

af Troels V. Østergaard

Geologi i Trykkoger

Som mineralog og petrograf beskæftiger man sig med at undersøge mineraler og bjergarter, deres fysiske egenskaber, strukturer, kemiske sammensætning og forekomstmåde. Hvert træk man opdager hos det man undersøger, afføder straks spørgsmål, som f.eks. hvornår? og hvordan? Spørgsmålet "hvornår" refererer til de problemer der er forbundet med tingenes og begivenhedernes historie. Et af geologiens mål er at skildre vor Jords historie og hertil kan både mineralogien og petrografen give vigtige bidrag. Spørgsmålet "hvordan" refererer til de naturlige processer og begivenheder, til måden hvorpå ting opstår, sker eller forandres. Et tilfredsstillende svar på spørgsmålet "hvordan" kan være meget vanskeligt at finde, men lykkes det er det også det, der giver forskeren den største glæde.

I gamle dage forklarede man mange naturfænomener som resultat af overnaturlige væsners handlinger. For eksempel dannedes Sjællands Odde, da en kæmpe engang ville bære en vantefuld sand til Jylland. Der var imidlertid hul på vanten, så han tabte det meste, og da han opdagede det blev han så ærgerlig at han tømte det som var tilbage i tommelfingeren ud. Således dannedes Odden og den bakke der findes yderst ude.

I dag ser vi på naturlige processer som udslag af energi, der virker på eller gennem stof. Der er naturligvis en mængde vi ikke forstår, men vi har tiltro til at naturen principielt er forståelig - således at stiller vi spørgsmål gennem observationer eller velvalgte eksperimenter, vil vi også få de rigtige svar. Mange af de fænomener geologerne beskæftiger sig med, er resultat af begivenheder som har fundet sted for millioner af år siden, og det er en integrerende del af denne tiltro til naturens forståelighed at de naturlove vi kan iagttage i dag har været virksomme gennem hele Jordens historie. Det var James Hutton, en berømt engelsk geolog og naturfilosof, som i sin "Teori om Jorden" (der udkom i Edinburgh 1785) skrev, at "Jordklodens historie må forklares ved hjælp af det, man kan se ske nu". Man taler om dette "aktualistiske princip" som grundlaget for al geologisk forskning.

Huttons princip om at anvende det man kan se ske nu til at forklare det som er sket, har været anvendt med held indenfor mange grene af geologien. Når man som for eksempel ved Kara Bogaz ved det Kaspiske Hav kan iagttage, hvorledes der kan dannes store mængder salt ved fordamp-

ning af havvand, er det nærliggende og i fuld overensstemmelse med det aktualistiske princip at antage at de saltaflejringer vi finder i den danske undergrund (se Varv 1966,1) også er dannet ved fordampning af havvand.

De begivenheder, der udspiller sig under jordens overflade kan naturligvis ikke iagttages direkte, men takket være landhævninger for eksempel under bjergkædedannelse, og den nedbrydning vind og vejr forårsager, kan man rundt omkring på Jorden finde mineraler og bjergarter, som er dannet i mange forskellige dybder. Da man ikke kan studere dannelsen af tilsvarende mineraler og bjergarter direkte, må man anvende indirekte metoder - heriblandt laboratorie-efterligninger af de mineral- og bjergartsdannende processer.

De mineraler og bjergarter hvis dannelse man ikke kan iagttage direkte er ofte dannet under højt tryk, ved høj temperatur og i nærvær af vand. Forsøg under tilsvarende forhold er derfor uhyre vigtige. Blandt geologer går den slags forsøg under navnet "**Hydrotermale synteser**" og det laboratorium hvori de udføres kaldes et "**synteselaboratorium**". Denne artikel handler om, hvorledes man i praksis laver den slags forsøg, og nogle af resultaterne skal kort omtales.

Allerede i den første halvdel af det 19. århundrede forsøgte man at fremstille mineraler kunstigt. Det lykkedes således den franske mineralog Daubrée at lave bl.a. **tinsten** (SnO_2), som i naturen dannes fra blandt andet vulkanske gasser, ved at lade luftformig tinklorid reagere med vand ved høj temperatur. Før år 1900 var ca. 80 mineraler fremstillet kunstigt. Mange af forsøgene bar imidlertid tilfældighedernes præg, dels fordi udgangsmaterialernes sammensætning ikke kendtes godt nok, dels fordi de anvendte tryk og temperaturer ikke kendtes nøjagtigt. Dette følte dog ikke som en fejl idet man var tilfreds med selve det at have fremstillet et mineral.

I begyndelsen af dette århundrede begyndte man at betragte mineralerne i en bjergart som faser dannet i ligevægt med hinanden. Pionerer som Van't Hoff og N.L.Bowen anvendte moderne principper (termodynamikken) til beregning af ligevægte mellem saltopløsninger og mineraler og mellem smeltmasser og mineraler. Man udførte nu eksperimenter ikke kun for at lave mineralerne, men for kvantitativt at studere de kemiske og fysiske betingelser under hvilke mineralerne og mineralselskaber kan dannes.

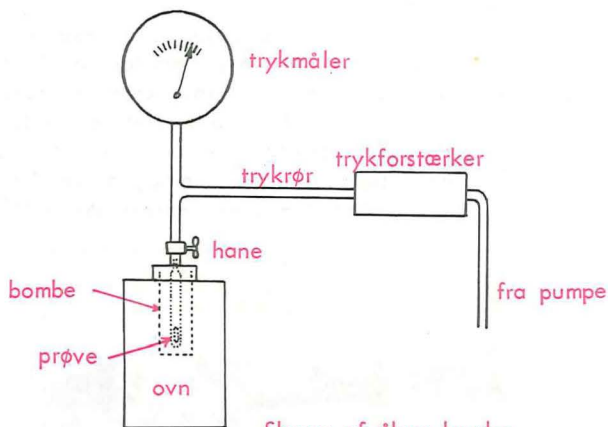
I 1917 beskrev to amerikanere en undersøgelse over systemet: vandkaliumsilikat-siliciumoxid. Det var på mange måder et betydningsfuldt arbejde. De fandt bl.a. ud af at vanddamp ved høj temperatur og tryk kan opløse betydelige mængder af silikatmineraler. Et andet resultat var påvisningen af, at vandholdige silikatsmeltmasser har et såkaldt "**andet kogepunkt**". Afkøler man en vandholdig silikatsmelte, vil der efterhånden udskilles krystaller. Da disse ikke indeholder vand, vil vandindholdet og dermed vandtrykket i smeltmassen stige og man vil da kunne iagttage en kog-

ning fremkaldt af afkøling - når vandtrykket bliver lige så stort som omgivelsernes tryk. I en naturligt forekommende silikatsmelte - et magma - vil damptrykket kunne stige så voldsomt, at magmaet eksplosivt kan bane sig vej til jordoverfladen, som det ses ved vulkanudbrud.

Når man vil undersøge mineraldannelse under høje tryk og temperaturer, er det nødvendigt at have reaktionsbeholdere som ikke ødelægges under disse betingelser. De første reaktionsbeholdere - autoklaver eller som de oftest kaldes, bomber - var lavet af kanonstål, og det er udviklingen af stålsorter overvejende til militære formål, jetmotorer, højtryksledninger og haner til raketter, der har muliggjort de undersøgelser, der udføres i dag.

I de såkaldt "lukkede" bomber dannes trykket ligesom i en trykkoger ved udvidelsen af det vand, man har spærret inde i dem. Ved hjælp af en tabel over vands massefylde ved forskellige temperaturer og tryk kan man beregne, hvor meget vand, der skal i bomben.

De "åbne" bomber er ved hjælp af et kapillarrør af rustfrit stål forbundet med en pumpe, så de kan fyldes med vand til det ønskede tryk er nået. De åbne bomber har flere fordele frem for de lukkede. Man kan kontrollere vandtrykket og har dermed mulighed for at opdage en eventuel utæthed i bomben. Når man arbejder med lukkede bomber viser det sig først ved forsøgets afslutning om bomben har holdt tæt. Da forsøgene kan vare i måneder er det vigtigt straks at opdage lækager.



Skema af åben bombe

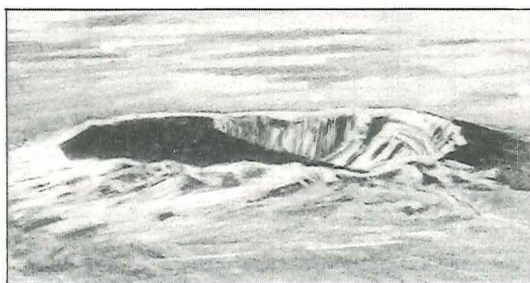
De nævnte bomber opvarmes med små elektriske rørovn. Ovnens og bombernes temperaturer måles ved hjælp af termoelementer, og ovntemperaturene reguleres automatisk, så de holdes konstante med små afvigelser.

Som udgangsmateriale til et synteseforsøg anvender man ofte fint formalet pulver med kendt kemisk sammensætning. Pulveret kan være knust glas, en blanding af kemikalier, kunstige eller naturlige mineraler eller nedknuste bjergarter. Prøven anbringes i en kapsel, som kan være af platin, guld eller sølv, sammen med en passende mængde vand. Kapslen kan eventuelt svejdes til inden den anbringes i en bombe. Prøven opvarmes til den ønskede temperatur og underkastes de ønskede tryk. Efter et tidsrum, som kan være mellem få timer og flere måneder, afbrydes forsøget, idet prøven om muligt afkøles pludseligt, så man undgår uønskede reaktioner mellem de dannede mineraler under afkølingen. Ved hjælp af mikroskopiske og røntgenografiske metoder bestemmes, hvilke forbindelser eller mineraler (faser), der er dannet i prøven. Eventuelt bestemmes også mængderne af de dannede forbindelser og disses kemiske sammensætning.

Formålet med et synteseforsøg kan enten være at fremstille et bestemt mineral eller at studere faseligevægte i et bestemt system.

Til syntesens "triumfer" kan regnes fremstillingen af diamanter. Den første meddelelse herom fremkom i 1955. Der er siden fremstillet mange kunstige diamanter, og det viser sig, at det er nemt, når blot man kan opnå et tilstrækkeligt tryk. Ved 1560°C og 87000 atmosfærer omdannes grafit, anbragt mellem to nikkelpopper, således til $\frac{1}{2}$ cm store diamanter på 5 minutter. De tryk- og temperaturbetingelser, der kræves til deres dannelse, giver geologerne en forestilling om, under hvilke forhold de ægte diamanter må være dannet.

I Arizona findes en kraterlignende dannelse, som i mange år har voldt geologerne hovedbrud. Krateret er 1200 m i diameter og 175 m dybt, og rundt om krateret er der fundet tusindvis af fragmenter af meteorisk jern. Alligevel er det fra tid til anden blevet betvivlet, at krateret virkelig skyldes et meteoritnedslag. Det er resultater opnået i laboratoriet, der har overbevist forskerne herom. Det viser sig nemlig, at der i sandstenen i kraterets bund er dannet et mineral - coesit - som man tidligere havde



← 1200 m →

Det store meteorit-krater i Arizona

fundet under forsøg med kvarts under meget højt tryk. Coesits tilstedeværelse tyder altså på, at sandstenen har været udsat for et enormt tryk, og den eneste måde hvorpå et så højt tryk kan tænkes dannet på jordoverfladen er ved et meteoritnedslag.

De synteser, hvis formål som nævnt er at undersøge betingelserne for ligevægt i forskellige systemer af kemiske forbindelser, har i særlig grad interesse for geologien. Men også i cementindustrien og i den keramiske industri udføres analytiske synteser, hvis resultater i mange tilfælde kan have geologisk interesse. Det egentlige systematiske arbejde med analytiske synteser af geologisk betydning startede med grundlæggelsen af Geophysical Laboratory i Washington år 1906.

Jeg vil nu omtale nogle vigtige bjergarters dannelse set i lyset af den viden der er samlet ved hjælp af analytiske synteser.

Goranson (1931) var den første, der havde et granitisk magma i sine bomber. Han fandt, at der opløses vand i en granitisk smelte under tryk og at smeltmassen er mere letflydende, når der er opløst vand i den, end når vandet mangler. Den mængde vand, der kan opløses afhænger af trykket. Jo større vandtryk jo mere vand opløses. Når magmaet stiger op gennem jordskorpen mindskes det tryk der hviler på det. Da det derfor kan indeholde mindre vand, bliver det nødt til at afgive noget af det, hvorved magmaet samtidig mister varme. Også ved krystallisationen af mineraler uddrives vand. Dette vand er i stand til at opløse en hel del (nogle tiendedele procent) silikatmateriale. Opløsningen kan så samle sig under magmakammerets tag eller strømme ud gennem sprækker i taget eller sidestenen og der danne dels såkaldte pegmatiter – grovkornede kvarts-feldspat bjergarter, dels, længere fra granitmagmaet, malmforkomster.

Problemet om selve dannelsen af granitisk magma har været genstand for experimentelle undersøgelser. Undersøgelser i tyverne viste at granitisk magma kan dannes som det restmagma, der bliver tilbage, når det meste af et basaltmagma er krystalliseret. Men denne proces forklarer kun de små forekomster af granitiske lavaer, der findes sammen med basaltlavaer og ikke dannelsen af granit-massiver på hundreder af kubikkilometer. Disse store granit-massiver findes ofte i kernerne af nederoderede bjergkæder omgivet af bjergarter, der er omdannet på grund af de varme- og trykpåvirkninger de har været udsatte for under bjergkædefoldningen.

Winkler, der arbejder i Tyskland, har undersøgt hvorledes almindelige sedimenter som for eksempel ler og mergel opfører sig, når de udsættes for betingelser svarende til dem som hersker under en bjergkædefoldning. Han kom til det meget interessante resultat, at disse bjergarter smelter delvis og, at det smeltede har granitisk sammensætning ligegyldig hvilke bjergarter han starter med. Det som ikke smelter får en mineralogisk sammensætning, som svarer nøje til de bjergarters, som i naturen omgiver granit-massiverne. De temperaturer, der er nødvendige for disse processer ligger

i området 650-750°, højst 800°. Winklers resultater viser altså, at ved de temperaturer som kræves for at omdanne sedimenter til krystallinske skifre må sedimenterne smelte delvis, og at smelten har granitisk sammensætning. Det granitmagma som har dannet de mange store granitforekomster behøver altså ikke at være kommet fra dybet, men kan være dannet i 10-20 km's dybde ved delvis opsmeltning af de omgivende bjergarter.

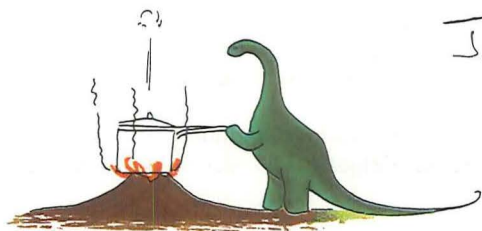
De to vigtigste magmabjergarter er **granit** og **basalt**. Granit findes udelukkende på kontinenterne, mens basalt både er trængt frem på oceanbunden og på kontinenterne. Basaltmagmaet dannes ikke som granitmagmaet i Jordens skorpe, men dybere nede i Jordens kappe. Det viser sig, at der findes to typer basaltmagma: et mere SiO₂-rigt, Na-fattigt og et SiO₂-fattigere, Na-rigt. De to kaldes henholdsvis **tholeiitisk** og **alkali-basaltisk** magma. Experimentelle undersøgelser har opklaret det fundamentale problem om hvorvidt det drejer sig om to forskellige "urmagmaer" eller om de to typer basaltmagma stammer fra samme kilde. På grundlag af eksperimenterne er man kommet til følgende billede: I dybder mellem 60 og 100 km sker der en delvis opsmeltning af Jord-kappens bjergarter på steder hvor der tilføres varmeenergi. Man antager at kappen i disse dybder består af **granatperidotit** (opbygget af mineralerne pyroxen, olivin og granat). Forsøgene viser nu at sammensætningen af den smelte som først dannes, når granatperidotit smelter ændres med trykket. Ved tryk svarende til 60 km's dybde dannes smelte af tholeiitisk sammensætning, mens der ved større tryk dannes en smelte med alkalibasaltisk sammensætning, som det lettest smeltelige fra granat-peridotit. Basaltmagmaernes kemiske sammensætning må altså være afhængig af i hvilket dyb opsmeltningen er foregået. Undervejs til jordoverfladen kan det basaltiske magma gøre holdt i magmareservoarer, som for eksempel under Hawaii. Hvis magmaet begynder at udskille krystaller her kan dette dels føre til dannelsen af strøknorn, som det ses i porfyre, dels til at nogle af de lavaer, der kommer op til jordoverfladen har en anden sammensætning end det oprindelige magma fordi de tidligt udskilte krystaller er sunket til bunds.

Et særligt virkefelt er de metamorfoserede bjergarter eller de såkaldt krystallinske skifre. De metamorfe bjergarter dannes ved omkrystallisation af andre bjergarter. Disse kan være sedimenter eller magmabjergarter. Omkrystalliseringen sker fordi bjergarterne udsættes for andre tryk og temperaturer end de - så at sige - er vant til, for eksempel gennem en bjergkædefoldning. Det der sker er, at de mineraler, der findes reagerer med hinanden og danner nye mineralselskaber, som er tilpassede de ændrede tryk og temperatur-forhold. I naturen kan man iagttage hvor og under hvilke omstændigheder mineralselskaberne optræder, men det er kun ved hjælp af eksperimenter man kan finde ud af, ved hvilke temperaturer og tryk de forskellige reaktioner foregår. Der foregår i øjeblikket en meget intensiv

forskning rundt omkring i verden for at fastlægge temperatur og trykbetin-
gelse for de forskellige mineralreaktioner.

Det er nu i mange tilfælde muligt, på baggrund af eksperimenterne,
at rekonstruere temperaturforholdene i en bjergkæde under metamorfosen.
Nogle steder er der en jævn stigning i temperaturen fra område til område
(f.eks. Skotland), mens der i andre tilfælde er en hurtig vekslen af høj-
temperatur og lavtemperatur mineralselskaber (f.eks. i Japan eller Pyrenæ-
erne). Det er klart at en sådan kortlægning af "metamorfoseklimaet" har
stor betydning for vurderingen af forholdene i bjergkæderne og jordskorpen
- steder hvor vi ikke kan iagttage processerne, man hvor spørgsmålet
"hvordan" alligevel rejser sig.

Forsøgene på at anvende resultaterne fra synteseforsøg på geologiske
problemer er tidligere blevet skarpt kritiseret. Man kunne således for nogle
årtier siden opleve, at en professor under en diskussion i London tog en
lille platindigel op af lommen og gjorde grin med de tåber, der troede,
at der kunne komme geologi ud af sådan en. Det kritikerne især hæftede
sig ved, var, at den kemiske sammensætning af de naturlige systemer var
betydelig mere komplicerede end dem man undersøgte i laboratoriet, samt
at de tidligere undersøgte syntesevarer systemer uden vand. Efterhånden
undersøgte man dog stadig mere indviklede systemer og især efter anden
verdenskrig også systemer med vand som en af de deltagende faser. Så-
danne hydrotermale syntesevarer er nu en anerkendt forskningsgren, hvis resul-
tater har været af stor betydning i geologien. Man må derfor glæde sig
over at denne forskning nu også skal udføres her i landet.



Israels V. Østegaard.

RETTELSE TIL BAGSIDEN I NR. 2 - 1967

Ved grov beskæring er et par linier for meget faldet ud af notitsen
om Hekla. Ideen er, at Hekla gennem tertiærtiden kunne have produceret
materiale svarende til 5 gange Islands rumfang over havniveau - såfremt
udbrudshyppighed og materialeproduktion var den sam-
me som i historisk tid (ca. 1 kubikkilometer per 100 år).