GEOLOGIE EN MIJNBOUW VOLUME 48 (1), p. 75-78 1969

STRONTIUM-ISOTOPEN EN Rb-Sr CHRONOMETRIE[1])

H.N.A. PRIEM[2])

Strontium heeft vier stabiele isotopen: ^{84}Sr, ^{86}Sr, ^{87}Sr en ^{88}Sr. Isotopenfractioneringsprocessen doen in de natuur géén waarneembare variaties ontstaan in de isotopische samenstelling van strontium. Omdat de nuclide ^{87}Sr echter ook het vervalsproduct is van radioactief ^{87}Rb:

$$^{87}Rb \xrightarrow{\beta^-} {}^{87}Sr$$

$(T(\frac{1}{2}) = 47.2 \times 10^9$ jaar; $\lambda = 1.47 \times 10^{-11}$ jaar$^{-1})$,

wordt, door de radioactieve desintregratie van rubidium, voortdurend radiogeen ^{87}Sr toegevoegd aan het in de natuur voorkomende strontium. Hierdoor treden variaties op in de $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding. (De verhoudingen $^{88}Sr/^{86}Sr$ en $^{84}Sr/^{86}Sr$, daarentegen, zijn constant: respectievelijk 8.375 en 0.056). De mate waarin strontium verrijkt is aan *radiogeen* ^{87}Sr is afhankelijk (1) van de Rb/Sr verhouding in het gesteente, en (2) van de tijdsduur dat het strontium ongestoord met rubidium geassocieerd is geweest in een gesteente- of mineraalsysteem. Hierop berust de radiometrische ouderdomsbepaling volgens de Rb-Sr methode.

De laagste $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding in de natuur wordt aangetroffen in sommige steenmeteorieten en is iets lager dan 0.700, ca 0.698. Aangenomen wordt dat dit ongeveer de $^{87}Sr/^{86}Sr$ representeert in het zgn. *oerstrontium*: het strontium zoals dat bij de nucleosynthese is gevormd en aanwezig was in het materiaal van het zonnestelsel bij zijn vorming 4.6 ($\pm$ 0.2) miljard jaar geleden.

De $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding in de hedendaagse aardse gesteenten is altijd hoger (boven 0.700). De "verrijking" van strontium aan radiogeen ^{87}Sr is afhankelijk van de Rb/Sr verhouding en de ouderdom van het gesteente; bovendien heeft, binnen het gesteente, elke mineraalfase een andere $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding tengevolge van verschillen in de Rb/Sr verhouding. Geochemisch is het in eerste instantie echter van belang te weten wat de $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding is van het *initiële strontium*: strontium dat bij de vorming van het gesteente aanwezig was.

De samenstelling van het initiële strontium kunnen wij te weten komen door onderzoek van een aantal mineralen en gesteenten, waarvan wij kunnen aannemen dat zij even oud zijn en bij hun ontstaan een gelijke isotopische strontiumsamenstelling hadden. Voor elk gesteente en iedere mineraalfase geldt:

$^{87}Sr/^{86}Sr$ (heden) = $^{87}Sr/^{86}Sr$ (initieel)- + $^{87}Sr/^{86}Sr$ (radiogeen)

hierin is: ^{87}Sr (radiogeen) = $^{87}Rb.(e^{\lambda t}-1)$

(λ = vervalsconstante ^{87}Rb; t = ouderdom van het systeem)

$^{87}Sr/^{86}Sr$ (heden) = $^{87}Sr/^{86}Sr$ (initieel) + $^{87}Rb/^{86}Sr.(e^{\lambda t}-1)$.

(Voor de laatste term kunnen wij met een goede benadering schrijven: $^{87}Rb/^{86}Sr.\lambda.t$).

Hiervan kunnen $^{87}Sr/^{86}Sr$ (heden) en $^{87}Rb/^{86}Sr$ van elk gesteente en iedere mineraalfase gemeten worden. Voor een aantal gesteenten en mineraalfasen met dezelfde initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding en gelijke ouderdom bestaat er een lineaire betrekking tussen de $^{87}Sr/^{86}Sr$ (heden) en de $^{87}Rb/^{86}Sr$ verhoudingen. De $^{87}Sr/^{86}Sr$ (initieel) en de t worden dan voorgesteld door, respectievelijk, de asafsnede en de helling van de lijn in een $^{87}Sr/^{86}Sr - {}^{87}Rb/^{86}Sr$ diagram.

Op deze wijze kan uit een aantal co-genetische gesteenten en hun mineraalfasen zowel de ouderdom als de samenstelling van het intitiële strontium bepaald worden: de *isochron-methode*.

Wanneer wij spreken over variaties in de $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding bedoelen wij variaties in de initiële strontiumsamenstelling. Bij gesteenten met extreem lage Rb/Sr verhouding of in gesteenten van recente tot subrecente ouderdom heeft géén meetbare

---

[1]) Voordracht Geochemische Kring 25 oktober 1968, Amsterdam.

[2]) Z.W.O. Laboratorium voor Isotopen-Geologie, Amsterdam

verrijking plaatsgevonden en kunnen wij de initiële strontiumsamenstelling gelijkstellen aan de huidige $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding.

Rubidium is geochemisch in hoge mate coherent met kalium; strontium in mindere mate met calcium. Dientengevolge is de Rb/Sr verhouding zeer laag in ultrabasische gesteenten en aanzienlijk hoger in zure gesteenten. De aarde als geheel bevat echter meer Sr dan Rb. In de lithosfeer boven de Moho, bijvoorbeeld, schat men de Rb/Sr verhouding op gemiddeld rond 0.17, terwijl deze verhouding in, bijvoorbeeld, de peridotiet van St. Paul 0.026 bedraagt. Alleen in gesteenten die door allerlei differentiatie- en fractioneringsprocessen verrijkt zijn aan Rb t.o.v. Sr, kunnen met de tijd waarneembare verrijkingen aan ^{87}Sr ontstaan. Dit zijn derhalve de enige gesteenten die voor datering volgens de Rb-Sr methode in aanmerking komen.

Oceanische basalten en hun differentiaten die zo ver verwijderd zijn van continentale gebieden dat contaminatie van het basaltmagma met strontium van granitische korstgesteenten is uitgesloten, bijvoorbeeld op Hawaii. hebben altijd een $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding van 0.703-0.704. Aangenomen wordt dat dit eveneens de $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding is in die delen van het bovenste deel der aardmantel, waaruit deze basaltmagma's zijn gegenereerd. In de oudste vulkanische gesteenten, ca 3 miljard jaar geleden gevormd, bedraagt de initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding 0.701. Uitgaande van de hedendaagse $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding in oceanische basalten van 0.703-0.704 en de verhouding van 0.701 in 3 miljard jaar oude basalten, kan de $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding berekend worden in de oorsprongsgesteenten van basaltische magma's 4.6 miljard jaar geleden; deze verhouding is rond 0.698 – dezelfde waarde die als initiële samenstelling wordt aangetroffen in steenmeteorieten. Eveneens kunnen wij hieruit berekenen dat de Rb/Sr verhouding in de oorsprongsgesteenten van basaltmagma's in de bovenste aardmantel rond, gemiddeld, 0.02 moet bedragen.

Inderdaad heeft de peridotiet van St. Paul een Rb/Sr verhouding van 0.026 bij een $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding van 0.704. Bij dit alles moet bedacht worden dat de hoeveelheden basaltmagma die in de aardgeschiedenis zijn genegeerd uit de aardmantel zeer gering zijn vergeleken met het enorme volume mantelgesteente.

In continentale gebieden hebben basaltmagma's soms echter aanzienlijk hogere $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhoudingen dan oceanische basalten, omdat contaminatie kan hebben plaatsgevonden met verrijkt strontium uit granitische korstgesteenten. De onder- tot midden-Jurassische dolerietintrusies van Tasmanië, bijvoorbeeld, hebben een initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding van 0.711-0.712.

Interessant is ook om de initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding van differentiatieproducten (granophyren, e.d.) te vergelijken met die van het basaltische moedermagma. Op Hawaii en bij de dolerieten van Tasmanië, bijvoorbeeld, zijn de $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhoudingen gelijk voor alle gesteenten van de differentiatiereeks. Bij de Skaergaard intrusie op Groenland, daarentegen, is dat niet het geval. De basische Skaergaard gesteenten hebben een $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding van 0.7035 ± 0.002, terwijl de granophyrische gesteenten verhoudingen hebben tussen 0.707 en 0.727. De Skaergaard intrusie is van Tertiaire ouderdom en heeft plaatsgevonden in Precambrische gneissen. Het is niet duidelijk waaraan de hogere $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhoudingen in de restdifferentiaten moeten worden toegeschreven; dat alleen deze restdifferentiaten nevengesteente met verrijkt strontium zouden hebben geassimileerd, zoals door sommigen wordt voorgesteld, lijkt moeilijk voorstelbaar.

Het hedendaagse oceaan- en zeewater heeft de zeer uniforme $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding van 0.709 ± 0.001. Deze waarde wordt ook gevonden in vrijwel alle sedimentaire kalkstenen. Alleen zeer lokaal, wanneer grote hoeveelheden verrijkt strontium worden toegevoerd van, bijvoorbeeld, een Precambrisch granitisch achterland, kunnen kalksteenafzettingen ter plaatse aanzienlijk hogere $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhoudingen hebben. Carbonatieten, daarentegen, hebben $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhoudingen van 0.702-0.705, gelijk aan die van oceanische basaltmagma's, hetgeen eveneens wijst op generatie in een omgeving met extreem lage Rb/Sr verhouding (bovenste deel aardmantel). Dit is veelal een karakteristiek onderscheid tussen "echte" carbonatieten enerzijds, en calciumcarbonaatgesteenten die op enigerlei wijze van sedimentaire origine zijn anderzijds. Ons onderzoek van enkele gesteenten van de Kaiserstuhl, bijvoorbeeld, heeft de volgende voorlopige resultaten gegeven:

carbonatiet (1)	$^{87}Sr/^{86}Sr =$	0.7036
carbonatiet (2)	"	0.7067
calcietader in carbonatiet	"	0.7053
sedimentaire kalksteen (Hauptrogenstein, Dogger)	"	0.7093

Gesteenten die op enigerlei wijze hun oorsprong hebben in continentale korstgesteenten van granitische samenstelling, kunnen hogere initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhoudingen hebben. In de regel worden hogere initiële waarden echter slechts zeer incidenteel aangetroffen, waarbij de oorzaak meestal nog moet worden gezocht in assimilatie van nevengesteente door het magma. De onder-Tertiaire Lundy graniet in het Kanaal van Bristol, bijvoorbeeld, heeft een initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding van 0.734, hetgeen wordt toegeschreven aan assimilatie van schisten door het intruderende granietmagma. Een dergelijk verschijnsel hebben wij waargenomen in de Caledonische Svenningdalgraniet in Nordland, Noord Noorwegen, waarin overvloedig veel schistinsluitsels voorkomen en waarvan de initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding varieert van 0.709 tot 0.719.

Normaliter blijken granitische gesteenten echter steeds initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhoudingen te hebben tussen 0.703-0.707. Dit is verklaarbaar wanneer men bedenkt dat aanzienlijke verrijkingen aan radiogeen ^{87}Sr in de regel alleen optreden in mineralen en gesteenten met hoge Rb/Sr verhoudingen, waarin bovendien de Sr-gehaltes veelal zeer laag zijn. Wanneer dus uit een dik gesteentepakket, bijvoorbeeld een geosynclinale serie, door anatexis nieuwe granietmagma's ontstaan, dan zal de geringe hoeveelheid verrijkt strontium daarin niet of nauwelijks meer opvallen tegen de "buffer" van enorme hoeveelheden "gewoon strontium", d.w.z. strontium afkomstig uit gesteentemateriaal dat niet verrijkt is aan Rb t.o.v. Sr. (In elke geosynclinale serie komen bijvoorbeeld grote hoeveelheden basisch vulkanisch materiaal voor). Het strontium in de gegenereerde granitische en granodioritische magma's heeft hierdoor steeds weer een lage $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding[3]).

Hogere initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhoudingen worden bijvoorbeeld wel vaak aangetroffen in ignimbrietische gesteenten. Ook zullen, uiteraard, lokale anatektische smeltproducten (bijvoorbeeld in migmatietcomplexen) vaak aanzienlijk hogere initiële waarden hebben.

Een geheel andere kwestie betreft de mobiliteit van radiogeen ^{87}Sr. Dit isotoop ontstaat door radioactieve desintegratie van ^{87}Rb en bezet dus direct na zijn ontstaan Rb plaatsen in de kristalroosters. (Rb, op zijn beurt, zit weer diadoch op K plaatsen). Wordt het gesteente nu lang na zijn vorming onderworpen aan hoge temperatuur en druk, dan gaan de afzonderlijke mineraalfasen "open" voor, in het bijzonder, het op vreemde plaatsen zittende radiogene ^{87}Sr. In de regel migreert het radiogene ^{87}Sr slechts tussen aangrenzende mineraalfasen, over afstanden in de orde van enkele millimeters. Een flink handstuk kan derhalve gewoonlijk nog steeds als "gesloten systeem" beschouwd worden voor Rb, Sr en radiogeen ^{87}Sr. Voor de ouderdomsbepaling betekent dit dat wij het gesteente als geheel ("whole-rock") in dit geval nog steeds kunnen dateren volgens de Rb-Sr methode, ook nadat het een metamorfose heeft ondergaan. De afzonderlijke mineralen geven, indien de isotopische strontiumsamenstelling tussen de verschillende mineraalfasen is gehomogeniseerd, de ouderdom van de metamorfose; in geval van onvolledige homogenisatie geven zij "ouderdommen" zonder geochronologische betekenis.

Een aantal "whole-rock" monsters van, bijvoorbeeld, een complex graniet-gneissen valt, indien de afzonderlijke monsters tijdens de metamorfose gesloten zijn gebleven, in een $^{87}Sr/^{86}Sr - {}^{87}Rb/^{86}Sr$ diagram op een rechte lijn, de isochron. Deze isochron bepaalt de oorspronkelijke intrusieouderdom van de granieten (waaruit latere metamorfose de gneissen deed ontstaan) en de initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding.

Is niet geheel voldaan aan de voorwaarde dat de gesteenten binnen de omvang van een monster een gesloten systeem zijn gebleven, of indien variaties zijn opgetreden in de initiële strontiumsamenstelling door lokale assimilatie van nevengesteente, dan laten de monsterpunten enige strooiing zien in het isochrondiagram. In de regel is dit in meerdere of mindere mate het geval. De isochron wordt dan berekend volgens een kleinste-kwadraten methode.

Homogenisatie van de isotopische strontiumsamenstelling over grotere afstanden kan plaatsvinden bij zeer hoge-graad metamorfose. In granuliet-complexen vormen de afzonderlijke gesteentemonsters soms een zeer fraaie isochron, echter met een zeer hoge initiële $^{87}Sr/^{86}Sr$ verhouding (asafsnede). In dit geval representeert de isochron de ouderdom van de metamorfose.

Tenslotte kan het gesloten systeem onder bepaalde omstandigheden nog worden bedreigd door chemische processen. Op het eiland Ytteröy in Noorwegen, bijvoorbeeld, breekt een bijna vertikale, 80-90 cm brede kimberliet-achtige lamprofiergang door Ordovicische kalksteen. K-Ar datering van biotiet en

[3]) Ook voortdurende toevoeging van mantelmateriaal met niet-verrijkt strontium kan er toe bijdragen, dat de $^{87}Sr/^{86}Sr$ in de aardkorst laag blijft.

paleomagnetische metingen wijzen op intrusie van de gang in het Midden Devoon. De Rb-Sr ouderdom van de biotiet is echter Permisch. Dit kan waarschijnlijk worden toegeschreven aan hydrothermale processen in samenhang met Permische "rift faulting", waarbij radiogeen ^{87}Sr uit de biotiet is uitgewisseld tegen gewoon, niet-verrijkt strontium dat in grote overmaat aanwezig was in de door de kalksteen trekkende hydrothermale oplossingen.

Ook bij atmospherische verwering in de humide tropen wordt soms waargenomen, dat radiogeen ^{87}Sr preferentieel uit het gesteente of mineraal is uitgeloogd. Wij zijn dit verschijnsel enige malen tegengekomen bij onderzoek van gesteenten uit Suriname.

GEOLOGIE EN MIJNBOUW VOLUME 48 (1), p. 78-79 1969

DE TOEKOMSTIGE DRINKWATERVOORZIENING VAN NEDERLAND[1])

L. HUISMAN

Van de inwoners van Nederland is ongeveer 98% aangesloten op de openbare drinkwatervoorziening. Deze Nederlanders hebben voor hun huishoudelijk verbruik ongeveer 100 liter per persoon per dag nodig. Dit is 2/3 deel van de totale leverantie van de waterleidingbedrijven; de overige 50 liter wordt door de industrie benut. Naast deze 50 liter afkomstig van de openbare bedrijven verbruikt de industrie nog 170 liter per hoofd per dag verkregen uit eigen winning. De totale hoeveelheid water die verbruikt wordt is dus 320 liter per hoofd per dag of rond 1400 miljoen m^3/jaar.

Verwacht kan worden dat de hoeveelheid benodigd water zal stijgen met 1,2%/jaar voor huishoudelijk gebruik en met 2%/jaar voor industrieel gebruik. Omstreeks 2000 zal dan per hoofd van de bevolking per dag 100-150 liter voor huishoudelijk gebruik en 450 liter voor industrieel gebruik nodig zijn, dat is 4400 miljoen m^3 per jaar. Wanneer men rekening houdt met de agrarische belangen en niet overmatig grondwater aan de bodem onttrekt kan van de bruikbare neerslag van 6000 miljoen m^3/jaar slechts 1500 miljoen m^3/jaar blijvend aan de bodem onttrokken worden. Afgezien van enige honderden miljoenen m^3 oppervlaktewater zal dus 2500 miljoen m^3 water geïmporteerd moeten worden. De Rijn moet hiervan het grootste deel leveren, in de orde van 2000 miljoen m^3 per jaar. Van de rest is het leeuwendeel afkomstig van de Maas. Het Maas-water vertoont echter kwantitatieve en het Rijn-water kwalitatieve tekortkomingen. Van de gemiddelde Rijnafvoer is maar 3% nodig en van de allerlaagste afvoer ooit gemeten (1947) niet meer dan 10%. De kwaliteit van het Rijnwater loopt echter steeds terug; het Cl'-gehalte dat als maat van de verontreiniging kan dienen is van 1874 tot 1965 11 maal zo hoog geworden (tot gemiddeld 170 mg Cl'/l). Bij binnenkomst in Nederland bestaat het Rijnwater voor 1/10 uit huishoudelijk en industrieel afvalwater, maar in droge perioden kan dit oplopen tot 1/3 en in de toekomst tot ver over de helft.

Om nu toch over goed drinkwater te kunnen beschikken moet tijdens perioden van hoge rivierafvoer water in spaarbekkens ingelaten worden. De meegevoerde verontreinigingen zijn dan sterk verdund. Gedurende perioden met lage rivierafvoeren, waarbij het water sterker verontreinigd is, wordt uit de spaarbekkens zoveel water bijgevoegd dat een acceptabele kwaliteit water verkregen wordt. Wanneer 150 mg Cl'/l als maximum toelaatbare concentratie beschouwd wordt in het afgeleverde drinkwater, dan moet gedurende 195 dagen per jaar water uit het spaarbekken bijgevoegd worden. In een normaal jaar zal 22% van de totale produktie uit het spaarbekken

[1])Voordracht op de bijzondere vergadering van de Mijnbouwkundige Sectie van het K.N.G.M.G. op 1 maart 1968 in Heerlen.