

Mineralen als grondstof voor apparaten

door Kees de Jong
redactie.dejong@gea-geologie.nl

Er zijn waarschijnlijk geen mensen meer op deze wereld die alleen leven met wat de natuur in hun directe omgeving hen biedt en die daarvoor geen (elektrische) apparaten gebruiken. Wat ooit begon met gereedschap van vuursteen, is in duizenden jaren uitgegroeid tot een myriade aan gebruiksvoorwerpen waarin allerlei grondstoffen zijn verwerkt. Onze hedendaagse maatschappij kan niet meer zonder. Die grondstoffen, of het nu gaat om ijzer, koper, goud, cerium of andere ertsen, komen in de aardkorst voor in de vorm van gesteenten en mineralen.

Mineralen in de oudheid

Het gebruik van mineralen begon in Mesopotamië en bovendien zeer eenvoudig: de eerste messen, speren, andere wapens en sieraden waren van koper. Mineralen met koper, zoals malachiet (afb. 1), azuriet en cupriet, waren lokaal voorhanden. Koper is echter zacht, slijt snel en buigt gemakkelijk. Rond 3000 v.Chr. ontdekten men dat sommige koperertsen een beetje tin bevatten. Die waren harder en smolten ook nog eens bij een lagere temperatuur. Een moeilijkheid daarbij was dat tin en koper apart gesmolten moesten worden om er later brons (een legering van koper en tin) van te kunnen maken. Bijkomend probleem was dat tin maar nauwelijks voorkwam in dat deel van de wereld en dus ergens anders vandaan gehaald moest worden. Zo ontstond de eerste handel in mineralen: eerst uit Afghanistan en later ook vanuit Europese vindplaatsen, zoals Sardinië en Cornwall. De vervaardiging van brons kan als de eerste technologische revolutie worden beschouwd.



Afb. 1. Malachiet, Tsumeb, Namibië

Later, vanaf 1200 v.Chr., werden de eigenschappen van ijzer ontdekt: het is harder en sterker dan brons. Dat leidde tot beter gereedschap, niet alleen voor dagelijks gebruik maar ook voor wapens. Bovendien komt het in de aardkorst veel meer voor dan koper en tin. Tot op de dag van vandaag is ijzer één van de belangrijkste grondstoffen. Met de ontdekking vanaf de 18^e eeuw van al die verschillende chemische elementen is een revolutie ontketend met talloze toepassingen. Allerlei mineralen worden verwerkt voor gebruik in allerlei apparaten. Van batterijen, lampen, accu's, gereedschap, mobiele telefoons tot raketten en vliegtuigmotoren.

Silicium en elektronica

De moderne tijd heeft een nieuwe betekenis gegeven aan de

chemische stof silicium. Het is de op één na meest voorkomende stof in de aardkorst. Het vormt met zuurstof het mineraal kwarts, dat we vooral kennen als zand. Dat werd en wordt overal voor gebruikt: in de weg- en waterbouw, als grondstof voor glas, porselein en email. Sinds de jaren '50 van de vorige eeuw is silicium de grondstof voor halfgeleiders, die gebruikt worden in elektrische circuits: in diodes, computerchips, transistoren. Door de atoomstructuur is silicium een goede halfgeleider. Er zijn wel meer geschikte elementen die als halfgeleider kunnen dienen, maar het feit dat het overal aanwezig is en goedkoop te ontginnen, maakt silicium tot de ideale grondstof.

Het gebruik van silicium in elektronica vormt de basis van de computerindustrie en daarmee van het digitale tijdperk. Overal zitten tegenwoordig chips in; we kunnen er niet meer omheen. Dat de digitale industrie zo'n geweldige vlucht heeft genomen en zo'n succes is geworden is mede te danken aan het gebruik van allerlei andere chemische elementen, m.n. de zeldzame aardmetalen.

Elementen in de aardkorst

Slechts tien chemische elementen maken 99% van het gewicht van de aardkorst uit. De overige tachtig elementen vormen de resterende 1% van het gewicht. Zuurstof is met 46 gewichts% het meest voorkomend, gevolgd door silicium met 28 gewichts%; goud is met 0,0000004 gewichts% een van de meest zeldzame elementen. De chemische elementen vormen verbindingen: de mineralen. Mineralen bevatten dus de grondstoffen waar we naar op zoek zijn voor al onze apparaten en gebruiksvoorwerpen.

Gelukkig zijn de grondstoffen niet gelijkmatig verdeeld over de aardkorst, want in dat geval zouden ze moeilijk winbaar zijn. Geologische processen hebben ervoor gezorgd dat mineralen in de natuur in concentraties voorkomen. Dat heeft belangrijke (economische) voordelen: een hoge concentratie van stof X op een zekere plaats Y kan daardoor veel goedkoper worden gewonnen. Een erts is dus in feite een economisch begrip. Prijschommelingen van de stof X bepalen of die stof rendabel kan worden gemijnd.

Oorlogen om ertsen

De natuurlijke verspreiding van ertsen over de wereld kan ook nadelige gevolgen hebben. Het element tantalium, dat veel ge-



Afb. 2. Niobiet, Spanje

Plaats in lijst van voorkomen in aardkorst	Chemische elementen	Voorkomen in aardkorst in gew%	Productie: ton in 2016
1	Zuurstof	46	
2	Silicium	28	7,2 mln
3	Aluminium	8	57,6 mln
4	IJzer	5	1.150 mln
7	Kalium	2,5	
8	Magnesium	2,3	1 mln
9	Titanium	0,56	6,6 mln
15	Koolstof	0,048	
17	Zwavel	0,042	
22	Chroom	0,0140	26 mln
24	Nikkel	0,0090	2,25 mln
25	Zink	0,0080	11,9 mln
26	Koper	0,0068	19,6 mln
27	Cerium	0,0066	
28	Neodymium	0,0038	
32	Kobalt	0,002	123.000
33	Lithium	0,002	35.000
34	Niobium	0,002	58.000
35	Gallium	0,0019	150
37	Lood	0,0012	4,8 mln
49	Tin	0,00022	296.000
53	Tantalium	0,00021	1.100
57	Wolfram	0,00012	86.000
65	Zilver	0,0000080	2.700
70	Palladium	0,0000015	208
71	Platina	0,0000005	172
72	Goud	0,0000004	3.100
73	Ruthenium	0,0000001	12
77	Rhodium	0,0000001	

Tabel 1. Voorkomen in gewichtpercentages van een aantal in de tekst genoemde chemische elementen in de aardkorst en de productie daarvan in 2016.

bruikt wordt in moderne elektronica, komt voor in de mineralen tantaliet en columbiet, die slechts in enkele landen voorkomen. Door de hoge prijs als gevolg van de schaarste zijn deze mineralen vooral bekend geworden door de bloedige strijd en enorme milieuschade in het oosten van Congo. Hierbij ging het om het erts coltan, een mengsel van de mineralen tantaliet en columbiet, dat tegenwoordig niobiet wordt genoemd (afb. 2). Tantalium is zuurbestendig, buigzaam en heeft een hoog smeltpunt. Het wordt in poedervorm gebruikt als grondstof voor de productie van kleine en lichte elektronische componenten met een hoge capaciteit. Ideaal dus voor kleine elektronische ap-

paraten zoals mobiele telefoons. Vanwege geopolitieke overwegingen wordt tantalium in condensators steeds vaker vervangen door niobium, dat ongeveer dezelfde eigenschappen heeft, maar tien keer meer in de aardkorst voorkomt. Pyrochloor (afb. 3) is het belangrijkste niobiumerts. Brazilië levert 88% van de wereldproductie. Rwanda, grenzend aan Congo, zorgt voor ongeveer de helft van de wereldproductie van tantalium.



Afb. 3. Pyrochloor, Mbeya, Tanzania

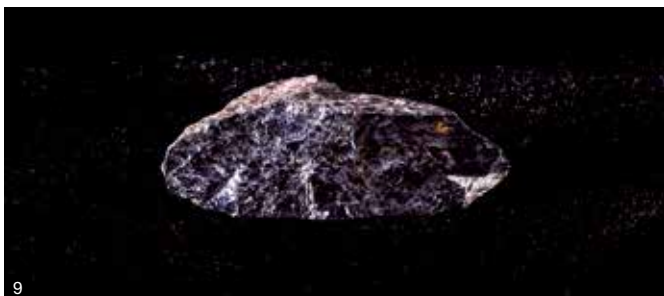
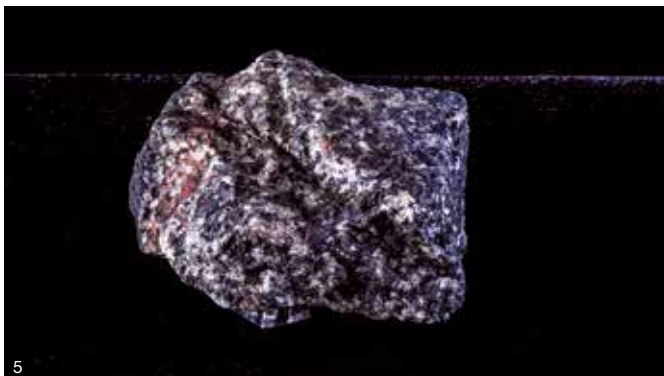
Zeldzame aardmetalen

De zeldzame aardmetalen spelen een belangrijke rol in onze geïndustrialiseerde maatschappij. Het gaat om een groep van zeventien verschillende chemische elementen: scandium, yttrium en de vijftien leden tellende groep van de lanthaniden (lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, promethium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium en lutetium). Zeldzame aardmetalen hebben vergelijkbare eigenschappen en kennen talloze toepassingen, zoals in batterijen, glas, lasers, PET-scanners en verschillende metaallegeringen, als glaspolijsmiddel, supergeleider, katalysator en pigment. Ook de vuursteentjes in aanstekers bestaan uit een legering van zeldzame aardmetalen, vooral cerium en lanthanum.



Afb. 4. Monaziet, Congo

Van neodymium, dat voorkomt in het mineraal monaziet (afb. 4), worden uiterst sterke magneten gemaakt. Deze worden in veel verschillende producten gebruikt, zoals in computers, waar ze de laserarm over de harde schijf sturen. De magneten komen ook voor in startmotoren, elektrische auto's, printers, mobieltjes, speakers, medische apparatuur, pompen en generatoren. De zeldzame aardmetalen zijn niet zeldzaam, zoals de naam suggereert; ze komen in de aardkorst in wisselende hoeveelheden voor. Cerium, het meest voorkomende element van de lanthaniden, komt zes keer meer voor dan lood. Lutetium, de zeldzaamste van deze groep, is honderd keer meer aanwezig in de aardkorst dan goud.



Afb. 5. Bastnaesiet, Groenvlei, Zuid-Afrika

Afb. 6. Xenotiem, Tsjechië

Afb. 7. Gadoliniet, Hitterö, Noorwegen

Afb. 8. Allaniet, Hitterö, Noorwegen

Afb. 9. Aeschyniet, Arendal, Noorwegen

Afb. 10. Yttrium-Synchysiet, White Cloud mijn, VS

Ertsafzettingen van lanthaniden waren lang zeldzaam. Het ertsvoorkomen bij Ytterby in Zweden was in de 19^e eeuw, in de periode waarin de meeste van deze elementen werden ontdekt, de enige vindplaats. De belangrijkste ertsafzetting is momenteel die bij Bayan Obo, in China. Deze mijnstreek levert 90% van de wereldproductie. Daarnaast bevat deze Midden-Proterozoïsche afzetting (1,4 miljard jaar oud) meer dan 1 miljoen ton van het zo belangrijke niobium. De belangrijkste ertsmineralen met zeldzame aardmetalen zijn monaziet, bastnaesiet (afb. 5) en xenotiem (afb. 6). Gadoliniet (afb. 7), allaniet (afb. 8) en aeschyniet (afb. 9) zijn andere zeldzame aardmetalen bevattende mineralen.

LCD-scherm

Het glas van een LCD-scherm (de afkorting van 'liquid crystal display') is een aluminiumsilicaat met een kleine hoeveelheid kalium voor de stevigheid. Het vloeibare kristal, dat uit moleculen bestaat die licht breken, bevindt zich tussen twee glasplaatjes waarop een transparante geleider is geëtst. Deze transparante geleider is opgebouwd uit de elementen tin, zuurstof en indium: indium-tin-oxide (ITO: $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$). Indium wordt gewonnen als bijproduct van de zinkproductie. Een combinatie van andere

chemische elementen, zoals yttrium (afb. 10), lanthaan, terbium en praseodymium zorgen voor de kleuren in het scherm. Het glas wordt briljant gepolijst met ceriumoxide.

Harde schijf

De platte basis van een harde schijf (afb.11A) in een PC wordt gemaakt van aluminium, dat is versterkt met magnesium en sporen koper, zink en silicium. De schijf is dan nog niet magnetisch. Om hem perfect vlak te krijgen, wordt daaroverheen een laagje nikkelfosfide aangebracht. Dan volgt een zachte magnetische onderlaag, die is samengesteld uit kobalt, nikkel en ijzer. De beste harde schijven bevatten twee van deze lagen, van elkaar gescheiden door een laagje ruthenium, een uiterst zeldzaam en duur element uit de platinagroep. Ten slotte komt dan de magnetische laag van de harde schijf, waarin de data worden opgeslagen en uitgelezen. Die magnetische laag is een legering van kobalt, chroom en platina. De arm (afb.11B) beweegt over de schijf in een magnetisch veld, dat wordt opgewekt door een magneet van NdFeB (neodymium, ijzer en boor).

Aluminium wordt gewonnen uit het gesteente bauxiet (afb. 12). Andere aluminiumhoudende mineralen zijn gibbsiet (afb. 13) en diaspoor (afb. 14). Ruthenium komt voor in het mineraal pentlandiet (afb. 15).



A



C



B

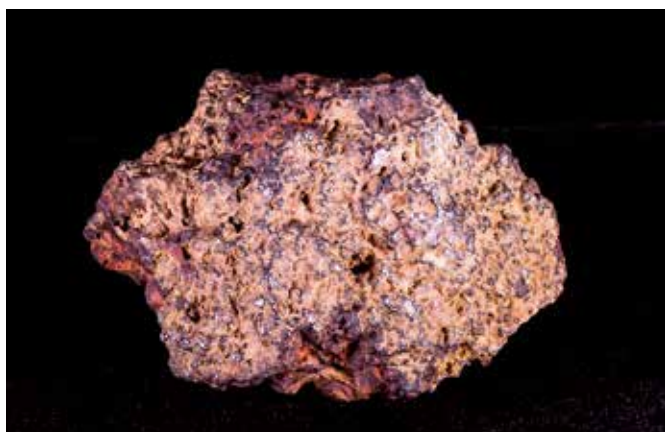
Afb. 11A. Harde schijf

Afb. 11B. Leesarm

Afb. 11C. Moederbord computer

Het moederbord (afb.11C) in een PC bestaat uit geweven, verhard fiberglas, dat brandwerend is gemaakt met een epoxyhars. Daarop bevinden zich alle gesoldeerde componenten van de computer, die met elkaar verbonden zijn met dunne draden van koper voor het geleiden van de elektriciteit. Soldeer bestaat sinds 2006 uit een mengsel van tin, zilver (afb.

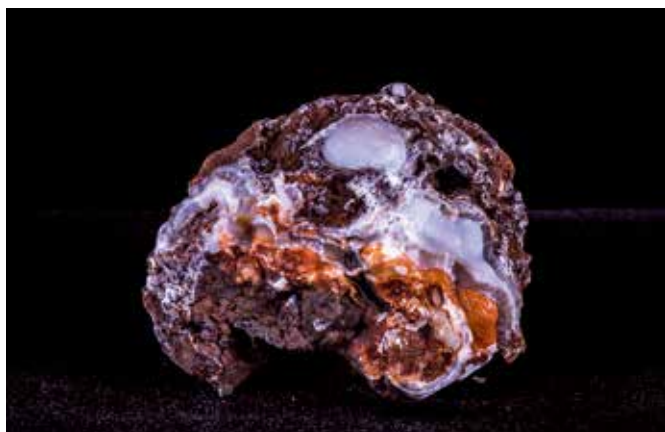
16) en koper (afb. 17). Het oude soldeer (met een samenstelling van 63% tin en 37% lood) is sindsdien verboden vanwege de toxiciteit van het lood. Cassiteriet (afb. 18) is het belangrijkste tinerts. De tinafzettingen van en rondom de eilanden Bangka en Belitung in Indonesië leveren grofweg een derde van de jaarlijkse tinproductie. Contactpunten van componenten (afb. 19) die op het bord kunnen worden ingestoken, zijn vaak opgedampt met een dun laagje goud (afb. 20) of hafnium. Het koper wordt soms bedekt met een uiterst dun laagje palladium, dat de bedrading tegen corrosie beschermt.



Afb. 12. Bauxiet, Suriname



Afb. 14. Diaspoor, VS



Afb. 13. Gibbsiet, Brazilië



Afb. 15. Pentlandiet, Sudbury, Canada



Afb. 16. Zilver, Himmelsfürst mijn, Duitsland



Afb. 17. Chalkosien, Chuquicamata mijn, Chili



Afb. 18. Cassiteriet, Oeganda



Afb. 19. Geheugenkaart met gouden contactpunten



Afb. 20. Goud, Placerville, Californië, VS

Mobiele telefoon

In mobiele telefoons worden van de 83 stabiele, niet radioactieve chemische elementen die op aarde voorkomen er tussen de 62 en 70 gebruikt, variërend van koper voor bedrading en schakelingen, silicium voor het glas van het scherm, koolstof in vezelvorm en in plastic voor de behuizing, zilver, koper en tin voor het soldeer en goud voor elektrische contacten tot diverse leden van de lanthaniden voor de weergave van de schermkleuren, speakers en microfoons. De accu bestaat meestal uit een lithium-ionbatterij.

Voor het geleiden van de elektriciteit, schakelingen en micro-elektrische componenten worden koper, zilver, goud, wolfram (afb. 21), palladium en platina gebruikt, terwijl tantalum belangrijk is voor de microcondensatoren. Uit petroleum, worden plastics vervaardigd. In dat plastic worden, afhankelijk van de toepassing ook andere stoffen verwerkt, zoals magnesium, broom (afb. 22) als vlamvertrager en nikkel voor het reduceren van elektromagnetische interferenties. Het glas van een mobiele telefoon bestaat uit een aluminiumsilicaat, waarin kalium is verwerkt voor de versterking van het glas. In het scherm zit een dunne film van ITO (indium-tin-oxide), die noodzakelijk is voor de geleiding van elektriciteit in het touchscreen.

De kleuren van het scherm komen tot stand door uiterst kleine

hoeveelheden van de zeldzame aardmetalen, zoals yttrium en europium (rood), terbium en gadolinium (groen) en praseodymium (geel).

Legeringen met praseodymium, gadolinium en neodymium worden gebruikt in magneten, speakers en, met nikkel, in microfoons. Verbindingen met neodymium, terbium en dysprosium in magneetjes maken het trillen van het mobieltje mogelijk. In



Afb. 21. Scheeliet, Canada (wolframhoudend)



Afb. 22. Broomchlorargyriet, Broken Hill, Australië



Afb. 23. Stalieriet, Duitsland



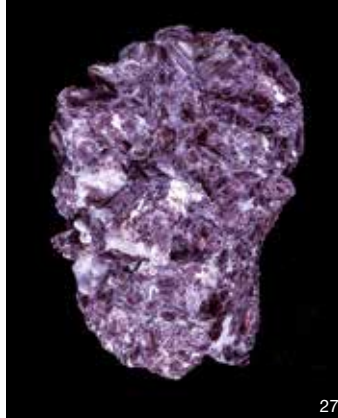
24



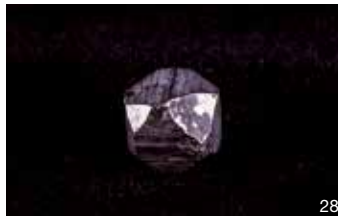
25



26



27



28



29



30



31

Afb. 24. Greenockiet, Vasköh, Roemenië

Afb. 25. Grafiet, Sri Lanka

Afb. 26. Spodumeen, Namaqualand, Namibië

Afb. 27. Lepidoliet, Evje, Noorwegen

Afb. 28. Kobaltiet, Modum, Noorwegen

Afb. 29. Galeniet, Stribo, Tsjechië

Afb. 30. Zwavel, Papandajan, Java, Indonesië

Afb. 31. Bariet, Harz, Duitsland

de chip zit vooral silicium, maar ook zuurstof, antimoon, fosfor, arseen en gallium (uit bauxiet). Galliumarsenide speelt een rol bij het ontvangen en versterken van het signaal.

Batterijen

Nikkelcadmiumbatterij

De (oplaadbare) NiCd-batterij bestaat uit nikkelhydroxide (positieve elektrode) en cadmiumhydroxide (negatieve elektrode). Het nikkel wordt gewonnen uit het mineraal pentlandiet, het belangrijkste nikkelerts. Cadmium wordt gewonnen als bijproduct van de zinkproductie, bijvoorbeeld uit sfaleriet (afb. 23). De buitenkant van de batterij bestaat uit roestvrij staal en bevat tot 10% nikkel. Cadmium is een zeer giftig element en mag sinds 2010 nog slechts in zeer kleine hoeveelheden worden gebruikt. Ook het gebruik van het gele cadmiumpigment is sterk teruggedrongen. Greenockiet (afb. 24) is een ander cadmiumhoudend mineraal.

Ter vervanging van de NiCd-batterij is de NiMH-batterij ontwikkeld (nikkel-metaal-hydride). Het metaal is een legering van zeldzame aardmetalen, vooral met lanthaan. Die vervanging heeft als extra voordeel dat de zinkvoorraad wordt gespaard. Zink (zie tabel 1) wordt op grote schaal gemijnd en dreigt binnen tachtig jaar uitgeput te raken. China is de belangrijkste zinkproducent ter wereld en is ook één van de grootste gebruikers.

Lithium-ion-batterij

In lithium-ion-batterijen bestaat de negatieve elektrode uit koolstof (afb. 25) en de positieve uit lithium-kobalt-oxide. Bij het opladen verplaatsen de lithiumionen zich door de organische vloeistof, meestal ether, naar de koolstofelektrode; bij het ontladen, tijdens het gebruik, gaan ze weer terug. In plaats van kobalt wordt ook wel mangaan gebruikt. Lithium-batterijen worden vooral gebruikt in camera's, horloges, speelgoed, mobieltjes en elektrische auto's.

Lithium is een zeer reactief element, dat vergeleken met andere

batterijen tot een veel hogere energiedichtheid leidt. Per gewicht leveren ze veel meer stroom, wat een belangrijk voordeel is in kleine apparaten, maar ook in elektrische auto's. Nadeel is dat deze batterijen niet te heet mogen worden vanwege de (zeer kleine) kans op spontane ontbranding.

Lithium wordt gewonnen uit de mineralen spodumeen (afb. 26) en lepidoliet (afb. 27). Chili (uit ondergrondse pekelbronnen) en Australië zijn de grootste lithiumproducenten. Kobaltiet (afb. 28) is het belangrijkste kobaltmineraal, waarvan Congo de belangrijkste producent is.

Het omhulsel van aluminium wordt door middel van elektrolyse van aluminiumoxide uit bauxiet gewonnen.

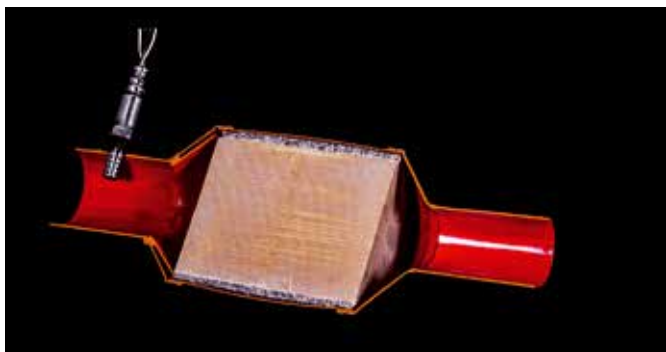
Autoaccu

Een autoaccu, ook een soort batterij, bestaat uit een aantal met zwavelzuur en water gevulde cellen, met daarin een rij loden platen. De negatieve elektrode (de kathode) is bedekt met een laagje fijnverdeeld puur loodpoeder; op de positieve elektrode (de anode) is dit loodoxide.

Lood wordt gewonnen uit galeniet (afb. 29), het belangrijkste looderts. China, Australië en de Verenigde Staten zijn de belangrijkste primaire producenten van galeniet. Inmiddels komt meer dan de helft van het wereldwijd primair geproduceerde lood uit de recycle-industrie. Zwavel (afb. 30) komt, behalve in pure vorm, in veel mineralen voor, zoals pyriet, gips, bariet (afb. 31) en galeniet. In het verleden was pyriet een belangrijke bron van zwavel. Tegenwoordig wordt zwavel vooral geproduceerd bij de ontzwaveling van olie en gas, om een schonere brandstof te maken.

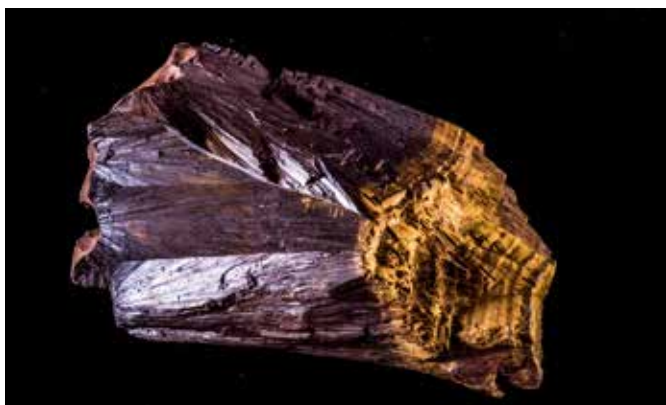
Autokatalysator

De autokatalysator (afb. 32), in de uitlaat van een auto, dient om de uitlaatgassen van de motor te zuiveren van schadelijke gasen. Bij de driewegkatalysator worden de gasen onder meer omgezet in stikstof, water en kooldioxide. Het omhulsel van een



Afb. 32. Autokatalysator

autokatalysator bestaat uit roestvrij staal, een legering van ijzer (afb. 33), chroom, nikkel en koolstof; het werkzame deel is een keramisch blok met een honingraatstructuur, dat tegen hoge temperaturen bestand is. Dit keramisch blok bestaat meestal uit synthetisch cordieriet, een magnesium-aluminiumsilicaat. De celletjes zijn bekleed met aluminiumoxide, met daarop het ui-



Afb. 33. Goethiet, een belangrijk ijzermaneraal. Ironwood, Michigan, VS

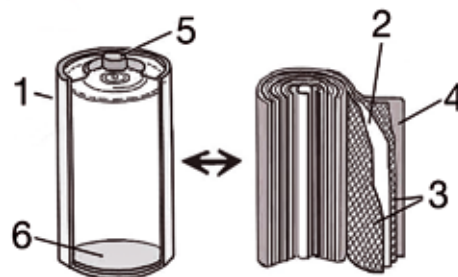


Afb. 34. Chromiet, Noumea, Nieuw-Caledonië



Afb. 35. Ceriet, Bastnäs-mijn, Zweden. Deze mijn is de type-lokaliteit van de chemisch elementen lanthanium en cerium.

Afb. 36. Een weergave van de NiCd-batterij, bestaande uit 1) het omhulsel (een legering van nikkel en ijzer), 2) de positieve elektrode (nikkelhydroxide), 3) de poreuze scheidingswand, 4) de negatieve elektrode (cadmiumhydroxide), 5) pluspool en 6) minpool.



terst fijnverdeelde platina, rhodium of palladium. Deze edelmetalen zijn de eigenlijke katalysatoren; zij zorgen voor een snelle chemische reactie zodra de uitlaatgassen ermee in aanraking komen. Chromiet (afb. 34) is een gesteente dat veel edelmetalen bevat. Zuid-Afrika is de belangrijkste producent. Modernere katalysatoren kunnen ceriumoxide bevatten. Dit mineraal zorgt voor een betere werking van de katalysator bij een lagere temperatuur. Het wordt ook gebruikt als additief in diesel, vanwege de katalyserende werking op het roetfilter. Hierdoor is de verbranding beter en is er minder uitstoot van roet. Cerium wordt gewonnen uit het mineraal ceriet (afb. 35), maar ook bastnaesiet en monaziet bevatten dit element. Omdat edelmetalen vaak duur zijn, loont het de moeite om katalysatoren te recyclen. In 2016 werd ca 34 ton platina gerecycled uit katalysatoren.

Urban mining

De voortdurende ontwikkelingen van de moderne elektronica hebben ertoe geleid dat alleen al in de Verenigde Staten jaarlijks zo'n 130 miljoen mobieltjes worden weggegooid. Uitgedrukt in gewicht bedroeg dit 'e-afval' enkele jaren geleden maar liefst 14.000 ton, waarvan 2100 ton koper, 46 ton zilver, 4 ton goud, 2 ton palladium en 40 kg platina. Ook eenmalige en oplaadbare batterijen (afb. 36) zijn een belangrijke bron voor de recycling van metalen.

Goud is een nogal zeldzaam metaal in de aardkorst (zie het eerdergenoemde gewichts% in de tabel). Jaarlijks wordt er ruim 3000 ton geproduceerd. Tot 2006 was Zuid-Afrika de grootste producent van dit primaire goud. Tegenwoordig zijn China en Australië de grootste producenten. Door de hoge waarde wordt goud op grote schaal gerecycled. In de Verenigde Staten is dat zelfs al meer dan de primaire productie. Als metalen uit afval worden gehaald, spreekt men wel van 'urban mining'. In Zürich in Zwitserland wordt per jaar 20 kg goud uit het stadsafval verwijderd en gerecycled. Deze secundaire winning van goud zal steeds belangrijker worden, want de voorraden goud in de aardkorst zullen naar verwachting over veertig jaar zo goed als uitgeput zijn.

MGM-Delft

Alle genoemde mineralen zijn te zien in het Mineralogisch-Geologisch Museum van het Science Centre van de TU-Delft. Bezichtiging is alleen mogelijk in combinatie met een reguliere rondleiding. Deze worden elke zaterdag en zondag om 14.30 u aangeboden. In de loop van 2018 zal het museum ook zonder rondleiding in het weekend toegankelijk zijn. Adres: Science Centre TU-Delft, Mijnbouwstraat 120, 2628 RX Delft, tel.: 0152 789192.

Alle foto's in dit artikel zijn van Jan Sluiter. De gefotografeerde handstukken heeft het MGM in bruikleen van Naturalis.

Literatuur

- The Rare Earth Elements, an introduction, door J.H.L. Voncken. Springer, 2016.
- Cruciale grondstoffen raken op, door Th. Henckens. In: Gea vol. 50, nr. 1. maart 2017.