



*De Bingham Canyon koper-molybdeenporfiermijn in Utah (VS), de diepste dagbouw mijn ter wereld. De website van de mijn vermeldt trots dat het gat vanaf de maan zichtbaar is!  
Bron: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BinghamCanyon.jpg>. De foto valt onder GNU rechten; [https://en.wikipedia.org/wiki/GNU\\_General\\_Public\\_License](https://en.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License).*

# Vulkanisme, Water en Ertsen

FRANK BEUNK  
FACULTEIT AARD- EN  
LEVENSWETENSCHAPPEN  
VRIJE UNIVERSITEIT  
AMSTERDAM  
FRANK.BEUNK@VU.NL

De mensheid heeft zijn omgeving naar zijn hand weten te zetten door slim gebruik van grondstoffen. Voor *metalen* uit de aardkorst zijn vulkanen niet de enige, maar waarschijnlijk wel de belangrijkste bron van metaalconcentraties, rijk genoeg om winbaar te zijn. ‘Concentratie’ is waar het om gaat. Alle metalen zitten in wisselende, maar vaak lage concentraties in zo ongeveer alle gesteenten, en er zijn bijkomende processen nodig om daaruit geconcentreerde ertsen te vormen. In dit overzicht behandel ik vier ertstypen die min of meer direct aan vulkanisme gebonden zijn: Kambalda-type ertsen, vulkanogene massieve sulfiden, gebande ijzerertsen, en koper-molybdeen-goud-tin-zilver-wolfram-porfieren. Er volgt een wezenlijke conclusie uit te trekken: Voor drie van de vier types is water nodig; alleen de waterplaneet Aarde is in staat om zulke ertsen te maken, en op buitenaardse planeten zijn er bij gebrek aan water weinig winbare ertsen te verwachten. Vulkanisme, en dus ook de ertsvorming die er bij hoort, is nauw verbonden met het typisch aardse verschijnsel van plaattektoniek.



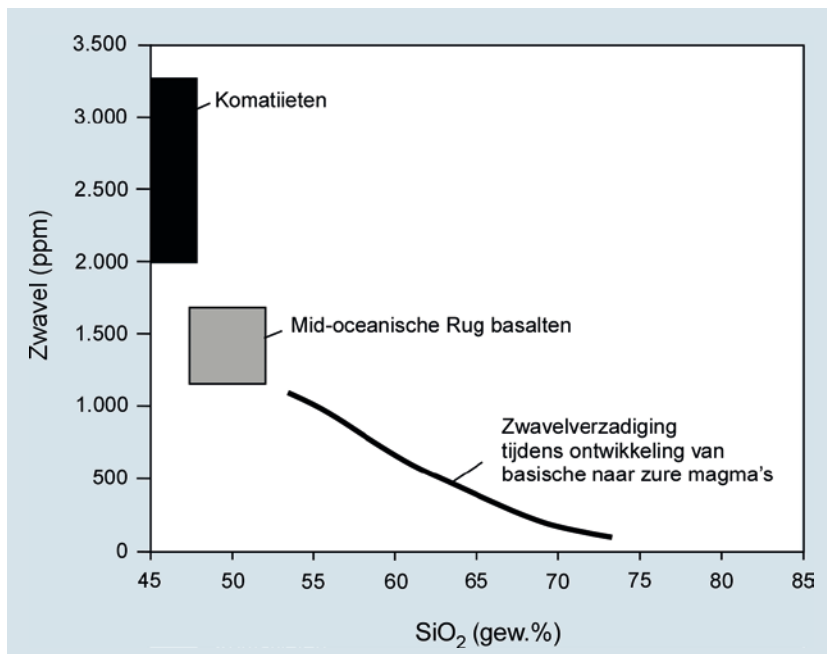


## Kambalda-type ertsen

Bij ertsen van het Kambalda-type bestaat er een relatief eenvoudig, rechtstreeks verband tussen vulkanisme en sulfide-ertsen, waarbij water (nog) geen rol speelt. Ze komen voor in komatiïeten, genoemd naar de Komati-rivier in Zuid-Afrika. Komatiïeten (Afb. 1) zijn magnesiumrijke ‘ultrabasische’ vulkanische gesteenten



AFBEELDING 1. | Komatiïet met de karakteristieke spinifextextuur van olivijn, d.w.z. dunne, bladvormige kristallen, ontstaan door snelle afkoeling. De structuur is genoemd naar het Australische spinifexgras, hier ook op de foto. Pilbara craton, NW Australië. Foto: Frank Beunk.



AFBEELDING 2. | Het verband tussen het maximale zwavelgehalte van vulkanische gesteenten en hun siliciumgehalte (zwavel in ppm, gewichtsdelens per miljoen; 100 ppm = 0,01%). Hoe lager het siliciumgehalte, hoe meer zwavel ze kunnen bevatten. Siliciumarme –(ultra)basische– vulkanieten zijn vooral rijker aan magnesium en ijzer dan siliciumrijke (‘zure’) lava’s. Hoe meer ijzer in het magma, des te meer donkergekleurde ijzermineralen er uit kristalliseren; basische stollingsgesteenten zijn daarom donker gekleurd, zure gesteenten zijn licht van kleur (bron: Lee et al., 2016). Illustratie met toestemming van Nature Geoscience UK.

die vrijwel alleen tijdens het Archaeïcum voorkwamen, meer dan 2,5 miljard jaar geleden. Komatiïeten zijn te vinden in de Archaeïsche kernen van de Precambrische cratons tussen de ook toentertijd talrijkere basaltstromen. Cratons (of ‘schilden’) zijn de stabiele, Precambrische kernen van alle grote continenten. Kambalda ligt in het West-Australische Yilgarncraton. Komatiïeten en basalten komen beide uit de aardmantel die uit peridotiet bestaat, maar komatiïeten staan qua samenstelling dichter bij peridotieten dan basalten. Ze waren een stuk heter dan normale basalten, zo’n 1.600°C tegenover 1.200°C. Komatiïetstromen konden wel 100 km lang worden. De hoge temperatuur van de Archaeïsche komatiïeten reflecteert de warmere inwendige aarde van weleer. Door die hoge temperatuur brandden komatiïtische lavastromen zich als het ware een pad door het onderliggende gesteente, vaak oudere basalten. Ze zijn zwavelrijker dan normale basalten (Afb. 2) en hadden de neiging om bij uitstromen te ontmengen in een silikaatmagma en een sulfidisch magma, waarbij de chalcophile (d.w.z. sulfideminerende) metalen zich in de sulfidesmelt concentreerden. Die sulfidesmelt, zwaarder dan de komatiïtische lava, zakte daarna naar de bodem van de lavastroom en vulde depressies op in de bodem. Dit zijn de belangrijkste nikkelertsen geworden, omdat (ultra) basische gesteenten behalve ijzer- en magnesiumrijker dan zure, ook veel meer nikkel bevatten, evenals metalen van de platinagroep. Pentlandiet, (Fe,Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>, vormt er het belangrijkste ertsmineraal.

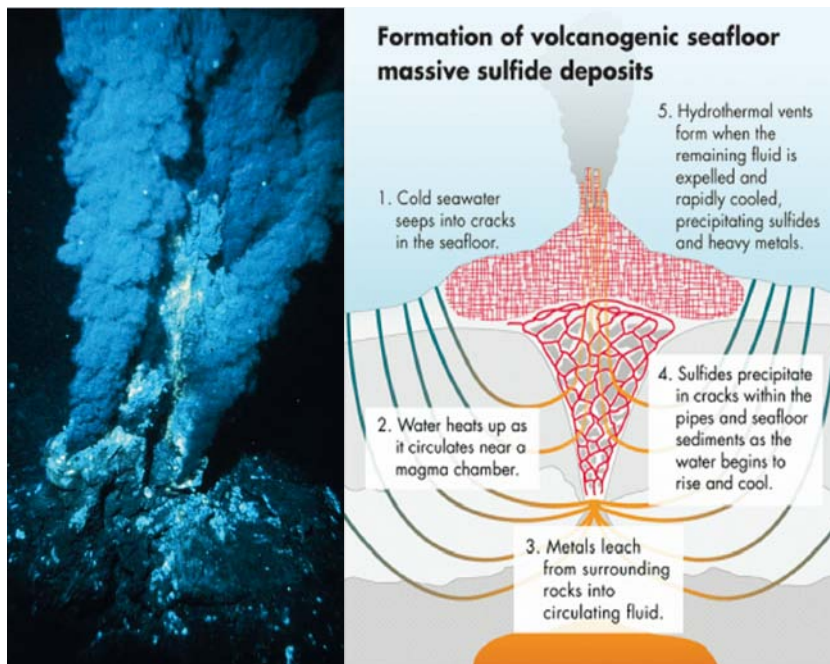
Met de Kambalda-ertsen is het met de afzijdigheid van water in de vulkanische ertsvorming wel gedaan. Hierna is het water wat de klok slaat.

## Vulkanogene Massieve Sulfide-ertsen, VMS

De naam van deze groep past ook bij de ertsen van het Kambalda-type, maar vreemd genoeg rekent men tot de V(H)MS (volcanic hosted massive sulfides) alleen ertsen uit hydrothermale (d.w.z. warmwaterige) systemen die vrijwel altijd met vulkanische processen samenhangen. Het voorbeeld bij uitstek zijn de ‘black smoker’-systemen van de mid-oceanische ruggen. Daar, waar twee oceanische lithosfeerplaten uiteen wijken, staat



de oceaankorst onder horizontale rekspanning loodrecht op de rug. Op IJsland, waar de Mid-Atlantische rug boven water komt, kan men de openstaande rekspleten in de basalten zien (ter illustratie: Google 'Iceland fissures' en zie Andeweg, 2012). De basaltische magmahaarden, 1.200-1.300°C heet, zitten er dicht onder het oppervlak, het is er heet onder je voeten. Met al dat oceaانwater en openstaande scheuren ontstaat er dan ook een circulatiesysteem in de korst waarbij koud bodemwater in de scheuren indringt, dieper in de korst steeds heter wordt en recht boven de ondiepe magmahaard, op de plaatgrens zelf, verhit tot 400°C vanzelf met kracht weer in zee uitstroomt (Afb. 3). Behalve heet is dit 'black smoker'-water ook erg zuur, met een pH van 2-2,5, als gevolg van reactie van het door de korst circulerend zeewater met de basalten. In de basaltische gesteenten, van huis uit kurkdroog, groeien daarbij metamorfe waterhoudende mineralen met water in hun kristalrooster, vooral epidoot en chloriet. Chloriet bevat 13 gewichtsprocent water in zijn structuur, als (OH)<sup>-</sup>-groep. Bij de hydratiereductie blijven er dus kale waterstofkernen over, die het hete hydrothermale water zo zuur maken en daarmee erg reactief; het lost metalen uit de basalten op die we terugzien in de zwarte 'rook' van de 'black smokers'. De 'smoke' is geen rook maar superkritisch<sup>1</sup> water met opgeloste metalen die door de koudschok bij het uitstromen en door de pH-schok meteen uit oplossing neerslaan als fijn verdeelde ertsmineralen. De neerslagen, in de directe omgeving van de hete bronnen, bestaan vooral uit pyriet (FeS<sub>2</sub>), chalcopyriet (CuFeS<sub>2</sub>), galeniet (PbS) en sfaleriet (ZnS), en uit het calciumsulfaat anhydriet (CaSO<sub>4</sub>), dat de kern van de schoorstenen vormt die de mineraalrijke bronnen zelf opbouwen; het calcium komt uit de basalt, de sulfaatgroepen uit zeewater; sulfaat is na chloor het tweede anion in zeewater. De grootste concentraties van ertsmineralen slaan overigens al vóór het uitstromen in de zeebodem neer, in holten en scheuren in de basalten. Dat zijn de 'volcanic hosted massive sulfide deposits' in de oceaانbodem, die we als winbare ertsen terugvinden in ofiolietcomplexen, de fossiele oceaانbodems die hier en daar op het land terecht zijn gekomen als ze, soms,



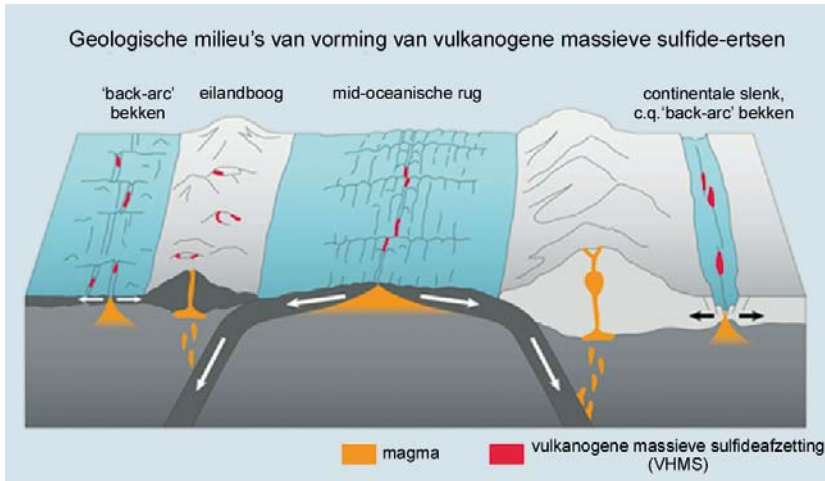
AFBEELDING 3. | Links: hete 'black smokers' met schoorstenen ('hydrothermal vents'), op de Mid-Atlantische Rug, ca. 2.500 m waterdiepte. (bron Wikipidia, NOAA Photo 'Blacksmoker in Atlantic Ocean') Rechts: Model voor vorming van VMS-afzettingen op divergente plaatgrenzen (= mid-oceanische ruggen), door zeewater dat met de basaltkorst van de oceanische ruggen reageert, direct boven de magmahaard (oranje). 1. Koud zeewater dringt in barsten in de zeebodem in. 2. Het water wordt opgewarmd terwijl het in de buurt van het magma komt. 3. Metalen worden uit de basalten uitgelooft en opgenomen in de vloeistof. 4. Sulfides slaan neer in barsten in de ondiepe vulkanische intrusies en in de sedimenten van de zeebodem. 5. Het uitstromend water vormt hydrothermale bronnen; snelle afkoeling doet sulfiden en zware metalen neerslaan. Illustratie van American Geosciences Institute, met toestemming.



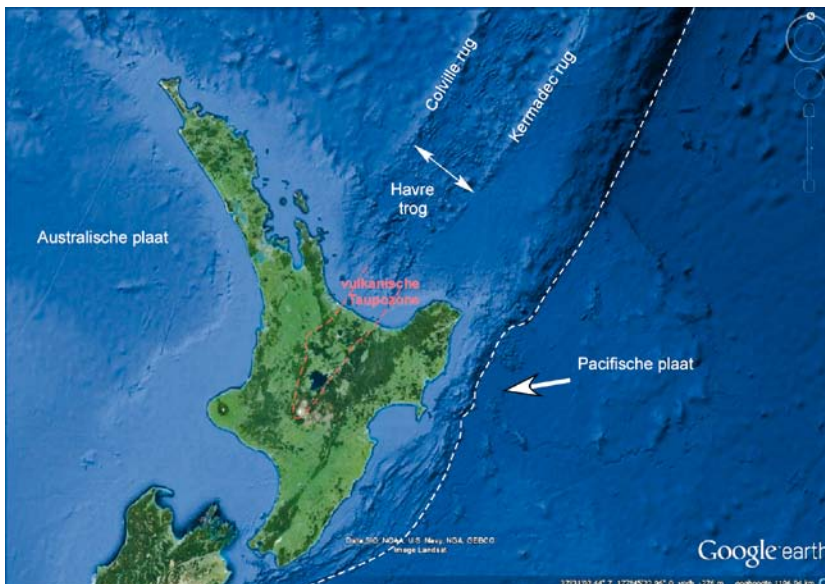
AFBEELDING 4. | Beeldmateriaal van Nautilus Minerals Inc., het eerste bedrijf dat zich richt op winning van Seafloor Massive Sulphides direct van de zeebodem, in de zuidwestelijke Pacific (Papua Nieuw Guinea, Fiji, Tonga, Solomon eilanden, Vanuatu en Nieuw Zeeland). Rechts een opgedregde (en dichtgegroeide) black-smokerschoorsteen. Illustratie links en foto rechts; bron Nautilus Minerals, met toestemming.







AFBEELDING 5. | *Plaattektonische milieu's van vorming van V(H)MS-afzettingen. Bron: USGS, Earthmagazine, credits K. Cantner, American Geosciences Institute AGI, 2014.*



AFBEELDING 6. | *Noordeiland Nieuw Zeeland met plaattektonische elementen. De witte geblokte lijn is de plaatgrens tussen de Pacifische en de Indo-Australische plaat. De Pacifische plaat duikt WZW-waarts onder de Australische onder (pijl). Achter de plaatgrens ligt de vulkanische Kermadec-rug. De daaraan evenwijdige Colville-rug is een 'dode' vulkaanrug die door de opening van een 'back-arc'-bekken van de actieve Kermadecrug is afgesplitst (Havre-trog, dubbele pijl, zie ook Afb. 5). De opening van het back-arc-bekken zet zich ZW-waarts op het vasteland voort en vormt daar de vulkanische Taupozone (rode geblokte lijn). Bron afbeelding: Google earth, aangepast bestand voor gebruik.*

aan subductie zijn ontsnapt. De Troodos bergrug van centraal Cyprus is er een mooi voorbeeld van. Men kan hem in Google Earth als donkere band van west naar oost over het eiland zien lopen. Langs de noordrand van de ofioliet is de oorspronkelijke oceaانبodem te vinden en daar liggen een paar flinke kopermijnen. Er liggen daar nog veel restanten van smelterijen uit de Romeinse tijd. Er bestaat inmiddels één bedrijf dat 'black smoker'-ertsen direct van de zeebodem gaat winnen (Afb. 4).

Behalve in de diepe oceaانبodems vormen zich ook in continentale en eilandboogvulkanen VMS-afzettingen, zolang ze maar onder zee liggen (Afb. 5). Die vormen geen basaltische, maar meer intermediaire en zure vulkanische

gesteenten, met andesieten, dacieten en rhyolieten. Deze ertsvoorkomens heten in de literatuur het 'Kuroko-type', naar een voorbeeld in Japan. Eilandboog-vulkanen, boven oceanische subductiezones, liggen altijd gedeeltelijk onder water. Een mooi voorbeeld van een echt continentaal, maar niettemin submarijn systeem is de continentrand van het noordelijke eiland van Nieuw-Zeeland (Afb. 6).

## Gebande ijzerertsen

*Banded Iron Formations (BIFs)* vormen het belangrijkste ijzererts, en omdat ijzer wel het meest gebruikte metaal is, gaat het om een enorme productie, vooral uit Oost-Brazilië en West-Australië (Afb. 7), die in grote ertstankers naar de hoogovens van de geïndustrialiseerde klanten wordt verscheept. BIFs zijn uitsluitend Precambrijsch van ouderdom, zelfs in hoofdzaak Archaeïsch, ouder dan 2,5 miljard jaar. Het zijn fijn gebande sedimentaire gesteenten, goed te zien in Afbeelding 8. Het verband met vulkanisme is indirect. Veel BIFs komen voor tussen Precambrijsche basalten die fossiele zeebodems representeren. Submarijn vulkanisme leidt altijd tot hydrothermale circulatie van water, dat aangerijkt wordt aan metalen uit de oceaانبodem, zoals bij de VHMS. In de huidige oceaan slaat het opgeloste ijzer vrijwel direct neer, als geoxideerd, driewaardig ijzer. De Archaeïsche oceaan had echter te maken met een zuurstofloze atmosfeer, en bevatte daarom geen opgeloste vrije zuurstof. Hydrothermaal ijzer bleef toen als tweewaardig positieve ionen in oplossing en kon zich oceaanwijd verbreiden. Men denkt dat de neerslag in de fotische zone (ondiep zeewater, waarin zonlicht doordringt) getriggerd werd door de vrije zuurstof, afgegeven door fotosynthetische cyanobacteriën (blauwalgen) – het goed oplosbare  $Fe^{2+}$  oxideerde tot onoplosbaar  $Fe^{3+}$  en sloeg dus neer als ijzer(hydr)oxide. De BIFs verdwenen grotendeels uit het geologisch archief na de 'Great Oxidation Event', in het oudste Proterozoïcum, omtrent 2,4 miljard jaar geleden, de eerste stap in de toename van vrije zuurstof in de atmosfeer en oceanen, door diezelfde fotosynthetiserende bacteriën. Afzetting van BIFs kwam nog twee keer terug, rond 1,9 en rond 0,7 miljard jaar geleden. De laatste keer hangt dat met zekerheid samen







AFBEELDING 7. | De Mt. Whaleback ijzermijn bij Newman, in gebande ijzerertsen van de Hamersley Range van W. Australië, afgezet rond de grens tussen Archaicum en Proterozoicum, 2,5 miljard jaar geleden. Deze 'main pit' meet 5 bij 3 km, is 400 m diep en is in gebruik sinds 1969. Foto: Frank Beunk.

met het 'Snowball Earth'-klimaat, een toestand waarin de oceanen tot in de tropengordel met zeeijs bedekt werden; afgesloten van ventilatie raakte de opgeloste zuurstof snel op en kregen we lange tijd de oude zuurstofvrije oceaan weer terug (zie ook Troelstra, 2013). Er zijn zwakkere aanwijzingen dat er ook tussen 1,9 en 1,8 miljard jaar geleden een 'Snowball Earth'-klimaat heerste, dat mogelijk aan de vorming van de BIFs van die ouderdom heeft bijgedragen.

### Koper-molybdeen-goud- en tin-zilver-wolfraamporfieren

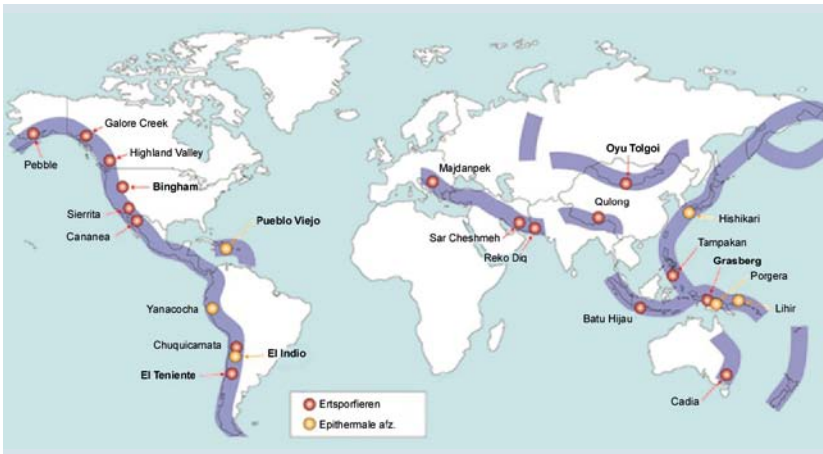
Ertsporfieren zijn het eindresultaat van een buitengewoon complexe serie van processen, waarin alles precies goed moet passen om tot echte reuzenafzettingen te komen. Dat gebeurt veel vaker niet dan wel. Bij de zoektocht naar ertsen is maar één van de duizend pogingen 'raak'. Maar dan krijg je ook wat: een enorme geochemische anomalie, met tot 1Gt (gigaton = miljard ton) zwavel, 200 Mt (megaton = miljoen ton) koper, 2,5 Mt molybdeen, en 2.600 ton goud. Tot de koperrijkste voorkomens behoren de 4-5 miljoen jaar oude afzettingen van El Teniente en Rio Blanco-Los Bronces in centraal Chili (Afb. 9 en 10); de goudrijkste is de 3 miljoen jaar oude Grasberg in Irian Jaya (W. Papua).

We nemen als voorbeeld de Chileense en Boliviaanse Andes (Afb. 10 en 11): Subductie van de Pacifische oceaankorst onder de Andes is al zo'n 600 miljoen jaar aan de gang. Dit is daarmee het langstlevende nog actieve subductiesysteem ter wereld, reden waarom de Andes zo hoog is geworden. Er bestaan in noord-Chili een paar gordels van ertsporfieren naast elkaar, maar van verschillende ouderdommen (Afb. 10). Dat heeft te maken met de hoek waaronder de



AFBEELDING 8. | Geband ijzererts, 'Kitty's Gap', Coppin Gap groensteengordel, Pilbara craton, NW Australië. De rode laagjes zijn 'jaspis', fijnkorrelige kwarts vermengd met hematiet ( $Fe_2O_3$ ), de zwarte bestaan uit hematiet en magnetiet ( $Fe_3O_4$ ) vermengd met een beetje kwarts en/of sideriet ( $Fe$ -carbonaat), terwijl de witte laagjes bestaan uit schone kwarts en/of sideriet. Het gesteente als geheel kan tot 55 gewichtsprocent ijzer bevatten. Foto: Frank Beunk.





AFBEELDING 9. | *Verbreiding van ertsporfieren in gordels van subductievulkanisme (paars). Goed herkenbaar zijn de moderne gordels: de circum-Pacifische, de west-Atlantische (grote Antillen), de Mediterrane, en de Indonesische. De ertszones in het Aziatisch continent horen bij systemen waarin continenten tegen elkaar gebotst zijn na subductie van de volledige oceanische plaat. Epithermale afzettingen zijn polymetallicke ertsen gevormd in halo's van lagere temperatuur rond hete porfieren (bron: Richards, 2013). Illustratie van Nature Geoscience, met toestemming.*



AFBEELDING 10. | *Evenwijdige vulkanogene ertsgordels van Vroeg-Krijt tot Laat-Neogene ouderdommen in Noord-Chili, i.h.b. de Eoceen-Oligocene koperporfiergordel (naar Sillitoe, 2003).*

oceanische platen onder Chili subduceerden. Al naar gelang de ouderdom van de subducerende plaat dook die meer of minder steil naar het oosten toe weg; hoe ouder hoe steiler, hoe jonger hoe vlakker. De vulkanen ontstaan daar waar de top van de subducerende plaat 100-110 km diep zit. De gordel van Vroeg-Krijt ouderdom ligt dicht bij de kust dan de jongere Paleocene tot Pliocene gordels, omdat de plaat in het vroege Krijt blijkbaar steiler de mantel in dook dan in het Tertiair.

De Tertiaire koperporfiergordel (Afb. 10) loopt door in Peru (Afb. 11). Daarachter ligt in een brede boog de even oude, Mioceen tingordel van Bolivia. Dat laat zien dat tinporfier en tingraniet voorkomen in een iets verschillend geotektonisch milieu, nl. in de 'back arc' (Afb. 5). Dat zien we ook bij de Indonesische tingranieten, tussen Sumatra en Maleisië, terwijl de subductievulkanen daar langs de westkust van Sumatra liggen (Afb. 9), boven de Indische plaat die noordwaarts onder Sumatra onderduikt.

Waar een oceanische plaat met zijn sedimentbedekking subduceert, drijft de toenemende druk het water uit het sediment, terwijl waterhoudende mineralen in de plaat (chloriet, serpentijn) onstabiel worden en hun water afgeven. De superkritische waterige vloeistoffen lekken de plaat uit, de mantelwigg in boven de subducerende plaat. Water is er de oorzaak van dat de mantelgesteenten gaan smelten; het waarom kunt u lezen in mijn artikel in de Waterspecial van G&H (Beunk, 2013). Op een diepte van 100-110 km smelten de peridotieten in de mantelwigg tot basaltmagma's,



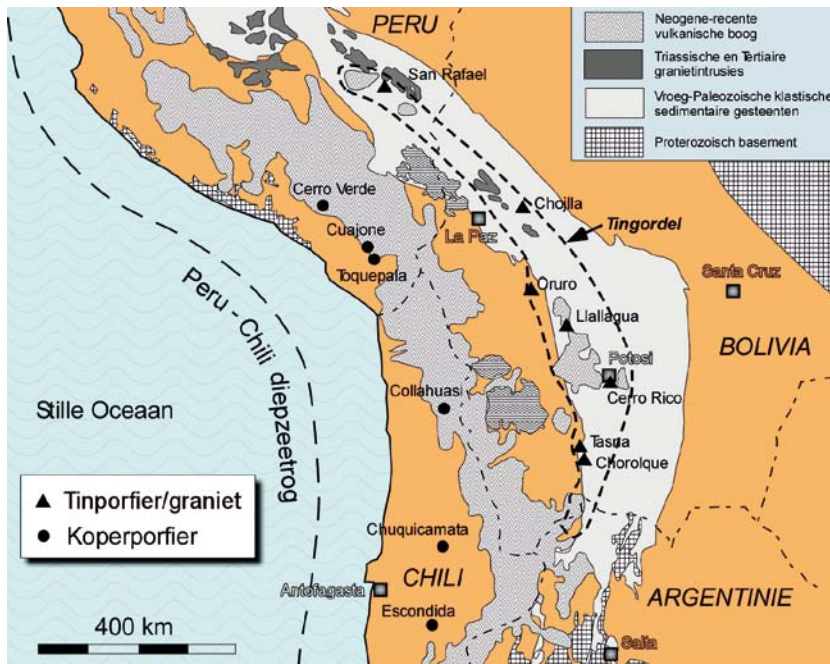


die opstijgen en intruderen in de korst van de eilandboog of de continentrand (Afb. 5), of uitbarsten als lava. Onderweg veranderen deze magma's van samenstelling en een enkele wordt rijp om een ertsporfier te vormen. De ertsafzettingen vormen zich direct onder de vulkanen, tot op enkele kilometers diepte, uit hydrothermale aders met kwarts, carbonaat en ertsmineralen. De vloeistoffen zijn ontweken uit de bijbehorende intrusies van gran(odior)iet-achtige samenstelling in het substraat van de grote stratovulkanen van de circum-Pacifische 'Ring van Vuur', en in vergelijkbare, ook oudere geotektonische situaties van subductievulkanisme (Afb. 9). 'Porphyry coppers' en 'porphyry molybdes', in vakjargon, leveren 75% van de wereldproductie aan koper, herbergen 45% van de koperreserves, en de gehele productie en reserves van molybdeen.

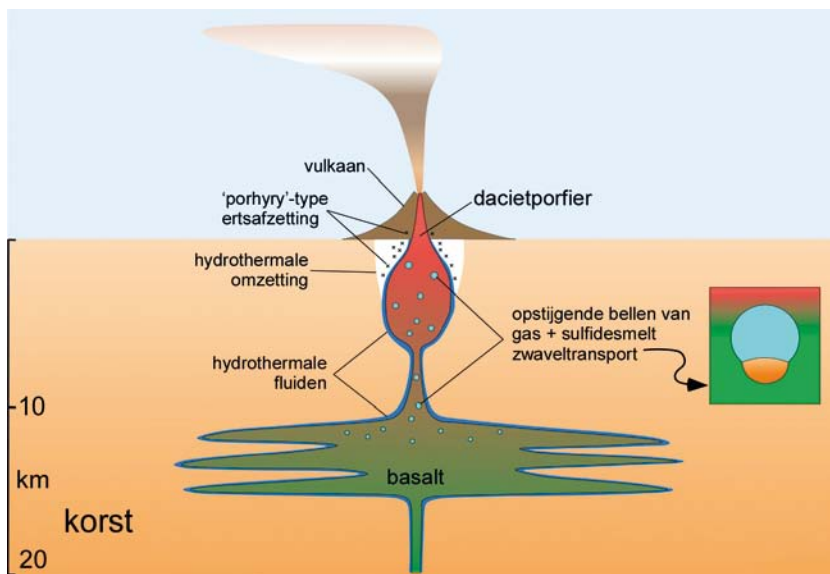
Terwijl er VMS-afzettingen zijn van bijna alle geologische leeftijden, met belangrijke voorkomens in de Precambriësche schilden, zijn de ertsporfieren in hoofdzaak beperkt tot het Paleozoïsche tot subrecente geologische verleden, al zijn ze teruggevonden tot in de Archaïsche graniet-groensteengordels<sup>2</sup>. Die voorkeur is niet onlogisch als men bedenkt dat de vulkanen soms boven op flinke gebergten staan, zoals in de Andes, dan wel zelf flinke bergen vormen, die na het wegvallen van de gebergtevormende krachten en het uitdoven van het vulkanisme als eerste aan erosie ten prooi vallen. Een beetje erosie is overigens wel nodig om in de ondergrond van de vulkanen ertsen te kunnen delven. Alle mijnen zijn dan ook aangelegd onder uitgedoofde vulkanen waarvan de vulkaankegels inmiddels zijn afgeërodeerd. De mijnen worden bijna altijd in dagbouw ontgonnen, d.w.z. beginnend aan het oppervlak en van daar steeds dieper gravend. Dat levert spectaculaire gaten op, zoals van de Bingham Canyon koper-molybdeenmijn in de Amerikaanse staat Utah (zie de introductiefoto).

### Nu wordt het echt ingewikkeld...

De ertsmetalen zijn afkomstig uit de diepe mantelbronnen van de subductievulkanen. Vooral sulfiden in de mantelgesteenten dragen bij aan het zwavel- en metaalgehalte van de



AFBEELDING 11. | Miocene tingordel van Bolivia, 'achter' de Neogene tot recente vulkaanboog met zijn koperporfieren in Noord-Chili en Peru (naar Dietrich, Lehmann & Wallianos, 2000, v. 95, no. 2).



AFBEELDING 12. | Structuur van een koper-molybdeenporfier van het 'Andesite-type', schematisch. Basaltmagma uit de mantel evolueert in diepe magmakamers tot Si-rijke, 'zuurdere' differentiaten (rood in de Afbeelding), uiteindelijk tot ondiepe andesiet- en daciëporfieren, door kristallisatie, assimilatie van nevengeesteente en menging van opeenvolgende magmapulsen. Het basaltmagma is gas-houdend, door dehydratie van de subducerende oceanische plaat op ca. 100 km diepte. Ontmengde gasbellen stijgen uit de basalt op en nemen zwavel en ertsmetalen mee naar boven (ook als sulfidedruppeltjes, zie detail). Vlak onder de vulkaan ontsnappen de gassen uit de porfier en slaan hun metalen neer in hydrothermale aders (naar Nadeau, 2015, en Mungall et al., 2015).

basaltachtige magma's. Wanneer die diep in de korst van de vulkaanboog of continentrand indringen en beginnen te kristalliseren raakt het magma oververzadigd aan zwavel en scheidt zich een onmengbare, metaalrijke sulfidesmelt af, net als in de komatiïeten van de ertsen van het Kambaldatype. Dit leidt tot een probleem: de sulfidesmelt is relatief zwaar en zinkt. Hoe krijg je de metalen dan



omhoog naar de vulkanen? Het geheim zit hem in de gassen die in het magma zijn opgelost, vooral water. Bedenk dat dit oorspronkelijk oceaankorst was, dat, ingebouwd in de metamorfe mineralen chloriet en serpentijn, met de basaltische oceaankorst is meegesubduceerd (Afb. 3-rechts en begeleidende tekst). Die  $H_2O$ -rijkdom was juist de aanleiding voor het smelten van de mantel boven de subducerende plaat. De kristallisatie van het diepe basaltische magma-reservoir (Afb. 12) leidt ook tot oververzadiging en ontmenging van de gasfase: na verloop van tijd ontstaan er superkritische 'gas'-bellen in, waarin gereduceerde zwavelcomponenten ( $HS^-$ ) uit het magma oplossen. De reductie wordt geholpen door de voorafgaande kristallisatie van het mineraal magnetiet ( $Fe_3O_4$ ), dat veel geoxideerd, driewaardig ijzer uit het magma verwijdert. En, magnetietkristallisatie is weer een gevolg van het oxiderend effect van het in het magma opgeloste water! Metalen als Cu, Fe en Au vormen complexen met gereduceerde zwavelcomponenten en hebben sterk de neiging om in de gasbellen op te lossen. De gasbellen stijgen in het magma op en bereiken uiteindelijk het ondiepere, granietachtige magmareservoir onder de vulkaan (Afb. 12). Maar in 2015 is er een nog effectievere manier ontdekt waardoor de gasbellen sulfiden mee omhoog nemen: als druppeltjes van de zware, ontmengde sulfid smelt, hangend aan de gasbellen (detail in Afb. 12). Dat is een natuurlijk voorbeeld van *flotatie*<sup>3</sup>, een in de mijnindustrie veelgebruikt proces van ertsconcentratie.

Enmaal in het subvulkanisch systeem aangekomen, scheiden de gasbellen zich van het magma en vormen een (nog steeds superkritische) hydrothermale fluïde fase in de top van de magmakamer en in spleten in het nevingesteente. Zolang de weg naar de buitenlucht geblokkeerd blijft, staat deze fluïde nog steeds onder dezelfde, hoge druk als het magma en het nevingesteente. Zodra de vulkaan uitbarst, openen zich echter sluipwegen (scheuren) voor de fluïde en valt de gesteentedruk er op weg, d.w.z. er blijft alleen de veel lagere druk van de bovenliggende waterkolom zelf over. De diepte van het kritisch punt van de fluïde schiet daarbij door de hydrothermale kolom omlaag tot meer dan 2 km diepte (218 bar waterdruk). Door de drukverlaging begint de bovenste 2 km van de fluïde catastrofaal te koken, d.w.z. dat er aparte gas- en vloeïstoffasen ontstaan. De metaal-zwavelcomplexen (goud, koper) prefereren daarbij de gasfase, lood en zink juist de waterfase, als complexen met chloor. Omdat de gasfase een veel lagere oplosbaarheid voor de metalen heeft dan de oorspronkelijke, superkritische fluïde slaan er meteen metaalsulfiden uit neer, in aders met kwarts en carbonaat. Zonaire gebande aders (Afb. 13) wijzen uit dat dit proces zich telkens herhaalt.

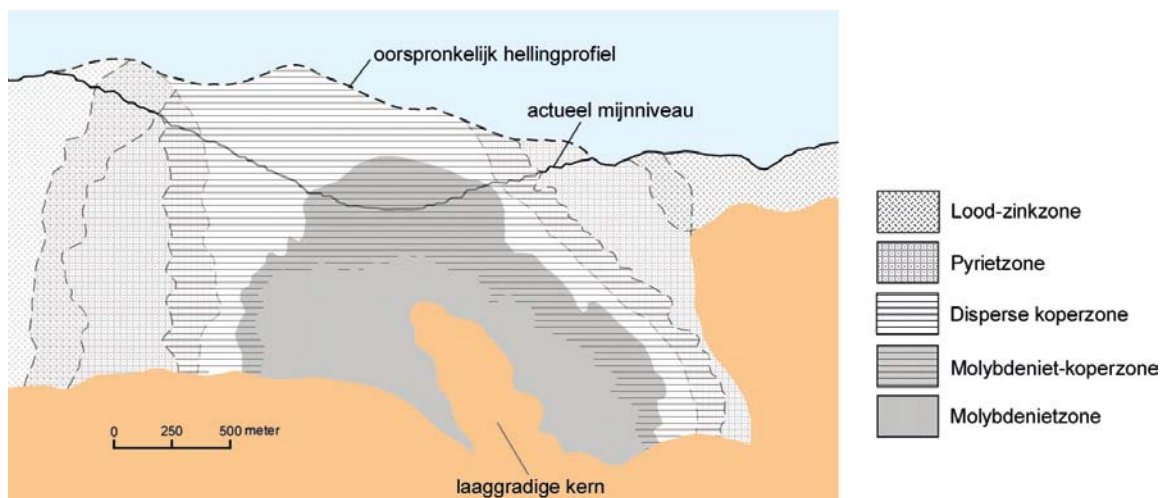
De met opgeloste metalen beladen waterfase migreert makkelijker tot grotere afstand van de magmakamer dan het gas. Het mengt zich daar met opgewarmd



AFBEELDING 13. | Epithermale goud-zilveraders in vulkanische breccies. De gebandheid en zonaire bouw van de aders wijst op vorming door herhaald openen en neerslag van mineralen. Bron: Society of Economic Geologists [www.seg2016.org](http://www.seg2016.org)

oppervlaktewater en laat, al afkoelend, de metalen neerslaan die bij het koken de waterfase prefereerden. Zo ontstaan zgn. *epithermale* aders met vooral lood- en zinksulfiden, in een concentrische halo rond de porfierintrusie. Concentrische zonering van ertszones om een ondiepe porfierintrusie is een kenmerk bij uitstek van de ertsporfieren, waarbij de verschillende ertszones elkaar i.h.a. overlappen (Afb. 14).

Zeer ingewikkeld allemaal; ik kan het helaas niet simpeler maken. Als u het proces naar de ertsporfieren stap voor stap probeert na te gaan, zult u zien dat water steeds cruciaal is en dat het allemaal begint bij de mid-oceanische ruggen, met de inbouw van oceaankorst in mineralen van de oceaankorst.



AFBEELDING 14. | Profiel van de Bingham Canyonmijn (Utah, VS), met overlappende concentrische ertszones rond een laaggradige intrusie van (kwarts-)monzoniet(-porfier). Molybdeniet ( $MoS_2$ ) is het molybdeenertsmineraal. In de koperzone zijn het vooral chalcopyriet ( $CuFeS_2$ ), borniet ( $Cu_2FeS_4$ ) en digeniet ( $Cu_2S$ ), naast veel pyriet ( $FeS_2$ ). De lood-zinkzone bevindt zich in het buitenste halo van de verertsing. Bron: Wikipedia.





Tin-zilver-wolframgranieten en -porfieren ontstaan niet in maar juist *achter* de eigenlijke vulkaanboog, in het 'back arc'-gebied (Afb. 5 en 11). De zilverbij van Potosi in Bolivia kennen we nog van de zilvervloot van Piet Hein. De mijn was de belangrijkste financier van het Spaanse wereldrijk in de 16e en 17e eeuw. Tin(-wolfram)granieten zijn welbekend van de Indonesische tineilanden (Banka en Billiton), en ook van de Paleozoïsche gebergten van het Noord-Atlantische gebied: Cornwall en de Atlantische kustregio van Oost-Canada (New Brunswick). Potosi is 's werelds grootste zilverafzetting. Het mijnstadje is in 1546 gesticht. In de daaropvolgende 200 jaar is er ruim 40.000 ton zilver vandaan verscheept. De afzetting is vergelijkbaar met die van de koperporfieren, met ertsaders die zonnair zijn gerangschikt naar samenstelling en temperatuur in en om een 14 miljoen jaar oude subvulkanische dacietkoepel. In de hete kern vormden zich vooral cassiteriet (SnO<sub>2</sub>) en wolframiet [(Fe,Mn)WO<sub>4</sub>], in de koelere zones er om heen zilver, zink, koper en lood, met gedegen zilver, argeniet (Ag<sub>2</sub>S) en chloorargeniet (AgCl) als belangrijkste zilvermineralen.

## Conclusie

Dit overzicht benadrukte de rol van oppervlaktewater, en dan vooral oceaanwater bij de vorming van vulkanogene ertsens. Voor de vaak gehoorde wensdroom dat de mens op reis moet gaan in het zonnestelsel om op andere planeten, op asteroiden of kometen 'kostbare metalen' te oogsten is dit een ontzuenderende

conclusie: bij gebrek aan oppervlaktewater en de bijbehorende hydrologische cyclus valt er daar weinig of niets te halen!

<sup>1</sup> Superkritisch: boven de temperatuur en druk van het kritisch punt van water (374 °C, 218 bar). De superkritische fluïde fase (geen gas, geen vloeistof) heeft een veel hogere dichtheid en oplossingsvermogen dan waterdamp.

<sup>2</sup> De laag-metamorfe equivalenten van basalten en komatiïeten. Het weinige dat van het Vroeg-Archaïsche aardoppervlak bewaard is gebleven bestaat voornamelijk uit smalle gordels van groenstenen, geïntrudeerd door brede granietkoepels.

<sup>3</sup> Flotatie: in een waterige suspensie van fijn gemalen gesteente blaast men luchtbelletjes, die de hydrofobe componenten mee naar boven nemen, terwijl de hydrofiele componenten in de waterfase achterblijven.

## LITERATUUR

- Andeweg, B., 2012. *Eyjafjallajökull Eyjafjallajökull: inzichten in vulkanisme op IJsland*. Grondboor & Hamer, 66 (4-5): pp. 366-371.
- Beunk F.F., 2013. *Water in de endogene processen*. Grondboor & Hamer, 67 (4/5), pp. 118-123.
- Boer, L.E.M. de, 2013. *Water en Leven*. Grondboor & Hamer, 67 (4/5): pp. 130-137.
- Dietrich, A., B. Lehmann & A. Wallianos, 2000. *Bulk rock and melt inclusion geochemistry of Bolivian tin porphyry systems*. *Economic Geology*, 95, pp. 131-326.
- Lee C.-T.A., L.Y. Yeung, N.R. McKenzie, Y. Yokoyama, K. Ozaki & A. Lenardic, 2016. *Two-step rise of atmospheric oxygen linked to the growth of continents*. *Nature Geoscience*, 9, pp. 417-24.
- Mungall, J.E., J.M. Brennan, B. Godel, S.J. Barnes & F. Gaillard, 2015. *Transport of metals and sulphur in magmas by flotation of sulphide melt on vapour bubbles*. *Nature Geoscience*, 8, pp. 216-219.
- Nadeau, O., 2015. *Economic geology: Ore metals beneath volcanoes*. *Nature Geoscience*, 8: pp. 168-170.
- Richards, J.P., 2013. *Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes*. *Nature Geoscience*, 6: pp. 911-916.
- Sillitoe, R.H., 2003. *Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view*. *Mineralium Deposita*, 38 (7): pp. 787-812.
- Troelstra, S., 2013. *Ijs in de geologische tijd*. Grondboor & Hamer, 67 (4/5): pp. 138-143.

# HENSKENS FOSSILS®

DIGGING - PREPARATIONS - WHOLESALE - EXHIBITIONS



International Dinosaur Digging Team®

Eikenboomgaard 11-13, 5341 CT, Oss (The Netherlands)

PH: +31 (0) 412 63 46 69

E-mail: theo@henskensfossils.nl

Open: Monday - Friday 8:00 am - 5:00 pm (CET)

Opening hours showroom: Saturday 10:00 am - 3:00 pm (CET)

WWW.HENSKENSFOSSILS.NL

