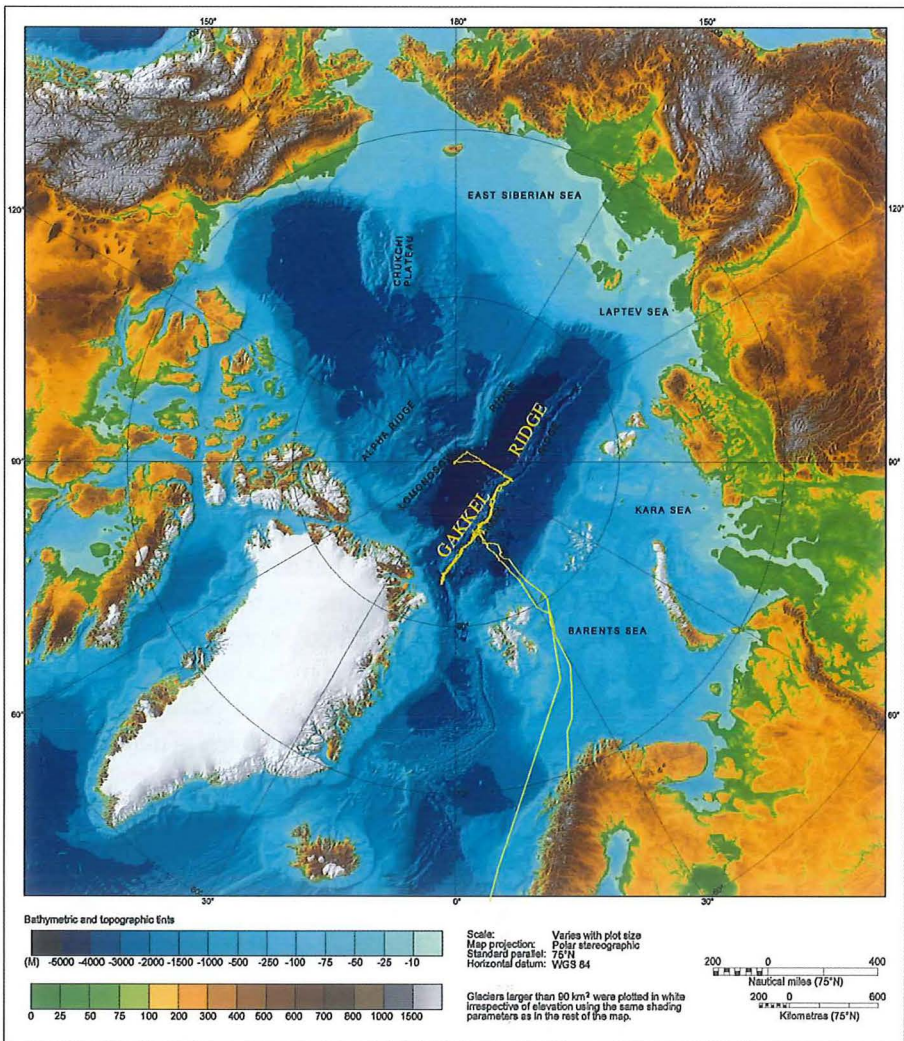
OM VULKANERNE I DET ARKTISKE OCEAN

RESULTATER AV AMORE-2001 TOGTET

Jörn Thiede, Christian Haas,
Wilfried Jokat, Richard Mühe, Jonathan Snow og Robert Spielhagen

Da Jules Verne for godt hundrede år siden i sin berømte roman skrev om rejsen til Jordens indre - gennem Islands vulkaner - vidste han ikke, at der rent faktisk var en slags underjordisk forbindelse mellem alle vulkanerne. Hans fantasi rakte således ikke til at forestille sig eksistensen af et verdensomspændende mere end 60.000 kilometer langt system af undersøiske, vulkanske, midtoceaniske højderygge, som kun undtagelsesvis hæver sig over havets overflade - som på Island. Denne lange kæde af undersøiske vulkaner har udviklet sig på grænserne mellem plader i jordskorpen, hvor havbunden spreder sig for at gøre plads til det opvældende magma. Sådanne grænser kaldes spredningsrygge. Magmaet leverer materiale til utallige vulkaner og fører til dannelsen af ny havbund. Gakkelryggen i den centrale østlige del af det Arktiske Ocean, som skal behandles i denne artikel, er en sådan spredningsryg og danner den nordlige udløber af pladegrænsen mellem Europa/Asien på den ene side og Nordamerika på den anden. Gakkelryggen er speciel, idet den åbner sig langsommere end andre spredningsrygge – kun få millimeter om året.

De to isbrydere Polarstern og Healy foretog i september og oktober 2001 et vellykket togt til Gakkelryggen. AMORE (Arctic Mid-Ocean Ridge Expedition), som togtet kaldtes, er en milepæl i udforskningen af det Arktiske Ocean. Som et led i togtprogrammet (figur 1), der bl.a. indeholdt opmåling og prøvetagning langs den undersøiske ryg, blev der også gennemført undersøgelser i de tilgrænsende dybhavs bassiner. Skibene nåede Nordpolen den 6. september 2001, og for Healy var det højdepunktet på hendes videnskabelige jomfrurejse. Undervejs mødte de den svenske isbryder Oden (se forside), som var på vej tilbage til Svalbard fra Nordpolen med en international forskergruppe. For ti år siden - den 7. september 1991 - nåede Polarstern og Oden som de første konventionelt drevne forskningsplatforme Nordpolen. Det videnskabelige personale og besætningerne på de tre skibe udgjorde en international tværvideenskabelig gruppe fra 17 nationer: Australien, Brasilien, Kina, Tyskland, Estland, Finland, Storbritannien, Italien, Canada, Holland, Norge, Østrig, Rusland, Sverige, Schweiz, Spanien og USA.



Figur 1. AMORE-2001 togtets rute.

Forskning i Arktis er blevet et internationalt indsatsområde. Det Arktiske Ocean, hvis hemmeligheder for blot få år siden lå i et politisk kriseområde med militær konfrontation, bliver nu udforsket i et fredelig internationalt samarbejde.

Under togtet i 2001 blev den vestlige del af Gakkelryggen for første gang nøjagtigt kortlagt, og der blev taget prøver af havbunden. Under den drivende havis gemmer der sig en bjergkæde, der hæver sig op til mere end 3.000 meter over de tilgrænsende ca. 4.000 meter dybe dybhavs bassiner. Ryggen er delt op af en langtrukket, smal, næsten gennemgående dal, som præges af de dramatiske

tektoniske og vulkanske processer, der stadig foregår. De spændende resultater fra AMORE vedrører en lang række forskningsområder, herunder glaciologi, biologi, palæoceanologi, petrologi og geofysik og vil i uddrag blive præsenteret nedenfor.

PÅ JAGT EFTER HULLET I ISEN

En pressemeddelelse om, at Nordpolen var isfri, vakte sensation i år 2000. Det blev taget som tegn på opvarmningen af klimaet. At sådanne huller mellem isflagerne regelmæssigt opstår i stort tal om sommeren i Arktis, forsvandt i den ophedede diskussion. En af togtets opgaver var derfor at observere forandringer i isens tykkelse og fordeling. Dette blev gjort ved sammenligning med målinger, som blev foretaget ved tidligere togter af Polarstern i det centrale Arktiske Ocean i årene 1991 og 1998.

I sommeren 2001 blev der ikke fundet større åbne områder i isen omkring Nordpolen. Mere end 90% af overfladen var dækket af store gamle isflager med en diameter på flere kilometer (figur 2). Mellem flagerne var der smalle render, som var dækket af nysis. Isforholdene var således vanskeligere end året før (i 1999). Der var tydelige forandringer i de observerede tykkelser af isen fra



Figur 2. Kæmpeisflage der består af is, som er flere år gammel. Isflagen har tydelige blå smeltvandspytter og en 'forvitret' isoverflade, som er typisk for sommeren.



Figur 3. 'HEM-BIRD' (helikopter-elektromagnetik-sonde) flyves i en højde af ca. 20 meter over isoverfladen og bruges til indsamling af geofysiske data til bestemmelse af istykkelse.

1991 til 2001. Hvor den typiske istykkelse i området ved Gakkelryggen i 1991 var 2,5 meter, blev der i 2001 målt tykkelser mellem 1,9 meter og 2,1 meter. Årsagen til dette er endnu ikke klarlagt. Det er dog sandsynligt, at isen i området omkring Gakkelryggen var yngre i 2001, og at den stammede fra et andet område end i 1991.

Målingerne af istykkelsen blev hovedsageligt gennemført med en elektromagnetisk sonde, som blev trukket på en slæde henover den ofte nærmest ufremkommelige is. Der blev opmålt en profilstrækning på mere end 100 kilometer over i alt 52 isflager. Der blev også anvendt nye sonder, som gør det muligt at bestemme istykkelsen fra et skib i fart og fra helikopter (figur 3). De gennemførte målinger af istykkelsen tjener også til forberedelserne af ESA's (European Space Agency) 'CryoSat' satellitmission, som skal kortlægge isens tykkelse både i Arktis og Antarktis fra år 2004.

Målingerne af havisen omfattede endvidere bestemmelser af fysiske og biologiske egenskaber i isen og i smeltevandspytter på isflager. Til dette formål blev der boret iskerner. Satellit- og luftbilleder blev undersøgt, ligesom isens tilbagestråling blev bestemt for forskellige overfladetyper. Der blev også gjort iagttagelser og foretaget eksperimenter med hensyn til små hvirvelløse dyrs fødeindtag. Disse dyr, hvis kropsvæsker ikke fryser, har tilpasset sig de ekstreme leveforhold i de små saltvandskanaler på isflagerne.

DET EVIGE ARKTISKE HAVISDÆKKE – HVOR LÆNGE ER EVIGT?

I dag er det centrale Arktiske Ocean permanent dækket af havis, selv om udvekslingsprocesser med 'nabohavene' og sæsonprægede smelteprocesser sørger for, at havisen højst bliver et par år gammel. Maringeologerne indsamlede på togtet sedimentkerner fra havbunden ud for de store sibiriske shelfområder for at kunne beskrive havisdækkets historie. Det er blevet klarlagt, at den gletscherdannelse, der foregik over store områder i Nordasien i den sidste istid, ikke skete efter samme mønster som i f.eks. Nordeuropa. De nyere kortlægninger på land tyder på, at nedsningsfasen satte relativt tidligt ind i de største områder. Området i Østsibirien forblev dog næsten isfrit under det senere skandinaviske nedsningsmaksimum.

Sedimentkernerne, som blev indsamlet under dette togt, skal være med til at underbygge det tidsmæssige forløb af nedsningsen, da dateringerne på land ofte er vanskelige at tyde. Store iskjolde på nærliggende landområder lader sig dokumentere i det Arktiske Ocean ved hjælp af tilstedeværelsen af grove og fine stenrester i sedimentet, som er blevet transporteret af isbjerge. Sedimentkernerne fra det område i Gakkelyggen ved 75° Ø, som ikke tidligere er blevet undersøgt, indeholder flere lag af groft sand og sten – typiske aflejringer fra smelteperioderne fra de store gletschere. De delvist abrupte skift i farve fra olivengrøn over brun i varme perioder til mørkegrønne lag fra kolde perioder gentager sig indtil 6 gange i en sedimentkerne, hvis ældste lag er ca. 200.000 år gamle.

Efterfølgende undersøgelser i laboratorierne skal opklare, hvor stor gletscherens udstrækning i Nordsibirien var i de enkelte perioder, hvilken rolle fugtighedstransporten fra tidvist eksisterende åbent vand spillede for isdannelsen, og hvornår smeltevandet fra de tøende gletschere nåede oceanet i de begyndende varmeperioder. Samtidig kan man kontrollere en hypotese, som amerikanske kolleger har opstillet med hensyn til en svømmende isshelf, der under Istiden skal have strakt sig helt ind i den nordlige polarregion. Denne hypotese holder ikke, idet man finder rester af planktoniske fossiler (foraminiferer og kokkolitter) i polhavets aflejringer fra istiden.

PRÆCISIONSKORTLÆGNING

Der skal bruges nøjagtige kort til undersøgelse af havbunden. På lavere breddegrader er nøjagtige kort en selvfølge. I det Arktiske Ocean fik videnskaben først kendskab til havbundens morfologi, efter at den amerikanske marine kortvarigt stillede atomubåde til rådighed for den videnskabelige udforskning af polbassinet. I den forbindelse blev der optaget dybdeprofiler under isen, og der kunne således fremstilles et kort i grove træk for området omkring Gakkelryggen. Dette kort var et vigtigt led i planlægningen af AMORE-2001 ekspeditionen. Under AMORE ekspeditionen var isforholdene så gode, at det var muligt at udføre præcise dybdekortlægninger. Et værdifuldt resultat fra ekspeditionen er den nu foreliggende detaljerede og meget præcise kartografiske fremstilling af Gakkelryggens morfologi over en længde på næsten 500 sømil.

GAKKELRYGGEN – ET VINDUE IGENNEM JORDSKORPEN

Der blev på toget foretaget geofysiske opmålinger for at kunne bestemme tykkelsen af jordskorpen langs med Gakkelryggen og de tilstødende dybhavs bassiner. Vore opmålinger af Gakkelryggen er et forsøg på at vise, om de globale modeller, der gengiver udbredelsen af meget langsomme rygsystemer, er rigtige, modeller der omfatter dominerende tektonisk eller vulkansk aktivitet. For at besvare dette



Figur 4. For at indsamle seismiske data slæbes en række luftkanoner efter skibet.

spørgsmål blev der anvendt et stort udvalg af forskellige metoder til at beskrive den aktive del af ryggen med hensyn til temperatur og tykkelse af jordskorpen, og der blev udført forsøg fra både isflager, skibet selv og fra helikopter.

For at kunne gennemføre de seismiske målinger (figur 4) var det nødvendigt med et tæt samarbejde mellem de to isbrydere. Et første gennemsyn af data-sættet viste, at tykkelsen af jordskorpen ved Gakkelryggen varierer meget. Den er fra 6 kilometer til bare nogle få hundrede meter tyk. Målingerne viser endvidere, at ryggen ikke svarer til de hidtidigt antagne modeller. Det er overraskende, at der tilsyneladende findes magmatiske centre med regelmæssige intervaller langs ryggen, hvor der produceres væsentligt mere basalt end i nabointervaller. Det blev også vist, at disse områder har været aktive gennem længere geologiske tidsrum.

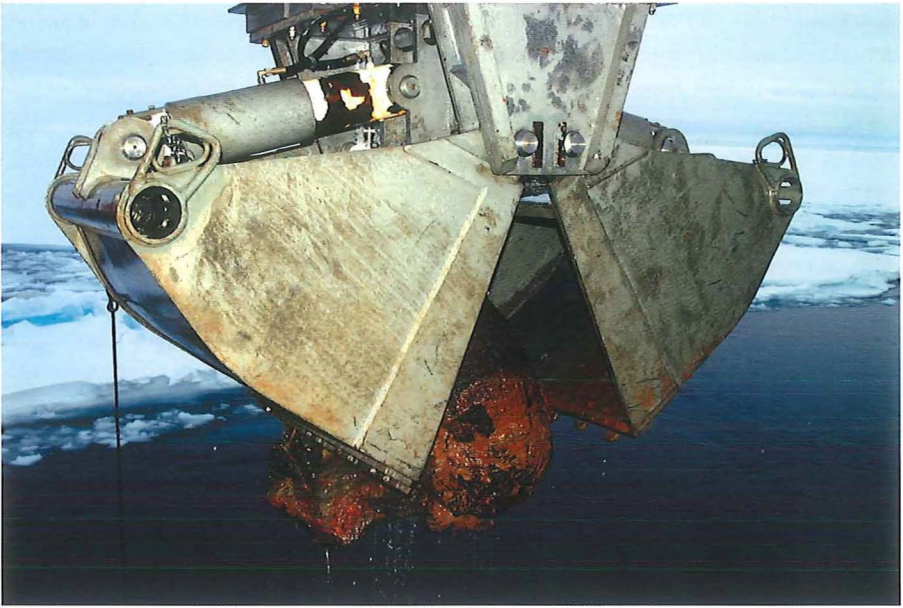
Tre seismiske profiler fra de tilgrænsende bassiner er bemærkelsesværdige. De viser for første gang, hvor meget det oceaniske 'basement', som ligger gemt under op til flere kilometer tykke sedimentære aflejringer, varierer under den ellers flade havbund. En del af sedimentdækket er blevet transporteret fra kontinentalmarginen ned i dybhavsbassinet ved voldsomme skred.

Seismiske og magnetiske målinger har været væsentlige for at opnå en bedre forståelse af de geodynamiske processer, der finder sted under det Arktiske Ocean. For begge målemetoder blev der oprettet dataindsamlingsstationer på isflager. Det var muligt at registrere nogle enkle jordskælv langs Gakkelryggen. Metoderne har for første gang givet oplysninger om sammensætningen af jordskorpen under det Arktiske Ocean. Udover jordskælv fra Gakkelryggen og den nordlige halvkugle registrerede jordskælvstationerne også signaler fra Antarktis – jordskælv der ligger længere væk end 16.000 kilometer fra Gakkelryggen.

AKTIVE VULKANER I POLHAVET

Under den ca. 2 meter tykke is og på bunden af det 5.000 meter dybe Arktiske Ocean ligger de vulkaner, fra hvilke der ved hjælp af fjernstyrede griberedskaber (figur 5) blev indsamlet prøver. Med de ret grove redskaber kan man tage op til 3 tons stenmateriale fra havbunden på én gang. I alt blev der indsamlet mere end 10.000 enkeltprøver.

Det var ventet, at det undersøiske bjerglandskab mere var et udtryk for tektoniske bevægelser end for vulkanske processer på grund af den ringe spredningshastighed, og man regnede derfor med at finde overvejende peridotitter og gabbroer. Peridotitter er olivinrige magmatiske bjergarter fra den øverste del af kappen, og gabbroer (plagioklas-proxenbjergarter) dannes i den nederste del af oceanskorpen. Begge bjergartstyper kun kan komme op til overfladen af havbunden ved tektoniske bevægelser.



Figur 5. TV-styret griberedskab – et stort men meget virkningsfuldt redskab, som bruges til at optage prøver fra havbunden.

I størstedelen af stenprøverne fandt man basalter, som er størknede produkter af magma fra undersøiske vulkaner. Prøvernes form er udtryk for mødet mellem glødende lava og iskoldt havvand ved et undersøisk vulkanudbrud. Den varme lava afkøler til en tyk sort slangeformet glasrand, som lavaen flyder indeni. På den måde opstår såkaldte basaltpuder (figur 6), som danner de øverste godt 2.000 meter af den oceaniske skorpe. Der blev fundet basalter af typer, man ikke havde forventet at finde i Gakkelryggen. Det mest bemærkelsesværdige er de stærkt porfyriske basalter, hvis andel af store krystaller (ofte mere end 50%) kun kan forklares ved forekomsten af store magmakamre, hvor krystallerne har kunnet vokse. Deres forekomst er i klar modstrid med den tidligere formodning om, at den ekstremt langsomt spredende Gakkelryg (få millimeter om året) slet ikke kunne producere magma nok til at have et magmakammer. Yderligere argumenter mod den tidligere hypotese er forekomsten af gabbroer, som kun dannes ved magmakammervirksomhed.

Når prøverne var kommet ombord, blev der fremstillet mikroskoppræparater - tyndslib - på 0,03 millimeters tykkelse. Ud fra tyndslibene kan man ved hjælp af mikroskop allerede få timer efter bjærgningen af en prøve få præcise informationer om dens sammensætning og oprindelse, som dermed delvis kan forklares.



Figur 6. Kæmpepude af basalt, som er omgivet af en typisk rynket glasskorpe. En sådan prøve vejer flere tons og kan kun bjærges af store griberedskaber (f.eks. det TV-styrede griberedskab på figur 5).

Resultaterne viser, at der langs ryggen sker en forholdsvis ringe opsmeltning af bjergarter og dermed, at tykkelsen af skorpen er relativt lille. Dette udsagn er dog svært at bringe i overensstemmelse med den observerede vulkanske aktivitet. Detaljerede undersøgelser skal nu give oplysning om forholdet mellem spredningsraten, som er den hastighed, hvormed en plade bevæger sig væk fra spredningsryggen, og tykkelsen af skorpen.

'VARME KILDER' – SPRUDLENDE HEKSEKEDLER I DET ARKTISKE DYBHAV

Hydrotermale skorstene er steder på midtoceanrygge (se også VARV 1992, 1), hvor der sker betydelige hydrotermiske udvekslingsprocesser mellem bjergarterne i oceanskorpen og den overliggende vandmasse. Hydrotermale kilder findes i flere områder langs rygaksen. Tre fænomener gør de hydrotermale områder let identificerbare: temperaturanomalier (-udsving) i de oceaniske vandmasser tæt ved havbunden i nærheden af skorstenene, tilstedeværelsen af en række af karakteristiske mineraler og dannelsen af kolonier af højtstående – kemotrofe – faunaer, der får deres energi ved oxidation af svovlbrinte. Ved hjælp af hydrografiske profiler blev der i 2001 mange steder fundet anomalier i temperaturfordelingen i nærheden af havbunden i Gakkelryggen. Det blev endvidere kon-

stateret, at hydrotermiske vandudvekslinger mellem den oceaniske skorpe og de ovenover liggende vandmasser var langt mere udbredte i det Arktiske Ocean end hidtil antaget.

Ved de hydrotermale skorstene finder man ofte højt specialiserede samfund af hvirvelløse, marine dyr. De består bl.a. af rørorm og store muslinger, som har tilpasset sig det meget specielle kemotrofiske stofskifte.

AFSLUTNING

Under AMORE-2001 togtet lykkedes det for første gang at gennemføre detaljerede undersøgelser af den centrale del af Gakkelryggen, som er en særdeles spændende del af det verdensomspændende midtoceaniske rygsystem. Fremover er der nu tilbage at undersøge dens østlige forlængelse mod den sibirske kontinentalmargin og at bruge undervandsrobotter eller forskningsundervandsbåde for et detaljeret og meget præcist prøvetagningsprogram. Gakkelryggen er muligvis den nordlige hemisfæres vigtigste geologiske struktur, og dens historie såvel som egenskaber kontrollerer mange træk af de tilgrænsende dybhavsbassiner og kontinentalmarginer, ikke mindst øst og ord for Grønland.