

Metalen en mineralen voor de energietransitie. Deel I: Geologie en mijnbouw

Lithium, kobalt, 'zeldzame aarden' en grafiet

door A.B. Phil Westerhof (Westcourt GeoConsult) en Frank F. Beunk (Aardwetenschappen VU)

westcourtgeo@hotmail.es, f.f.beunk@vu.nl

Toegang tot goedkope fossiele energiedragers (steenkool, bruinkool, turf, aardolie en aardgas), industriële mineralen (zand, klei, kalksteen, dolomiet, gips, grafiet en fosfaat) en metalen heeft de geïndustrialiseerde landen een hoge levensstandaard verschaft. De wereldwijde energietransitie, van fossiele naar 'groene' energie, gaat samen met een omslag in de mijnbouw en een verschuiving van conventionele naar niet-conventionele metalen en mineralen waarvoor een tiental jaren geleden geen of nauwelijks belangstelling was.

Mijnbouwmaatschappijen maken onderscheid tussen basismetalen, ijzerlegeringmetalen (*ferro-alloys*), edelmetalen, zeldzame metalen en energiemetalen.

- Basismetalen, zoals zink (Zn), lood (Pb) en koper (Cu), zijn een basisbestanddeel in onze industrie.
- IJzerlegeringmetalen, zoals mangaan (Mn), molybdeen (Mo), titanium (Ti), vanadium (V), kobalt (Co), chroom (Cr), nikkel (Ni) en wolfram (W), worden toegevoegd aan ijzer om speciale soorten staal te maken. Wolfram wordt ook gebruikt om uw telefoon te doen vibreren. Aluminium (Al) is vanwege zijn lage dichtheid belangrijk in de auto- en vliegtuigindustrie en meer recent in de wieken van windturbines.
- Edelmetalen zijn goud (Au), zilver (Ag) en metalen van de platinagroep (ook wel platinoïden genoemd): platinum (Pt), osmium (Os), iridium (Ir), ruthenium (Ru), rhodium (Rh) en palladium (Pd). Traditioneel wordt goud gebruikt in de fabricage van juwelen en als goudvoorraad in nationale banken, maar in toenemende mate ook in de *hightech* industrie. De platinoïden dienen als katalysator in de uitlaat van auto's, in waterstof-brandstofcellen en *electrolyzers* en in halfgeleiders.
- Zeldzame metalen omvatten tin (Sn), niobium (Nb), tantaal (Ta), beryllium (Be), lithium (Li), gallium (Ga), germanium (Ge), indium (In), bismut (Bi), zirkonium (Zr) en kwik (Hg). Gallium en indium zijn een onderdeel van de lichtuitstralende diode in ledlampen; indium zit onder andere in zonnecellen.
- Ten slotte zijn er de energiemetalen uranium (U) en thorium (Th), brandstoffen voor huidige en toekomstige kernreactoren.

Mijnbouw, groot- en kleinschalig

Honderden mijnbouwmaatschappijen houden zich bezig

met het exploreren naar en delven, opwerken, smelten, raffineren en transporteren van minerale grondstoffen. De grootste zijn Glencore (Zwitserland/VK), BHP (Australië/VK), Rio Tinto (VK/ Australië), Vale (Brazilië) en Anglo American (VK). Op wereldschaal is het een relatief kleine bedrijfstak. In 2001 hadden de top-150 multinationale mijnbouwbedrijven een gezamenlijke marktwaarde van 224 miljard dollar, minder dan de toenmalige waarde van Samsung Electronics (326 miljard dollar) en Exxon Mobile (344 miljard dollar), of nieuwkomers zoals Apple (927 miljard dollar) en Facebook (542 miljard dollar).

Zo'n 80% van alle saffier en andere edelstenen, en 20% van alle goud, diamant, cassiteriet (tin) en coltan (niobium-tantaal) komt uit artisanale (kleinschalige, ambachtelijke) mijnbouw. De Wereldbank rapporteert dat dit in tachtig landen in Afrika, Oceanië, Midden- en Zuid-Amerika voorkomt. Het werk wordt gedaan door mannen, vrouwen en helaas ook kinderen, met slechts een schop, houweel, zeef en waspan (afb. 1ABC). Artisanale mijnbouw heeft een geringe productiviteit, een totaal gebrek aan investeringen, creëert overmatige milieuvervuiling – o.a. vervuiling door amalgamatie van goud (verbinding met kwik) – slechte, vaak zelfs onveilige arbeidsomstandigheden en niet-duurzame, niet-optimale ontginning van ertsafzettingen. Niettemin vormt het een belangrijke manier van leven en inkomen van miljoenen arme families in rurale gebieden van ontwikkelingslanden. Ongeveer 100 miljoen werkers en hun familieleden leven van kleinschalige mijnbouw, tegen zo'n 7 miljoen in de industriële mijnbouw. Mineralen en metalen waarvan de productie voor een aanzienlijk deel voor rekening komt van de kleinschalige mijnbouw, veroorzaken extra onzekerheid in de 'supply chain'.

Kritieke metalen en mineralen voor de energietransitie

Hieronder behandelen we de toepassingen en de geologische achtergrond van drie metalen c.q. metaalgroepen en een mineraal, die alle als 'kritiek' gelden voor de energietransitie: lithium, kobalt, 'zeldzame aarden' en grafiet. In deel II van dit tweeluik in *Gea* over grondstoffen (Beunk & Westerhof, 2022) gaan we verder in op een rapport van de Wereldbank (2020) over de beschik-



▲ Afb. 1. Ambachtelijke goudwinning, La Dorada, dal van de Magdalena-rivier, Colombia. A. Waspan. B. Kinderarbeid. C. Met een bescheiden investering van zo'n 40.000 US\$: een drijvend ponton met grindpomp en zeefbak.

baarheid van kritieke metalen en mineralen.

Lithium

Lithium (Li), atoomnummer 3, is het lichtste van de groep van de alkalimetalen in het periodiek systeem (PS) welke verder omvat natrium (Na), kalium (K), rubidium (Rb) en cesium (Cs). Traditioneel wordt lithium gebruikt in de fabricage van keramiek en glas, in metallurgie en farmaceutische producten. Maar sinds de laatste vijftien jaar dient het leeuwendeel voor de fabricage van Li-ion-batterijen in mobiele telefoons en in accu's van elektrische auto's, samen met het al even strategische metaal kobalt (Co) en het niet-metallische grafiet (C). De kathode van de Li-ion batterij bestaat immers vaak uit lithium-kobalt-oxide, de anode uit grafiet, terwijl een lithiumzout als elektrolyet dient. Lithium is afkomstig uit drie primaire bronnen: het

stollingsgesteente pegmatiet, zoutoplossingen en kleimineralen.

Lithium in pegmatieten

Dit is de belangrijkste bron van lithium, met Australië als grootste producent. Pegmatieten zijn uitzonderlijk



▲ Afb. 2. Groeve in pegmatieten, Nigeria.

grofkorrelige, vaak kleine gesteentelichamen (afb. 2 en 3) in het dak van granitische plutonen en in hun nevengeesteden. Ze ontstaan uit de waterrijke restsmelt van een kristalliserend granietmagma, met daarin aangrijkt zeldzame elementen als tin (Sn), lithium (Li), beryllium (Be), lantanum (La), cerium (Ce), borium (B), chloor (Cl) en fluor (F). Ionen van deze elementen passen slecht in de 'gewone' gesteentevormende mineralen zoals kwarts, veldspaat en glimmer en hopen zich daarom op in de restsmelt. De belangrijkste lithiummineralen zijn spodumeen $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$, een pyroxeen (afb. 3), en verder het fosfaat amblygoniet $(\text{Li},\text{Na})\text{AlPO}_4(\text{F},\text{OH})$ en de glimmer lepidoliet, $\text{KLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$.

Lithium in afgesloten zoutmeren

Lithium is, net als natrium, goed oplosbaar in water. De oceanen zijn eigenlijk een zeer verdunde lithiumoplos-



▲ Afb. 3. Zeer grofkristallijne lichtpaarse spodumeen (variëteit kunziet, mangaan-houdend), kwarts (lichtbruin) en veldspaat (wit) in pegmatiet, Madagascar. ©Spirifer Minerals, met toestemming.

sing met 180 parts per billion (ppb, gewichtsdelens per miljard) Li en met een Na/Li-verhouding van 60.000/1. Deze scheve verhouding vloeit voort uit het feit dat er bij de elementvorming in sterren relatief weinig lithium wordt gevormd – er is relatief weinig lithium in het zonstelsel en het heelal als geheel. Winbaar lithium komt voor in hooggelegen zoutvlaktes of ‘playas’ (afb. 4): bodems van opgedroogde zoutmeren met interne drainage, waaruit lithium als carbonaat- en chloridezout neerslaat. Bekende voorbeelden zijn de Salar de Uyuni in Bolivia, de Salar de Atacama in Chili en de Makgadikgadi-zoutvlak-

dit project vermeldt dat de aquifer genoeg lithium bevat voor 400 miljoen elektrische auto's. Hun productie beoogt binnen enkele jaren voldoende te zijn voor een miljoen elektrische auto's per jaar. Ook Italië, met zijn vele vulkanische thermische bronnen, heeft de potentie een belangrijke producent van ‘geothermisch lithium’ te worden (Dini et al., 2021). De EU wil in 2025 voor 80% zelfvoorzienend zijn wat lithium voor batterijen betreft.

Lithium gebonden aan kleimineralen

Lithium komt in kleine hoeveelheden voor in kleimine-



▲ Afb. 4. Zoutexploitatie in de salar van Abijata, Riftvallei, Ethiopië.

te in Botswana, wereldwijd de allergrootste. Ook zoute pekels in diepe watervoerende lagen kan winbare hoeveelheden lithium bevatten, zoals bekend is van olie- en gasboringen. In het Boven-Rijndal in Zuidwest-Duitsland, ter hoogte van Karlsruhe, gaat het Australische ‘Vulcan Energy’ in de toekomst geothermische warmteproductie combineren met lithiumwinning, door warm (165 °C), Li-chloridehoudend water op te pompen uit een 4 km diepe aquifer in Permische en Triassische poreuze zandstenen. De internetpagina van

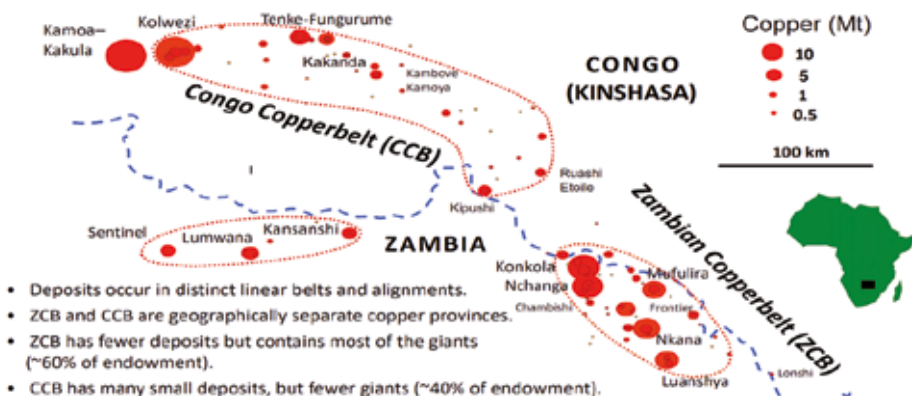
ralen, bijv. hectoriet uit de smectietgroep. In de San José-lithiumafzetting (in de provincie Caceres in Extremadura, Spanje) zit lithium in zinnwaldiet, een lithiummica die in omgezette schalies en kwarts-carbonaataders voorkomt.

Kobalt

Kobalt (symbool Co, atoomnummer 27) is altijd al een strategisch metaal geweest voor de productie van hard en taai staal, zoals pantserstaal en boorbeitels. Vanwege de energietransitie is thans zo'n 60% van de kobaltproductie bestemd voor de fabricage van oplaadbare batterijen.

Kobalt is bijna altijd een bijproduct van koper- en nikkelertsen. Een uitzondering is de Neoproterozoïsche Bou Azzerafzetting, in de Centrale Anti-Atlas van Zuid-Marokko, waar kobalt-nikkelerts voorkomt op het contact van kwartsdioriet en serpentieniet. Het is de enige mijn ter wereld voor kobalt als primaire grondstof uit kobalt-arseniden. Bou Azzer produceert jaarlijks ongeveer

100.000 ton erts met ~1% Co en Ni, Ag en Au als bijvangst.



▲ Afb. 5. De belangrijkste koper-kobalt-afzettingen in de Centraal-Afrikaanse Kopergordel. Bron: USGS, publiek domein.



▲ Afb. 6. Carrolliet, koper-kobalt-nikkelsulfide, uit Congo.
© R. Lavinsky, met toestemming.

Het meeste kobalt wordt echter gewonnen uit koperertsen, afgezet door waterige oplossingen in tot 800 miljoen jaar oude sedimenten in de meer dan 400 km lange Koper Gordel in Zambia en Congo (afb. 5). De Koper Gordel is zo fabelachtig rijk aan metalen dat de eerste Belgische ertsgeologen in Congo spraken van een ‘*scandale géologique*’. De historische productie bedraagt er zo’n 1000 miljoen ton (Mt) erts met gemiddeld 2,7% Cu en 0,3 tot 0,4% Co. Een twintigtal mijnen, de meeste in handen van Chinese bedrijven, produceerden het afgelopen jaar naar schatting 80% van het Congolese kobalt, ca. 80.000 ton (Mulder, 2022).

Carrolliet [$\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})_2\text{S}_4$], is het belangrijkste kobaltmineraal (afb. 6). Zo’n 15–20% van de kobaltproductie in de Koper Gordel (9–12% van de wereldproductie) is afkomstig van ambachtelijke operaties.

Kobalt is ook regelmatig een bijproduct in nikkel-(koper-platinoïden)-sulfide-ertsen in mafische en ultramafische plutonische of vulkanische stollingsgesteenten. In aanwezigheid van zwavel in het magma vormt zich een zware nikkel-sulfidesmelt (+Cu+Co+platinoïden), die zich ontmengt uit het silicaatmagma. De plutonische gesteenten omvatten beroemde gelaagde (ultra)mafische complexen, zoals de Sudbury Irruptive (Ontario, Canada), Stillwater (Montana, VS) en Duluth (VS) en Voisey’s Bay (Labrador, Canada). Een voorbeeld van vulkanische nikkelsulfideafzettingen in plateaubasalten zijn de Norilsk-I-afzetting (Rusland), Jinchuan (China) en het Duluth Complex (Minnesota, VS). De vulkanische groep omvat ook de nikkel(-koper)-sulfide-afzettingen van het Kambalda-

type¹ in komatiïeten (Mg-rijke basalten) van Archaïsche Groensteengordels. Ook Outokumpu-type² Vulkanogene Massieve Sulfide (VMS)-afzettingen met Ni, Co, Cu and Zn ($\pm\text{Ag}$, $\pm\text{Au}$), in zwarte schalies in associatie met ultramafische gesteenten, zijn een bron van kobalt.

| Naam ZA Element | Symbool | Atoomnr. |
|-----------------|---------|----------|
| Lanthanium | La | 57 |
| Cerium | Ce | 58 |
| Praseodymium | Pr | 59 |
| Neodymium | Nd | 60 |
| Promethium | Pm | 61 |
| Samarium | Sm | 62 |
| Europium | Eu | 63 |
| Gadolinium | Gd | 64 |
| Terbium | Tb | 65 |
| Dysprosium | Dy | 66 |
| Holmium | Ho | 67 |
| Erbium | Er | 68 |
| Thulium | Tm | 69 |
| Ytterbium | Yb | 70 |
| Lutetium | Lu | 71 |
| Yttrium | Y | 39 |
| Scandium | Sc | 31 |

▲ Tabel 1. Naam, symbool en atoomnummer van de elementen van de Zeldzame Aardegroep

Ten slotte wordt kobalt aangerijkt in lateritische nikkelafzettingen (lateriet is een tropische verweringslaag, red.).

Zeldzame Aarden

De vijftien Zeldzame-Aardemetalen (ZA, ofwel Rare Earth Element(s), REE’s) of lanthaniden (tabel 1), met atoomnummers 57 (lanthanium) t/m 71 (lutetium), vormen een coherente groep in het periodiek systeem. Scandium (Sc, nr. 31) en yttrium (Y, nr. 39) staan direct boven de ZA in het periodiek systeem en gedragen zich chemisch vergelijkbaar. ZA komen altijd samen voor en zijn essentieel voor honderden toepassingen in de industrie. Zo zijn vooral praseodymium, neodymium en samarium essentiële componenten van sterke, vaste magneten voor windturbines en voor elektromotoren voor aandrijving van elektrische auto’s, zweeftreinen, MRI-scanners, radarinstallaties, computermonitoren en hoefijzermagneetjes. De magneten zijn in het algemeen sinters van metaalmengsels, bijv. Nd-Fe-B en Sm-Co. Voor één megawatt aan geïnstalleerde windenergiecapaciteit is 171 kg aan ZA nodig. In de thans bijna 4000 megawatt aan capaciteit uit windmolens in Nederland is dus 670 ton ZA verwerkt. ZA worden ook gebruikt in

1) Kambalda, W. Australië

2) Outokumpu, Finland

de fabricage van ledlampen, flat screen televisies, katalysatoren, allerlei legeringen, in de defensie- en satelliettechnologie en in keramiek en glazuur. Zo zit er in één F-35 straaljager (bekend als de *Joint Strike Fighter*) 427 kg ZA verwerkt, in een moderne Amerikaanse atoomonderzeeër het tienvoudige (LePan, 2021). Zeldzame Aarden (ZA) heten ten onrechte zeldzaam. Hun gehalte in de aardkorst varieert tussen 64 en 0,32 ppm. Cerium (64 ppm) is vergelijkbaar met het voorkomen van zink (79 ppm), chroom (73 ppm) en lood (17 ppm); lutetium (0,32 ppm) is een factor duizend meer aanwezig in de aardkorst dan de platinoïden en goud (3,1 ppb). Het probleem is dat er weinig natuurlijke processen zijn die ZA concentreren, zodat het leeuwendeel afkomstig is van slechts een paar winbare afzettingen. De Geologische Dienst van de VS (van Gosen et al., 2019) geeft een overzicht van gangbare en (potentieel) winbare afzettingen:

Carbonatieten zijn geërupteerde carbonaatmagma's uit de aardmantel. Wereldwijd zijn er meer dan 330 voorkomens bekend. Het belangrijkste ZA-mineraal hierin is monaziet (Ce,La,Th,Y)PO₄, dat voornamelijk de lichtere ZA-metalen bevat. De belangrijkste carbonatiet-

complexen zijn Mountain Pass (Californië, VS), Palabora (Zuid-Afrika) en Bayan Obo (China). Door tropische verwerking kunnen zich rijke residuaire of eluviale *placers* vormen bovenop een carbonatietlichaam, bijv. Araxá (Brazilië) met 450 Mt reserve en gemiddeld 1,6–4% (ZA)₂O₃.

Carbonatieten komen gewoonlijk voor in samenhang met intrusies van Na-K-rijke, relatief siliciumarme magmatische silicaatgesteenten (nefeliensyenieten). Dit zijn de zgn. Alkalische Provincies met het perovskietgroep-mineraal loparriet [(Na,Ce,Ca)(Ti,Nb)O₃]. Bastnäsiet [(Nd,La,Ce,Y)(CO₃F)], is economisch van belang in de verweringszone van deze gesteenten. Een voorbeeld is de Lake Chilwa Alkalische Provincie van Onder-Krijt ouderdom in de Oost-Afrikaanse Riftvallei in Zuid-Malawi (afb. 7 en 8).

Kwartsaders die zijn gerelateerd aan bovengenoemde alkalische intrusies.

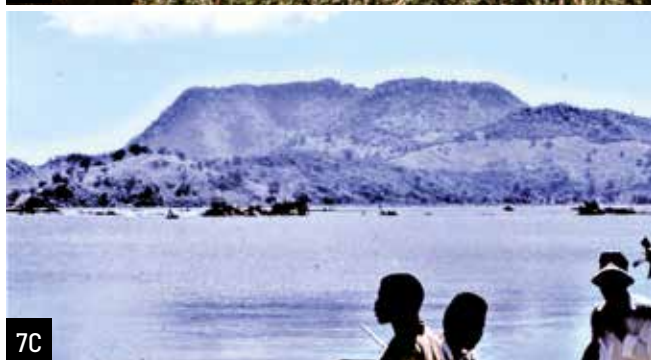
Ijzeroxide-apatiet (Iron-Ore-Apatite, IOA) of *Kiruna-type ijzerafzettingen* zijn een belangrijke bron van ijzer. De apatiet [Ca₃(PO₄)₂] bevat o.a. ZA, U, Ag en Co. De genese van dit erts is controversieel; theorieën variëren van



7A



7B

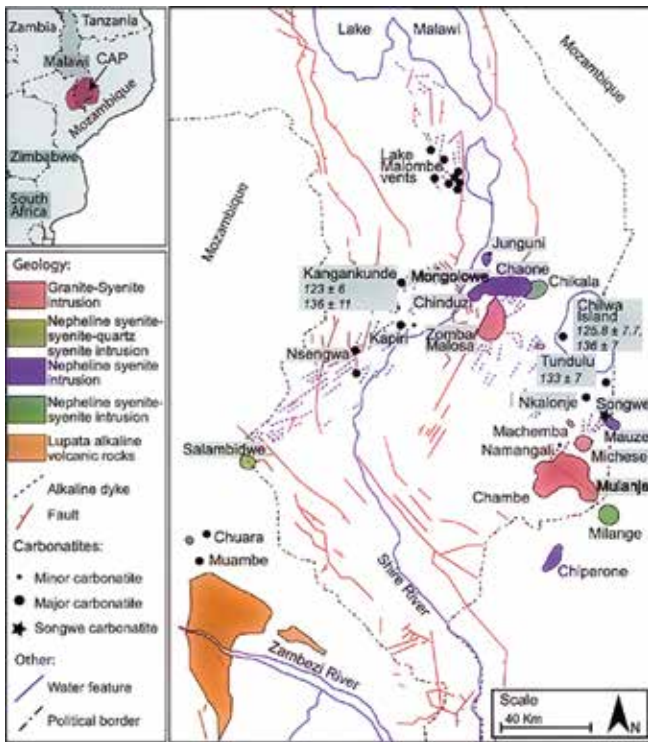


7C



7D

Afb. 7. 'Chilwa Alkaline Province', Malawi. A. Overzicht, kijkend naar het noorden. De platte tafelberg zijn de tot 2000 m hoogte opgeheven granieten en syenieten van het Zomba Plateau. Rechts een aantal alkalische intrusies; iedere berg correspondeert met een intrusie. B en C. Chilwa Lake met in het midden het eiland Chilwa dat bestaat uit een Fe-carbonatiet en de typelocaliteit is van de 'Chilwa Alkaline Province'. D. Theeplantage met Mulanje graniet-syeniet intrusie op de achtergrond, Chilwa Alkaline Province, Malawi.



▲ Afb. 8. Voorkomens van carbonatieten, alkalische intrusies (nephelien-syenieten) en lava's van de 'Lake Chilwa Province' in Zuid-Malawi, in de Oost-Afrikaanse Riftvallei (rode breuklijnen). Bron: Broom-Fendley et al., 2017; Elsevier Publ., met toestemming.

puur magmatisch tot hydrothermaal. Ze zijn genoemd naar de beroemde Proterozoïsche ijzerertsen van Kiruna in Noord-Zweden.

Fosforieten zijn mariene sedimentaire fosfaatafzettingen, met aanzienlijke aanrijking aan ZA, vooral zware ZA. Ze komen in alle continenten voor. Marokko (westelijke Sahara) en China hebben de grootste voorraden. Door te spoelen met verdunde zuren kan bijna 100% van de ZA geconcentreerd worden, zonder de milieuschade die de exploitatie van ZA-afzettingen vaak oplevert. Deze bron van ZA lijkt in staat om aan de toenemende wereldvraag naar ZA te kunnen voldoen (Emsbo et al., 2015).

'Black Sand Deposits' of 'Heavy Mineral Sands' zijn meestal kustzanden, aangevoerd door rivieren die kristallijne

gesteenten van Precambrische Schilden draineren. Ze zijn een belangrijke bron van mineralen als zirkoon, ilmeniet, rutiel en in mindere mate goud, diamant, saffier en granaat, alle mineralen die een transport over grote afstand kunnen overleven. Fluvia-tiele placers met goud, cassiteriet, columbiet bevatten soms ook monaziet, $(Ce,La,Y,Th)PO_4$, en xenotiem, $(Y,ZA)PO_4$, afkomstig van granietpegmatieten of kwartsaders stroomopwaarts.

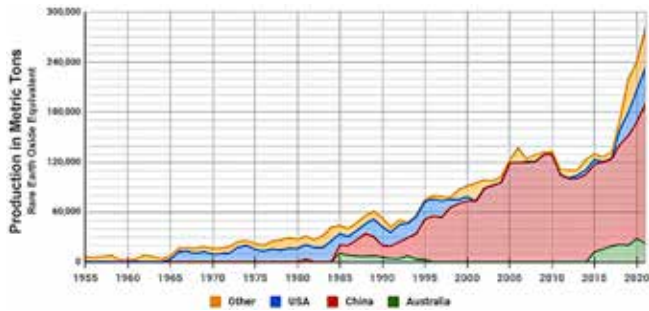
ZA-afzettingen in lateriet in tropische verweringsbodems ('regoliet') op aluminiumrijke stollingsgesteenten of sedimenten leveren het grootste deel van de ZA-productie. De ZA zijn geadsorbeerd aan kleimineralen in het saprolitische (diepere) deel van het lateriet profiel (afb. 9). Kleimineralen zijn negatief geladen en in staat positief geladen (metaal-)ionen te vangen – we maken daar dankbaar gebruik van tijdens geochemische exploratie voor metalen. De meeste economische ZA-afzettingen in regoliet vinden we in China, in verweringsbodems op graniet.

Tot 1964 werden het meeste ZA gewonnen uit fluvia-tiele, monaziethoudende placer-afzettingen stroomafwaarts van pegmatietvelden, grotendeels als bijproduct van uranium- en niobiumextractie. Daarna kwam Mountain Pass in Californië op stoom, de enige afzetting die uitsluitend voor de winning van ZA werd gemijnd. De ZA zitten er grotendeels in bastnäsiet en gerelateerde mineralen. Van 1965 tot midden-1980 was de beroemde Mountain Pass afzetting, met een gemiddeld gehalte van 9,3% ZA-oxiden en een reserve van 20 Mt (cutoff van 5% ZA-oxiden, het minimale rendabele gehalte), de dominante bron van ZA, waarmee de VS tijdelijk in hun eigen behoefte konden voorzien.

De Chinese productie is afkomstig uit twee belangrijke bronnen. De belangrijkste is de Bayan Obo ZA-Fe-Nb-afzetting in Binnen-Mongolië, met ZA-oxide gehaltes van 3 tot 6%. Het is de grootst bekende ZA-afzetting ter wereld en nummer twee wat betreft niobium. De afzetting is een ca. 1400 Ma oud carbonatietplutoon dat in het Siluur (440 Ma) nog een keer door hydrothermale oplossingen is 'bewerkt'. De tweede belangrijke bron van Chinese ZA, in het bijzonder zware ZA, zijn de lateritische ZA-afzettingen in



▲ Afb. 9. A. Lateritisch verweringsprofiel van bauxiet-afzettingen van Kindia, Guinée. Van boven naar beneden: duricrust > bauxiet > saproliet met relictten van sedimentaire gelaagdheid. B. Karst-type bauxietafzetting op kalksteen, Jamaica.



▲ Afb. 10. Wereldwijde productie van Zeldzame-Aarde-oxiden (in tonnen) in de periode 1950-2020. De Amerikaanse productie begon midden jaren '60 met de introductie van de kleurentelevisie en kwam bijna uitsluitend uit de Mountain Pass-afzetting. De Chinese productie startte omstreeks 1980; China is vanaf 1991 marktleider (nu ca. 95%). Bron: USGS en geology.com.

tropische verweringsbodems op granieten. Monaziet, gewoonlijk het belangrijkste ZA-mineraal, bevat hoge gehalten aan thorium, dat slechts zwak radioactief is; zijn gasvormige radioactieve vervalproduct radium, een gevaarlijke alfastraler, kan zich echter ophopen tijdens de opwerking van het erts. Daarom verschuift de aandacht tegenwoordig naar ZA-afzettingen met een laag monaziet- en een hoog bastnäsiet-gehalte. Afb. 10 toont de ontwikkeling van de wereldproductie van ZA-oxiden sinds 1950.

Grafiet

Grafiet is één van de twee natuurlijke vormen van kristallijn koolstof (C; atoomnummer 12); de andere is diamant. Grafiet is een grijs-zwart, zacht, vetzig, metallisch glanzend mineraal met een geringe dichtheid (2,09-2,23 g/cm³). Grafiet wordt gebruikt in elektroden (koolborstels), vuurvast materiaal, smeermiddelen, staalfabricage, remschijven en, de laatste tien jaar, voor lithium-ion batterijen.

Economische grafietafzettingen ontstaan door metamorfose van organisch materiaal in sedimenten (o.a. steenkoollagen) en door neerslaan van grafiet uit een metamorfe of metasomatische C-O-H-vloeistof. Men onderscheidt drie categorieën: (1) microkristallijne grafiet, (2) adergrafiet en (3) kristallijne grafietvlokken (Simandl et al., 2015). Microkristallijne grafiet dient vnl. voor het maken van smeermiddelen. Adergrafiet komt voor in hoogmetamorfe (granuliet-graad) metasedimenten of in sedimentaire successies die geïntroduceerd zijn door kleine magmatische plutonen. Door een chemische reactie met carbonaathoudend nevgesteente

komt CO₂ vrij. Reductie daarvan vormt grafiet. Afzettingen van adergrafiet zijn meestal klein en worden artisanaal of semi-industrieel geëxploiteerd; de winning is arbeidsintensief.

Tenzij anders vermeld, zijn de foto's in dit artikel van A.B. Westerhof.

Literatuur

- Beunk, Frank F., A.B. Phil Westerhof. Metalen en mineralen voor de energietransitie; deel II: Prognoses van de Wereldbank (2020). Gea, te publiceren in 2022.
- Broom-Fendley S., A.E. Brady, M.S.A. Horstwood, A.R. Woolley, J. Mtegha, F. Wall, W. Dawes, G. Gunn, 2017. Geology, geochemistry and geochronology of the Songwe Hill carbonatite, Malawi. *J. African Earth Sci.*, 134, p. 10-23; <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.05.020>.
- Dehaine Q., L.T. Tijsseling, H.J. Glass, T. Törmänen, A.R. Butcher, 2021. Geometallurgy of cobalt ores: A review. *Minerals Engineering* 160; doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106656.
- Dini, A., P. Lattanzi, G. Ruggieri, E. Trumpy, 2021. "Geothermal lithium": a new resource for Italy? *Academia Letters*, Article 170; /10.20935/AL170.
- Emsbo, P., P.I. McLaughlin, G.N. Breit, E.A. du Bray, A.E. Koenig, 2015. Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: Solution to the global REE crisis? *Gondwana Research* 27 (2), p. 776-785; <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.10.008>.
- LePan, N., 2021. Rare Earth Elements: Where in the World Are They? www.visualcapitalist.com/rare-earth-elements-where-in-the-world-are-they/
- Mohr, S.H., G.M. Mudd, D. Giurco, 2012. Lithium resources and production: Critical assessment and global projections. *Minerals* 2, p. 65-84; doi.org/10.3390/min2010065.
- Mulder F., 2022. Elementen voor de toekomst: Kobalt. *Groene Amsterdammer* nr. 23 (8 juni 2022).
- Simandl, G.J., S. Paradis, C. Akam, 2015. Graphite deposit types, their origin, and economic significance. *British Columbia Geological Survey, Ministry of Energy and Mines, Victoria, BC.*
- Van Gosen, B.S., P.L. Verplanck, P. Emsbo, 2019. Rare earth element mineral deposits in the United States. *U.S. Geological Survey Circular 1454*, 16 pp.; doi.org/10.3133/cir1454.
- World Bank Group, 2020. *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*, 110 pp; <https://pubdocs.worldbank.org/en/96171158887536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition>.

Gea probeert bij de notitie van de formules bij mineraalnamen om de officiële schrijfwijze van het IMA te volgen. Een flink aantal mineraalnamen zijn op grond van nieuwe inzichten geen zelfstandig mineraal meer, maar een groepsnaam, met als gevolg dat er bijv. meerdere aparte formules genoteerd zouden moeten worden. Om de goede leesbaarheid van dit artikel niet aan te tasten, hebben we in overleg met de auteurs afgesproken de toegepaste schrijfwijze van de formules niet aan te passen aan de IMA-regels. De iets afwijkende schrijfwijze heeft geen enkel inhoudelijk gevolg voor wat er in het artikel wordt beschreven.

Herman van Dennebroek, adviseur van de Gea-redactie