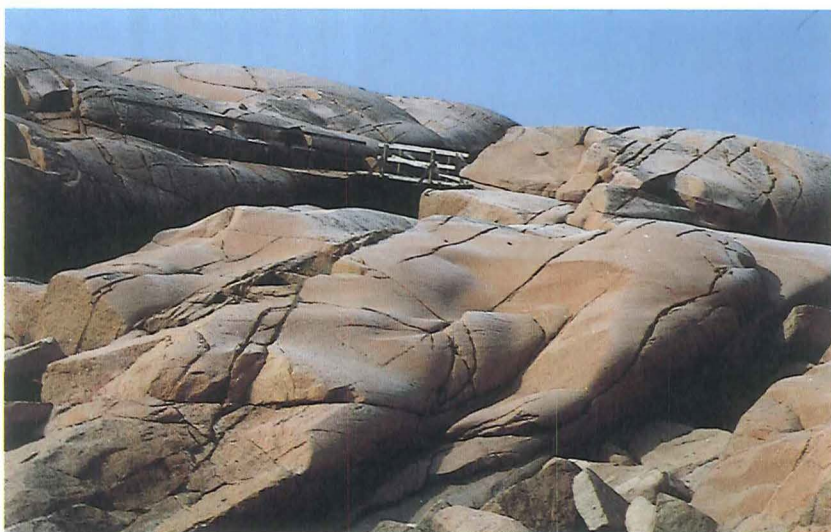


MAGMAKAMRE I LABORATORIET

af J. Richard Wilson

Magma er betegnelsen for bjergarter i flydende form, som vi eksempelvis kender det fra lava i forbindelse med vulkanudbrud på jordens overflade. Magma er dannet ved delvis opsmeltning af Jordens kappe eller skorpe. Enten kan magmaet trænge helt op til overfladen, eller også kan det størkne undervejs i et såkaldt magmakammer. De geologiske processer, der finder sted i et magmakammer kan ikke iagttages direkte, men efter endt størkning og millioner af års erosion, er nogle af de 'fossile' magmakamre blevet blottet i naturen, så man kan studere størkningens resultat.

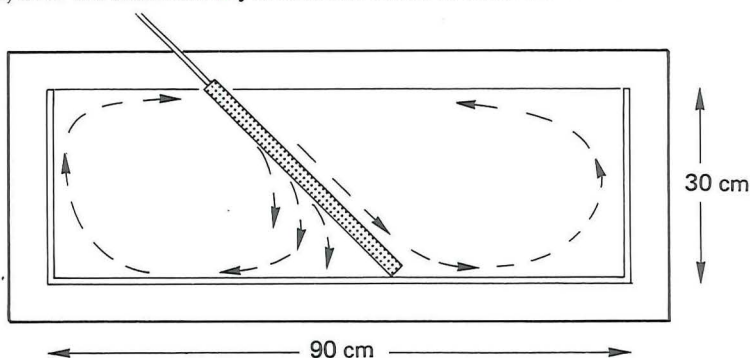


Figur 1. Granit fra Bohuslän. Granitten repræsenterer et ca. 900 mio år gammelt fossilt magmakammer.

Dannelsesprocesserne for magmakamre kan naturligvis også anskues rent teoretisk eller ved modelforsøg på tilsvarende materialer. Her er specielt studiet af flydende materials dynamik blevet vigtigt for forståelsen af, hvordan magmaer opfører sig, og 'simple' modelforsøg med afkøling og størkning af enkle vandige opløsninger har i den forbindelse kastet nyt lys på magmakammerprocesserne.

Det har længe været kendt, at den kemiske sammensætning af lavaen fra en bestemt vulkan kan ændre sig med tiden, men først for nylig har man indset, at det kunne skyldes, at magmakammeret er opbygget af lag af magma med forskellig sammensætninger. Hvorledes et magmakammer kan blive lagdelt efter kemisk sammensætning (zoneret), skal vi forsøge at illustrere med følgende laboratorieeksperiment.

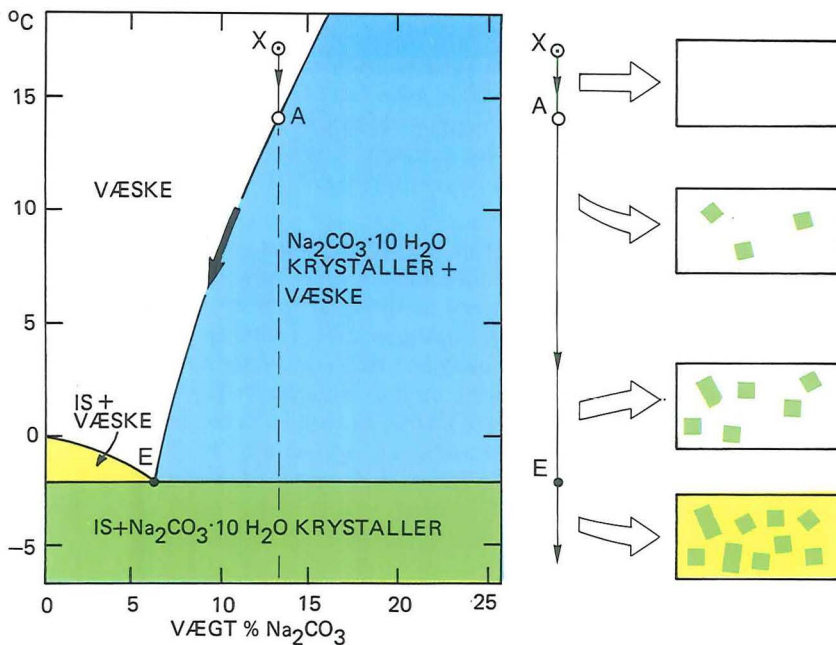
Et magmakammers størrelse og form kan variere meget, men vort 'laboratorie-magmakammer' består af en beholder med en enkel form. Beholderen er lavet af plexiglas med et isolerende materiale omkring. Dele af isoleringen fjernes, når man observerer forsøgets gang. I plexiglasbeholderen anbringes en vandig opløsning af et eller andet kendt salt, og denne væske nedkøles nu ved hjælp af en meget kold væske, der løber gennem en hul, rektangulær kobberplade. Denne kobber-køleplade kan flyttes i beholderen, så pladen f.eks. danner en vinkel med beholderens bund og top. Herved opnår man, at der kan udføres to forsøg på samme tid: et forsøg over køleelementet, hvor der simuleres krystallisation langs et skrånende gulv i magmakammeret, - og et andet forsøg under køleelementet, hvor der simuleres krystallisation under et skrånende loft.



Figur 2. Opbygning af beholderen brugt til forsøget. Opløsningen befinder sig i en gennemsigtig glasbeholder, der er pakket ind i et isolerende lag. Afkøling af opløsningen sker ved hjælp af afkølingspladen (vist prikket). Pilene viser strømningsretningen af opløsningen i begyndelsen af forsøget, hvor opløsningen er præget af termisk konvektion.

Laboratorie-magmakammeret

Til de følgende forsøg er der anvendt en 13 % natriumkarbonat-opløsning og en kølevæske ned en temperatur på ca. -22°C . Indholdet af natriumkarbonat i vandet medfører, at vandets frysepunkt nedsættes fra 0°C til ca. -2°C i det såkaldte eutektiske punkt E (se fig. 3), som svarer til en ca. 6 % Na_2CO_3 -opløsning. Når vi om vinteren salter veje, udnyttes netop det samme princip til at sænke vands frysepunkt.



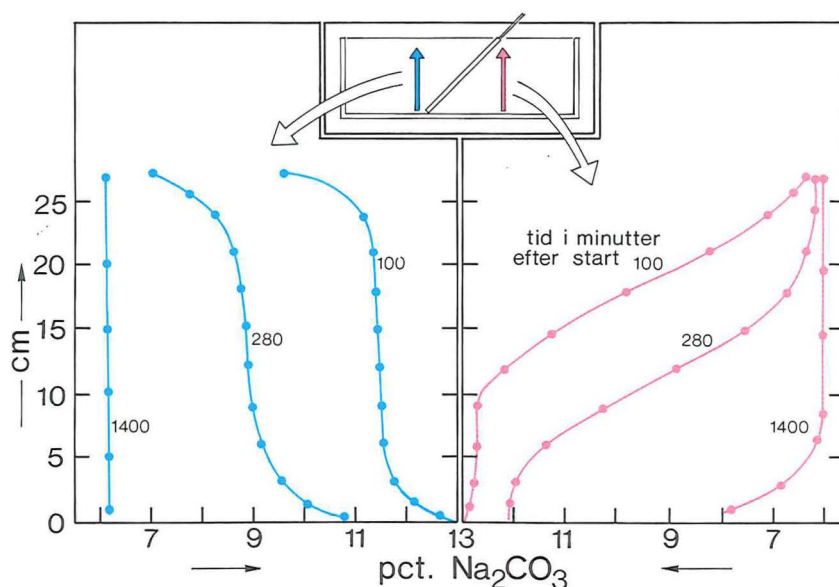
Figur 3. Hvad sker der, når opløsningen afkøles?

Når opløsningen af natriumkarbonat afkøles, sker der flere forskellige ændringer med den, som kan ses i diagrammet herunder. Diagrammet viser hvilke faser (væske og krystaller), vi har ved forskellige temperaturer og indhold af natriumkarbonat i opløsningen. Vor opløsning indeholder 13 % natriumkarbonat, og temperaturen er ved forsøgets start 17° C. Dette er vist med punktet X, der ligger i det hvide felt i diagrammet. Afkøles opløsningen, falder temperaturen, og ved ca. 14° C (punkt A) forlader vor opløsning det hvide væske-område og går ind i det blå felt, hvor natriumdecahydrat begynder at udfældes fra opløsningen. Vi har nu både væske og natriumdecahydrat-krystaller i forsøgsbeholderen. Samtidig med, at der udfældes natriumdecahydrat-krystaller bliver den resterende opløsning fattigere på natriumkarbonat, og opløsningens sammensætning vil bevæge sig mod vand-siden med faldende temperatur. Den rute, opløsningen følger, er vist med pilen langs kurven fra A til E mellem det hvide og blå område i diagrammet. Ved punktet E er opløsningen afkølet til -2° C. Under afkølingen fra A til E er der udfældet flere og flere krystaller af natriumdecahydrat, og restopløsningen indeholder nu kun ca. 6 % natriumkarbonat. Ved -2° C begynder også is at udfældes fra opløsningen sammen med natriumdecahydrat, og dette fortsætter indtil hele den resterende væske er brugt op. Først derefter vil temperaturen kunne falde igen, og vi har nu en blanding af is og natriumdecahydrat-krystaller i forsøgsbeholderen. Punktet E ligger ved en temperatur, under hvilken vi ikke mere kan have væske til stede. Et sådant punkt kaldes et eutektisk punkt.

I det eutektiske punkt E krystalliserer is og natriumkarbonat samtidigt. Med en udgangssammensætning af opløsningen til højre for E i fig. 3 begynder Na_2CO_3 (det vil sige, det er egentligt natriumdecahydrat, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, der starter med at krystallisere) at krystallisere alene ved afkøling af væsken. Sammensætningen af den resterende væske vil derfor gradvis nærme sig E, hvor også is begynder at krystallisere, når temperaturen er faldet til -2°C .

I det følgende vil vi se på et eksperiment, hvor køleelementet har en hældning på 45° . Forsøget er beskrevet i figur 4 og 5 og afkøling og krystallisation i den del af kølebeholderen, der er over køleelementet, beskrives først.

Efter ganske kort tid bevirker afkølingen en temperatur-styret cirkulation (termisk konvektion) af opløsningen mod uret, som vist med pile i figur 2.



Figur 4. Ændringer i sammensætning af restopløsningen med tiden, over (til venstre) og under (til højre) pladen, der hælder 45° . Sammensætningerne er målt i forskellige højder over bunden af beholderen som vist i figuren.

Efter ca. 15 minutter ses de første natriumdecahydrat-krystaller på køleelementet. Krystallisationen af natriumdecahydrat medfører fjernelse af tungere komponenter fra væsken lokalt. Den resterende væske bliver derved lettere og stiger op mod overfladen. Denne type konvektion, der skyldes forskelle i væskens sammensætning, betegnes sammensætningsbetinget konvektion for at skelne den fra den tidligere nævnte termiske konvektion.

Efter ca. 30 minutter er det meste af køleelementet dækket med krystaller. I det følgende kvarter bliver den sammensætningsbetingede konvektion langsomt dominerende over den termiske konvektion, og opløsningens cirkulationsretning bliver gradvis omvendt (det vil sige, med uret i figur 2). Tykkelsen af de opstigende tunger af natriumkarbonat-fattig væske er knap en millimeter. Under deres opstigen sker der en opblanding med den øvrige væske. Ca. 50 minutter efter starten af forsøget ses de første iskrystaller nederst på køleelementet. Dette skyldes, at opløsningen på dette sted har nået den eutektiske sammensætning. Efter yderligere 20 minutter ses et indre, kompakt hvidt lag af is og natriumdecahydrat og et ydre lysegråt lag af spidse natriumdecahydrat-krystaller.

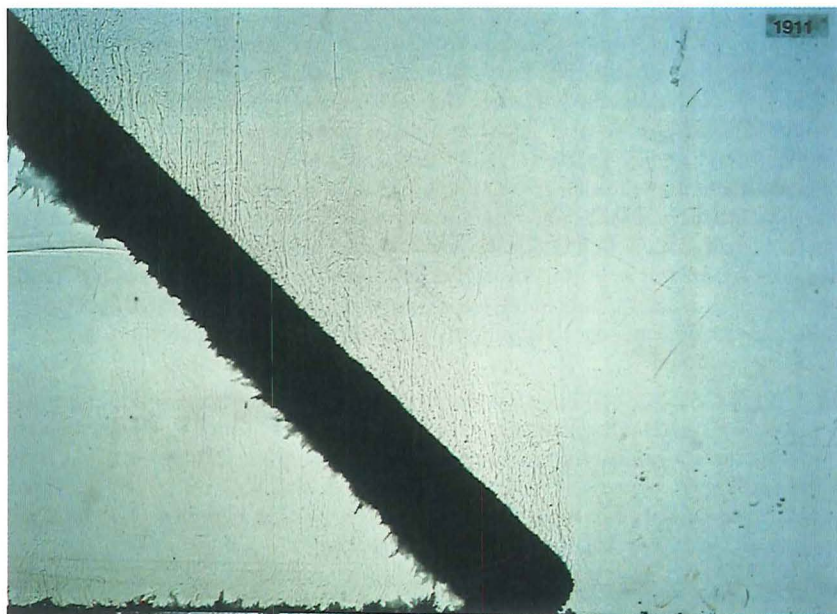
Opløsningens totale sammensætning er efter 100 minutters forløb forandret i retning mod sammensætningen i det eutektiske punkt. Der er dog sket det, at opløsningen er blevet zoneret, idet væsken ved bunden er omtrent uændret siden starten, hvorimod der er sket en reduktion af natriumkarbonat-indholdet ved overfladen. Dette skyldes, at den opadstigende væske nær toppen af køleelementet til stadighed bliver opblandet med den øvrige væske. Den opstigende væske er derimod tyngdemæssig stabil ved overfladen, og zoneringen bibeholdes derfor i væsken, indtil den eutektiske sammensætning er nået.

Efter 280 minutter har fortsat krystallisation af hovedsageligt natriumdecahydrat bevirket, at opløsningens totalsammensætning nærmer sig det eutektiske punkt, men stadig opretholdes en zonerung fra top til bund. Sammensætningen ved bunden er nu nået et sted midtvejs mellem den eutektiske og den oprindelige sammensætning. Efter ca. 23 timer (1400 minutter) har hele opløsningen nået den eutektiske sammensætning.

Figur 5. Billeder fra forsøg med afkøling af natriumkarbonatopløsning. Øverste billede er optaget 60 minutter efter forsøgets start, nederste billede efter ca. 300 minutter.

På øverste billede ses en vandret grænseflade under kølelegemet. Grænsefladen adskiller den sammensætningsbetingede lettere zonerede væske fra den nedre homogene og tungere væske. På beholderens bund ses voksende krystaller, der er faldet ned fra deres oprindelige placering på kølelegemet. Ved krystallisation af natriumkarbonat frigøres let væske, der stiger op mod overfladen.

Efter 5 timers forløb (nederste billede) er tykkelsen af krystallaget på kølelegemet vokset betydeligt, og under kølelegemet har grænsefladen på beholderens bund, så hele væskemængden er blevet sammensætningsmæssigt zoneret. Over kølelegemet ses fortsat sammensætningsbetinget konvektion. Der er blevet indsprøjtet et lilla farvestof, der oprindeligt sås som en lodret streg, men som nu viser væskens cirkulationsmønster, nemlig bevægelse bort fra kølelegemet i den øvre halvdel og indad i den nedre halvdel. Stregens S-form viser væskens tendens til at blive underinddelt i såkaldte 'dobbelt-diffusive' lag.



Vi vender nu tilbage til den del af forsøget, der foregår under køleelementet. Igen starter vi med at have termisk betinget konvektion (fig. 2). Denne gang ses de første natriumdecahydrat-krystaller efter 20 minutter, og analogt med forsøget over køleelementet frigøres der natriumkarbonat-fattig lettere væske. Denne væske ligger som et tyndt grænselag langs køleelementet og stiger op imellem de voksende krystaller. Nogle krystaller løsner sig og falder til bunds, hvor de fortsætter med at vokse. Efter 25 minutter kan man øverst i beholderen se en skarp vandret grænseflade: under fladen er den tunge velblandede opløsning, over fladen findes den lettere frigjorte restvæske. Denne grænseflade bevæger sig gradvis nedefter, og efter 100 minutter er den kun 8 cm fra beholderens bund. På dette tidspunkt har væsken ved overfladen omtrent en eutektisk sammensætning og natriumkarbonat-indholdet stiger langsomt nedefter mod grænsefladen.

Under grænsefladen er koncentrationen stadig tæt på udgangssammensætningen. Natriumkarbonat-krystallerne i det øvre zonerede område er lange, spidse og forgrenede i modsætning til krystallerne under grænsefladen, hvor de danner en kompakt masse af smalle krystaller. Is krystalliserer ved den eutektiske temperatur, der nås efter ca. 70 minutter. Efter ca. 23 timer er hele væsken, på nær de nederste 7 cm, af eutektisk sammensætning.

Naturens egne magmakamre

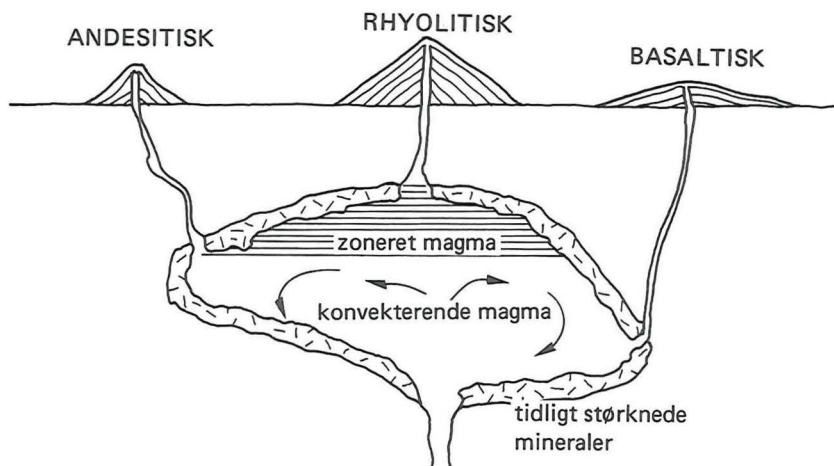
Opfører naturlige magmaer sig nu på samme måde som vort 'laboratorie-magma' bestående af en natriumkarbonat-opløsning? Der er selvfølgelig en stor forskel på de to materialer, og specielt på viskositeten, der er mange gange større i et basaltisk magma end i en vandig opløsning. Viskositeten er et udtryk for, hvor let et magma flyder. Jo større viskositet, jo mere sejtflydende er magmaet. Det er dog almindeligt akcepteret, at sammensætningsbetinget konvektion sandsynligvis er en meget vigtig proces i magmakamre, og i fig. 6 er resultaterne fra de eksperimentelle forsøg overført til et magmakammer, der ligger tæt under jordens overflade.

Hvis vi forestiller os, at et magmakammer fyldt med basaltisk magma begynder at krystallisere, vil mineralerne først dannes langs bunden, siderne og loftet. Det mineral, der normalt udkrystalliserer først er olivin, et magnesium-jern-silikat med en massefylde, der er væsentlig større end magmaets. Som ved eksperimentet efterlades der ved krystallisationen en restvæske, der bevæger sig opefter. Magmakammerets geometri afgør herefter graden af opblanding med den øvrige smelte i kammeret.

I den øvre del af magmakammeret, hvor siderne normalt hælder udad, vil den lette, frigjorte smelte nå loftet og udvikle et grænselag. Magmakammeret deles derved i to: en nedre del med et 'tungt' magma og omtrentlig udgangssammensætning, samt en øvre lettere del med vægtfyldebestemt zonerings. Så længe de krystalliserende mineraler er tungere end magmaet, vil denne proces fortsætte,

og meget hurtigt (i geologisk tidssammenhæng!) kan man nær loftet opnå betydelige sammensætningsforskelle. Den nedre del af kammeret kan f.eks. have en smelte af basaltisk sammensætning med ca. 50 % siliciumoxid og 7 % magnesiumoxid, medens smeltens sammensætning nær loftet kan være rhyolitisk, hvilket svarer til ca. 73 % siliciumoxid og kun 0.5 % magnesiumoxid. Mellem loftet og grænselaget varierer smeltens sammensætning mellem de to extreme værdier og kan f.eks. have en andesitisk sammensætning.

Hvis vi derfor forestiller os en vulkan, der periodevis tilføres magma fra flankerne af et sammensætningsmæssigt zoneret magmakammer, kan lavasammensætningen variere meget med tiden. Lavaen vil være basaltisk, hvis den stammer fra området under grænselaget, men efterhånden som grænselaget bevæger sig nedefter, vil lavaen komme til at stamme fra det zonerede område og eksempelvis være andesitisk eller i ekstreme tilfælde rhyolitisk.



Figur 6. Skitse af et subvulkansk magmakammer, hvori magmaet er blevet sammensætningsmæssigt zoneret nær grænsefladen. Tre vulkaner tilføres magma fra forskellige dybder af det samme magmakammer og udspyr derfor lava med forskellig sammensætning.

I et andet tilfælde kunne man forestille sig, at et magmakammer var kilden til to eller flere vulkaner. Hvis lavaerne stammede fra forskellige niveauer i og under det zonerede område, ville geografisk nærtliggende vulkaner kunne producere lava med vidt forskellig sammensætning. Dette har man blandt andet fundet på Island, hvor basaltiske og rhyolitiske vulkaner har været aktive samtidigt. Dette var tidligere vanskeligt at forklare uden modellerne for zonerede magmakammer, - opstillet på baggrund af resultaterne fra laboratoriet med små vandige opløsninger i modelkamrene.