

ILT-ISOTOPER OG GRANITER

af Niels Crosley Munksgaard

Ilt (O) er det almindeligste grundstof på Jorden. Det indgår i en lang række vigtige gasarter, væsker og faste stoffer, af hvilke mange er stabile over meget store temperaturområder. Disse træk gør ilt til et af de mest spændende grundstoffer, og i denne artikel skal omtales baggrunden for anvendelsen af ilt-isotoper indenfor geologiske undersøgelser af granitiske intrusioner.

Ilt isotoper

Isotoper af et grundstof er atomer, hvor kernen indeholder det samme antal protoner men forskelligt antal neutroner, og dermed forskellig masse. Ordet 'isotop' er afledt af det græske ord for 'samme plads' og fortæller, at isotoperne af et grundstof findes på samme plads i det periodiske system, de har samme atomnummer. Isotoper kan opdeles i stabile og ustabile (=radioaktive) isotoper. Isotoperne af ilt er stabile.

Ilt har i alt 3 stabile isotoper med atommasserne 16, 17 og 18. Den gennemsnitlige forekomst af disse 3 isotoper er: $^{16}\text{O} = 99,763\%$, $^{17}\text{O} = 0,0375\%$ og $^{18}\text{O} = 0,1995\%$. På grund af de større mængder af ^{16}O og ^{18}O og deres større forskel i masse undersøges normalt forholdet mellem disse to isotoper.

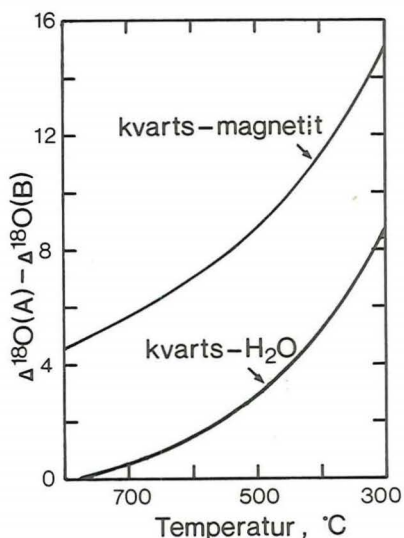
Indenfor geologien er man oftest ikke interesseret i de absolutte mængder af de forskellige isotoper, men kun i afvigelsen af disse forhold fra et standard materiale. Det mest praktiske standard materiale for isotoperne af ilt (og brint = H) er havvand, og som international standard anvendes derfor i dag noget, der kaldes Standard Mean Ocean Water, eller forkortet SMOW. Fordelen ved dette er, at ilt-isotop analyser for vidt forskellige bjergarter og foretaget over alt i verden er direkte sammenlignelige.

Ilt-isotop resultater angives i forhold til ilt-isotop sammensætningen af SMOW-standarden på følgende måde:

$$\Delta^{18}\text{O} = \left(\frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} \text{ i prøven}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} \text{ i SMOW}} - 1 \right) \times 1000 \text{ ‰}$$

Det vil sige, at hvis en bjergart har en $\Delta^{18}\text{O}$ værdi på +10, så indeholder den 10 promille (eller 1 %) mere af den tunge ilt-isotop, ^{18}O , end SMOW standarden. Har bjergarten derimod en negativ værdi af $\Delta^{18}\text{O}$, indeholder den mindre ^{18}O end standarden.

Forskellen i masse af de forskellige ilt-isotoper gør, at de fordeles forskelligt mellem for eksempel 2 mineraler, eller mellem et mineral og vand i ligevægt med hinanden. De siges at blive fraktioneret. Denne fraktionering af ^{18}O og ^{16}O isotoperne mellem for eksempel 2 mineraler kan tilnærmelsesvis udtrykkes ved forskellen i deres $\Delta^{18}\text{O}$ værdier. Da denne fraktionering er meget afhængig af temperaturen, men stort set ikke af trykket, anvendes forskellen mellem $\Delta^{18}\text{O}$ værdierne for 2 mineraler til en bestemmelse af den temperatur, de to mineraler sidst var i ligevægt med hinanden ved. For magmatiske bjergarter kunne denne temperatur være temperaturen før størkningen af bjergarten.



Figur 1. Forskellen i $\Delta^{18}\text{O}$ mellem mineraler i ligevægt med hinanden, eller et mineral i ligevægt med vand, kan bestemmes eksperimentelt. I figuren er vist resultatet af sådanne eksperimenter, hvor magnetit og kvarts er krystalliseret samtidigt ved forskellige temperaturer (øverste kurve). Nederste kurve viser forskellen i $\Delta^{18}\text{O}$ mellem kvarts og den vandige opløsning, kvartsen er udfældet fra, ved forskellige temperaturer. Analyseres for eksempel kvarts og magnetit i en granit, og fås $\Delta^{18}\text{O}$ for kvarts til 8.0, og $\Delta^{18}\text{O}$ for magnetit til 2.0, vil forskellen mellem dem være $\Delta^{18}\text{O} = 6.0$. Af kurven kvarts-magnetit ses det, at dette betyder at de kan have været i ligevægt med hinanden, og graniten størknet ved ca. 700° C.

Når $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotopsammensætningen af en bjergart eller et mineral skal bestemmes, skal ilten først trækkes ud af bjergarten eller mineralet. Denne ekstraktion foregår i et vakuum-apparat kaldet en fluorinationslinie. Ekstraktionen foregår ved at lade nogle få milligram bjergartspulver reagere med det kraftige iltningmiddel BrF_3 (Bromtrifluorid) i lukkede nikkelbeholdere ved temperaturer over 500° C. Herved ombyttes ilten i silikatmineraleme i bjergartspulveret med fluor, og ilten frigøres. Herefter lader man ilten reagere med kulstof fra en grafitstang, og $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotop sammensætningen af den dannede kuldioxid gas kan derefter bestemmes på et massespektrometer. Apparatet til udførelse af disse analyser er installeret på Geologisk Centralinstitut ved Københavns Universitet.

Ilt isotoper og graniter

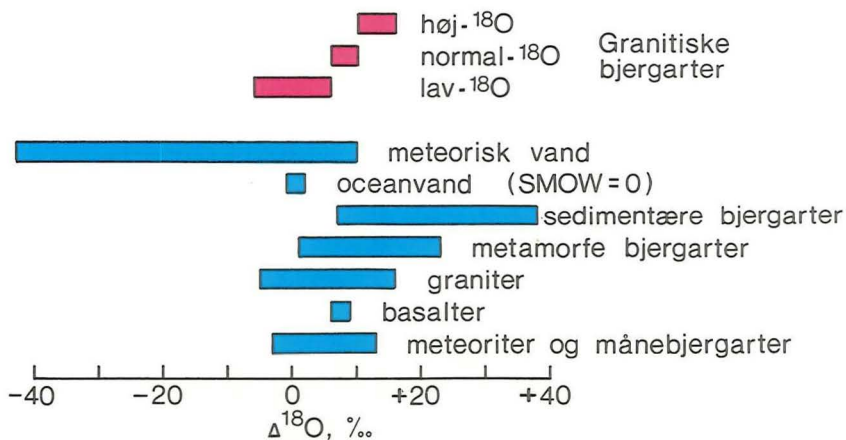
Ilt-isotop sammensætningen af forskellige typer af bjergarter viser nogle karakteristiske

teristiske forskelle, der gør, at undersøgelser af ilt-isotop sammensætningen af en granitisk bjergart kan sige noget om de processer, der har påvirket bjergarten.

Det er således ved undersøgelser af ilt (og brint) isotoper de senere år blevet fastslået, at mange granitiske intrusioner, som er trængt op og størknet i den øvre del af Jordens skorpe (på mellem 2 og 10 km's dybde), har været udsat for store mængder af gennemsvivende meteorisk vand. Meteorisk vand er vand, der for nylig har været i kontakt med atmosfæren, og enten stammer fra nedbør i form af regn eller sne, eller fra flod-, sø- og grundvand afledt fra nedbøren. Meteorisk vand findes som grundvand eller i sedimenters porer og har hyppigt en meget lavere $\Delta^{18}\text{O}$ værdi end bjergarter dannet dybt i Jordens kappe.

Når en bjergartsmelte, for eksempel et granitisk magma, trænger op i Jordens øvre skorpe, forårsager den en stærk opvarmning af de omgivende bjergarter. Størrelsen af denne opvarmning aftager gradvis væk fra intrusionen og medfører en forskellig opvarmning af det vand, der findes i de omgivende bjergarter. Hvor forholdene er favorable, det vil sige hvor de omgivende bjergarter er meget permeable og gennemtrængelige for vand (som mange sedimentter) eller stærkt opsprækkede, vil denne forskel i opvarmning af vandet i de omgivende bjergarter føre til dannelsen af nogle store vand-cirkulations systemer, og det meteoriske vand vil kunne blive sat i bevægelse og trukket ind mod intrusionen og op langs dens sider. Under størkningen af den granitiske smelte og den senere afkøling vil der ske en sammentrækning og en opsprækning af den dannede granit, og det cirkulerende meteoriske vand vil kunne trænge ind i selve graniten. Tilførslen af store mængder meteorisk vand med et lavt indhold af ^{18}O til den varme granit vil kunne medføre, at en del af granitens ^{18}O indhold udskiftes med ^{16}O således det cirkulerende meteoriske vand bliver rigere på ^{18}O (få en større $\Delta^{18}\text{O}$ værdi) og graniten fattiger på ^{18}O (få en lavere $\Delta^{18}\text{O}$ værdi). Sådanne eksempler på lav- ^{18}O graniter kendes nu fra en lang række områder og viser, at dannelsen af sådanne vand-cirkulationssystemer er en almindelig foreteelse. Det kan yderligere beregnes, at denne specielle type graniter, lav- ^{18}O graniterne, må have fået deres karakteristiske lave $\Delta^{18}\text{O}$ værdier ved en udveksling af meteorisk vand ved forholdsvis høje temperaturer, oftest tidligt under dannelsen af vand-cirkulationssystemerne i forbindelse med selve intrusionen af granitmagmaet.

Reaktionen mellem den granitiske intrusion og de cirkulerende vandige opløsninger vil være meget afhængig af temperaturen og derfor kunne påvirke graniten i vidt forskellig grad. Har temperaturen været høj, over ca. $500\text{--}550^\circ\text{C}$, og derved tæt på granitens størkningstemperatur, vil de oprindeligt dannede magmatiske mineraler såsom kvarts, alkalifeldspat, plagioklas og biotit være bevaret stort set uforandrede. I sådanne tilfælde vil undersøgelser af ilt (og brint) isotoperne være den eneste mulighed for at vise den tidligere cirkulation af varme opløsninger gennem graniten og de omgivende bjergarter. Har temperaturen



Figur 2. Figuren viser de forskellige $\Delta^{18}\text{O}$ værdier, som geologiske materialer fra forskellige miljøer kan have. Øverst er med rødt vist opdelingen i granitiske bjergarter efter deres $\Delta^{18}\text{O}$ sammensætning.

af vandige opløsninger derimod været lavere, under ca. 450°C , vil de oprindeligt dannede magmatiske mineraler typisk være afløst af omdannelsesmineraler såsom lys glimmer, klorit og epidot. I disse tilfælde vil bjergarten bære synlige præg af denne omdannelse og af den tidligere tilstedeværelse af cirkulerende opløsninger.

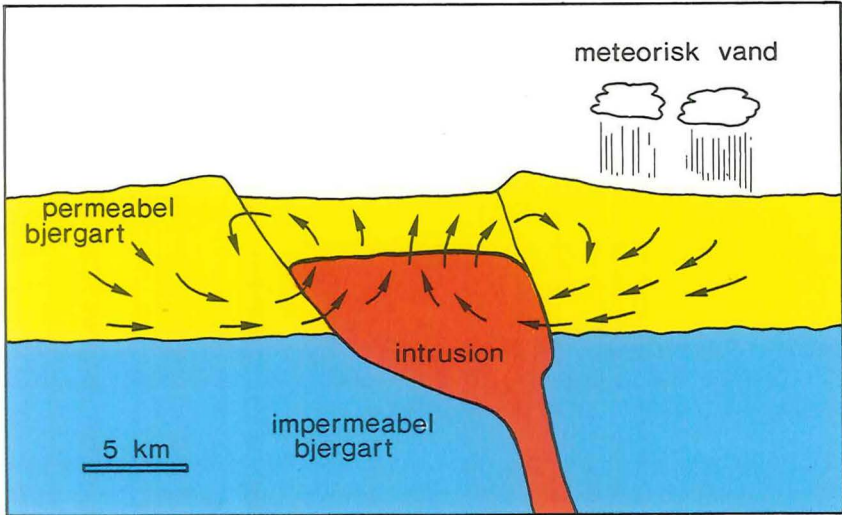
Fossile og moderne geotermale systemer

Undersøgelserne af lav- ^{18}O graniter har vist, at intrusion af bjergartssmelter i et højt niveau i jordskorpen således kan fungere som gigantiske 'varmemaskiner', hvor bjergartssmelten leverer den nødvendige energi til opvarmning af meteorisk vand og dannelsen af store vand-cirkulationssystemer i de omgivende bjergarter. Lav- ^{18}O graniter kan betragtes som bunden af sådanne 'fossile' cirkulationssystemer, hvor selve cirkulationen er ophørt i dag og temperaturen af det meteoriske vand faldet til normale værdier igen.

Moderne geotermale systemer optræder oftest i områder med aktiv eller ikke ret gammel vulkansk aktivitet. Mange sådanne geotermale systemer er de sidste 20 år blevet intensivt undersøgt med henblik på eventuel udnyttelse til produktion af elektricitet. Et eksempel på udnyttelse af geotermalt meteorisk vand er det geotermale område Larderello i Norditalien, der dækker omkring 2 % af hele Italiens totale energiforbrug, se VARV 1980-2.

I mange moderne geotermale systemer nås temperaturer for det cirkulerende

meteoriske vand på ca. 350° C på dybder mindre end 2,5 km. Undersøgelser har endvidere vist at sådanne cirkulationssystemer kan være op til 3-4 km dybe og have en arealmæssig udbredelse på flere tusinde kvadratkilometre. Levetiden for sådanne geotermale systemer anslås typisk til en størrelsesorden af 100.000 til 1.000.000 år.



Figur 3. Skematisk geologisk profil gennem en intrusion visende et hydrotermalt cirkulationssystem. Pilene viser bevægelsen af det meteoriske vand.

Et andet vigtigt aspekt af cirkulationssystemer kan nævnes her, nemlig dannelsen af malmforekomster. Malmforekomster optræder ofte i forbindelse med granitiske intrusioner, og undersøgelser har vist, at en lang række af disse forekomster er dannet ved, at opvarmede meteoriske vandige opløsninger har udvasket metaller i nogle niveauer af de omgivende sedimentære bjergarter, transporteret metallerne rundt i opløsning i cirkulationssystemer, for igen at udfælde dem i koncentreret form som eksempelvis sulfider, når de vandige opløsninger har mistet noget af deres varme, for eksempel ved at være blevet blandet op med nyt koldere meteorisk vand. En lang række forekomster af bly og zink menes dannet på denne måde i forbindelse med 'fossile' geotermale systemer.

I moderne geotermale områder ses kun sjældent dannelsen af tilsvarende store malmforekomster på jordoverfladen. Afsætning af mindre mængder sulfider af eksempelvis kviksølv, arsen og antimon i nogle aktive varme kilder viser imidlertid klart, at der er en forbindelse mellem dannelsen af cirkulationssystemer og malmforekomster.