

## Ertsen en metalen: bekend en onbekend

door Ernst A.J. Burke en Herman van Dennebroek

Bij het woord erts denkt men al gauw aan ijzererts of kopererts, ertsen van bekende metalen dus. Voor velen zijn ertsen van metalen als wolfram, molybdeen, bismuth, lithium, beryllium, titaan en vele andere praktisch onbekend.

Ertsen zijn economisch winbare grondstoffen van metalen. Het zijn dus ertsen van metalen waarvoor de mensen een nuttig gebruik hebben uitgevonden. Dat betekent dat het aantal verschillende ertsen in de loop van de geschiedenis van de mensheid is veranderd. In het verleden werden sommige reeds lang bekende mineraalconcentraties pas ertsen na de ontdekking dat die mineralen nieuwe, tot dan onbekende elementen (metalen) bevatten. Ook moesten technieken worden ontwikkeld om die nuttige en/of kostbare metalen uit het erts te isoleren. In de aardkorst komen heel veel mineralen voor met in hun samenstelling bepaalde metalen.

Veel ertsen komen in de aarde voor als massieve concentraties waarin nauwelijks een kristal zichtbaar is. Economisch gezien natuurlijk het beste materiaal, maar de mineralenverzamelaar ziet liever mooie kristallen, maar die zijn bij ertsmineralen meer uitzondering dan regel. Op de tentoonstelling die tijdens het Geologisch Evenement Amsterdam in maart 2008 werd gehouden, zijn beide verschijningsvormen (massief en kristallen) van ertsmineralen getoond. Dit artikel is een uitwerking van de teksten die bij deze tentoonstelling werden getoond.

De afbeeldingen bij het artikel staan niet in direct verband met de tekst, maar vertellen een afzonderlijk, opeenvolgend verhaal



*Afb. 1. Exploratie naar grondstoffen en ertsen begint met geologisch, geochemisch en geofysisch onderzoek van een bepaald gebied waarin de waarschijnlijkheid van hun voorkomen gunstig lijkt te zijn. Uiteindelijk moeten de resultaten van een positief lijkend vooronderzoek getoetst worden aan de werkelijkheid vooraleer met exploitatie kan worden begonnen. In dit geval zijn over een heuvel heen een aantal exploratiesleuven gegraven om de aanwezigheid, homogeniteit, zuiverheid en hoeveelheid van kalksteen (voor de productie van cement) te kunnen bepalen. Plaats: Siberië, in de autonome republiek Boerjatië, ten westen van het Baikalmeer ter hoogte van kaap Aya. September 1978.*

over grondstoffen en ertsen, beginnend bij hun exploratie (Afb. 1 t/m 3), daarna hun exploitatie (Afb. 4 t/m 10), en eindigend bij hun verwerking (Afb. 11 t/m 14).

### Grondstoffen en delfstoffen

Er zijn twee groepen van grondstoffen: vernieuwbare en niet-vernieuwbare. Vernieuwbare grondstoffen (voedsel, natuurlijke

*Afb. 2. Op grond van sterke anomalieën in zwaartekrachtmetingen is geboord naar metaalertsen in de ondergrond van de provincie Alentejo in Zuid-Portugal. De afbeelding toont boorkernen die heel veel chalcopryiet (gelige kleur) bevatten. Op grond van die goede exploratieresultaten is in 1989 de mijn Neves Corvo geopend, het erts bevindt zich op dieptes tussen 230 en 700 meter. Thans wordt door ongeveer 600 mijnwerkers jaarlijks ca. 2 miljoen ton erts gewonnen met een gehalte van rond 4,5% koper, een van de hoogste gehalten ter wereld. De mijn zal tot ongeveer 2020 in productie blijven. De foto is in mei 1982 genomen, wat aantoont dat er heel veel tijd zit tussen het vinden van een ertslichaam en het openen van een mijn daarin.*





Afb. 3. Boortoren Kenting N80 UE in augustus 1982 bezig met de boring Blaricum-1 in opdracht van Petroland B.V. De plaats van de boring was gelegen in een polder langs het Eemmeer. In de jaren voorafgaand aan de boring werd in het hele Gooi seismisch onderzoek gedaan om de diepere ondergrond in kaart te brengen. De gevonden gegevens gaven aanleiding voor een exploratieboring naar het voorkomen van aardgas. Voor zover bekend is er geen winbare hoeveelheid aardgas gevonden.



Afb. 4. Jaknikkers in Russell County, Kansas, USA, wachtend op hun inzet. Een jaknikker is de populaire benaming voor het bovengrondse deel van een pomp die aardolie uit de grond oppompt. Nadat met behulp van een boortoren een oliebron is aangeboord, wordt de leiding naar de bron aangesloten op een *dompelpomp*. Deze pomp bevindt zich diep onder de grond, in de op te pompen olie. De pomp wordt aangedreven door een bovengronds geplaatste *elektromotor*. De jaknikker verzorgt de mechanische overbrenging naar de zuiger in de ondergrondse pomp. Opname: juli 1997.

vezels als katoen, bosbouwproducten als hout en papierpulp) zijn afkomstig van planten: die groeien regelmatig opnieuw, en zijn dus in principe onuitputtelijk. Mineralen en brandstoffen (met uitzondering van hout) zijn niet hernieuwbaar: kolen, olie en gas kunnen maar één keer opgebrand worden, fosfaten kan men maar één keer als meststof gebruiken, en van klei kan men

maar één keer stenen bakken. Deze niet te regenereren grondstoffen noemt men minerale delfstoffen: door exploitatie worden ze definitief uitgeput. Bij een blijvende vraag naar een bepaalde delfstof zal men door exploratie telkens nieuwe voorraden moeten blijven vinden.

De term 'minerale delfstoffen' omvat zeer diverse materialen: brandstoffen (steenkool, bruinkool, olie, aardgas, uranium); ertsen voor metalen; industriële delfstoffen (chemie, meststoffen, isolatiematerialen, schuur- en slijpmiddelen, keramiek, edelstenen) en bouwmaterialen (zand, klei, gesteenten, enz.). Delfstoffen zijn gesteenten waarin nuttige of nodige mineralen en/of bestanddelen zodanig geconcentreerd zijn dat zij met winst exploiteerbaar zijn. Aan het begrip winst kan men echter verschillende betekenissen toekennen: meestal is dat zuiver financieel, maar vaak ook sociaal (werkgelegenheid, bv., de ko-



Afb. 5. De Kombat mijn, 50 km ten zuiden van de meer bekende Tsumeb mijn, Grootfontein district in Noord-Namibië in augustus 2007. Het erts van deze mijn bevat 2,5-3% koper, 2% lood en 20 gram/ton zilver. Al in 1851 waren mineralen van Kombat bekend. In de Duitse koloniale tijd werd het erts gewonnen, maar in 1925 (dan onder Zuid-Afrikaans bewind) moest dat ophouden wegens wateroverlast. In 1962 werd de mijn heropend, maar de wateroverlast bleef een continu probleem. In 1988 werd een ondergrondse aquifer aangeboord en moest de mijn opnieuw gesloten worden (120.000 m<sup>3</sup> water per dag stroomde de mijn in). Sluiting wegens teveel water gebeurde andermaal in 2005. Ten tijde van ons bezoek werd 4 m<sup>3</sup> water per minuut uit de mijn gepompt. De productie was sterk opgevoerd vanwege de hoge koperprijs op de wereldmarkt. Helaas werd de mijn in 2008 opnieuw ernstig verwoest door overstroming en is definitief gesloten. Kombat is net als Tsumeb bekend om zijn talrijke en fraaie mineralen, er zijn zes nieuwe mineralen ontdekt. Beroemd zijn de vondsten van transparante cerussiet-kristalgroepen tot 20 cm grootte. Op de Europese mineralenmarkt werd relatief weinig materiaal van de Kombat mijn aangeboden.

lenmijnen in het Ruhrgebied) of politiek (strategische grondstoffen, bv. uranium of cadmium).

### Hoeveel delfstoffen consumeren wij?

Zonder het gebruik van delfstoffen zou de ontwikkeling van de prehistorie naar onze huidige samenleving niet mogelijk geweest zijn. Het belang van delfstoffen voor de ontwikkelingsgeschiedenis van de mens blijkt al uit het feit dat de grote cultuurperioden namen dragen die ontleend zijn aan delfstoffen: Steentijd, Bronstijd, IJzertijd.

De behoefte aan grondstoffen ging gepaard met de ontwikkeling van de natuurwetenschappen, de technologie en uiteraard ook met de toename van de wereldbevolking. Deze drie factoren hebben vooral hun invloed doen gelden gedurende de laatste 200 jaar. Het begin van het industriële tijdperk werd ingeluid



Afb. 6. Gebouw en schachttoren van de fluorietgroeve Cäcilia bij het dorpje Stulln nabij Wölsendorf (Oberpfalz, Beieren, Duitsland). De winning van fluoriet (vooral voor gebruik bij hoogovens als vloeimiddel bij het smelten van ijzer) in dit district begon aan het einde van de 19<sup>e</sup> eeuw, en is definitief gestopt in 1987. In de jaren 1950-1960 werd er uit meer dan 30 groeves 10% van de wereldproductie geleverd, in totaal 2,5 miljoen ton fluoriet. De groeve Cäcilia was in de jaren 1950 met 180 ton fluoriet per dag de grootste fluorietmijn ter wereld, maar is in 1973 gesloten. In 1963 is de mijn beroemd geworden door de vondst van merkwaardig gevormde fluorietkristallen. De kristallen hadden langgerekte, op een skalenoëder lijkende vorm. De schachttoren op de foto dateert van 1933, de twee stapels fluoriet op de voorgrond zijn geen plaatselijke productie, maar ingevoerd uit Frankrijk. Gefotografeerd in augustus 1973 enkele maanden voor de definitieve sluiting.

door de introductie van de stoommachine op commerciële schaal (eind 18<sup>e</sup> eeuw). Daardoor nam de vraag naar grondstoffen sterk toe. Zo bedroeg de koperproductie in 1800 ongeveer 20.000 ton, in 2006 15 miljoen ton. De ruwijzer-productie bedroeg aan het begin van de 19<sup>e</sup> eeuw 800.000 ton, in 2007 was de wereldstaalproductie 1.350 miljoen ton!

Onze samenleving is hoog ontwikkeld, en heeft dus grote hoeveelheden delfstoffen nodig, maar hoeveel? De gemiddelde Nederlander gebruikt tijdens zijn levensduur ongeveer 35 vrachtwagenladingen van 20 ton aan minerale delfstoffen; per jaar is dat ca. 10 ton, het gewicht van 7 tot 8 personenauto's. De consumptie van die ca. 700 ton minerale delfstoffen omvat niet alleen wat men thuis gebruikt, maar uiteraard ook een aandeel in publieke bestedingen, en is als volgt verdeeld:

*Brandstoffen:*

Olie	100 ton
Aardgas	125 ton
Kolen	80 ton

*Bouwmaterialen:*

Gesteentefragmenten	165 ton
Zand en grind	112 ton

Natuursteen	4 ton
Cement	14 ton
Klei	27 ton
Gips	4 ton
Overige stoffen	1 ton

*Andere stoffen:*

Zout	7 ton
Kwartzand	6 ton

*Alle metalen bij elkaar:* 20 ton

**Hoeveel metaal gebruiken wij?**

De gemiddelde Nederlander gebruikt tijdens zijn levensduur ongeveer 20 ton aan metalen, als volgt verdeeld (persoonlijke consumptie en een aandeel in publieke toepassingen):

Aluminium	700 kg
Fosfor	20 kg
Goud	1 kg
Koper	500 kg
Lood	400 kg
Magnesium	150 kg



Afb. 7. Schachttoren (gebouwd in 1920) en afvalbergen van de ijzer- en mangaanmijn Långban (toestand in 1977, thans gerestaureerd). Långban is een klein dorpje (70 inwoners) in de buurt van Filipstad in het mijndistrict Bergslagen van de provincie Värmland, Midden-Zweden. Bergslagen kreeg zijn gezicht door de mijnbouw. Hiervan getuigen nog de duizenden mijnschachten en het grote aantal mijnbouwinstallaties zoals (hoog)ovens, schachttorens en oude installaties waarmee men vroeger het water uit de mijnen pompte. Mijnbouw in Långban begon waarschijnlijk al in de 15<sup>e</sup> eeuw, maar duurde met zekerheid onafgebroken van 1711 tot 1972 (in totaal 940.000 ton ijzererts en 510.000 ton mangaanerts). Långban is vooral bekend om zijn mineraalrijkdom: er zijn ca. 300 mineralen gevonden (4 x zoveel als inwoners!) waarvan 71 daar voor het eerst, en hiervan komen er 30 alleen maar in Långban voor. Juli 1977.

Nikkel	20 kg
Silicium	80 kg
Staal	17.200 kg
Tin	7 kg
Titaan	24 kg
Zilver	2 kg
Zink	300 kg

## Hergebruik (recyclage) van metalen: duurzaam!

Het grote gebruik van minerale delfstoffen en de eindigheid daarvan in de aardkorst dwingt de samenleving tot het bedenken van mogelijke besparingen om verspilling zoveel mogelijk te vermijden.

Hergebruik van materiaal is overigens niet iets nieuws. Velen zullen zich wellicht de opkopers van vodden en metalen voorwerpen herinneren die vroeger dagelijks door de straten reden met handkarren of bakfietsen en daar kennelijk een broodwinning in zagen. De schroothandel in metalen van allerlei aard is thans tot een wereldomvattend bedrijf ontwikkeld, inclusief uitwassen zoals het slopen met de hand van oude schepen op stranden in India.

Ijzerschroot is sinds jaar en dag een vast bestanddeel van de grondstoffen voor de staalbereiding. Staal is immers een materiaal dat steeds opnieuw gebruikt kan worden, zonder enig kwaliteitsverlies. Op die manier bespaart men niet alleen grondstoffen (steenkool en ijzererts), maar ook 70 tot 85% energie. Vandaag de dag wordt bij de vervaardiging van ruw staal nog steeds meer dan 55% gebruikt staal aangewend.

Het belang van aluminiumrecyclage (lege bier- en frisdrankblikjes!) blijkt al snel wanneer men weet dat men, vergeleken met de oorspronkelijke fabricage, bijna 95% energieverbruik bespaart! Meer dan een derde van het aluminium dat vandaag gebruikt wordt, is gerecycleerd en vraagt 20 tot 25 maal minder energie dan de oorspronkelijke fabricage.

Over het algemeen is afval met een relatief hoog metaalgehalte zeer interessant voor recycling door de besparing ten opzichte van de winning van nieuwe ertsen. Zo zijn edelmetalen in allerlei soorten afval (en met name industrieafval) zelfs in hogere concentraties aanwezig dan in hun ertsvorm.

## Metaalertsen

Zoals boven al vermeld, een metaalerts is een bepaalde massa gesteente waaruit nuttige of noodzakelijke metalen met winst gewonnen kunnen worden. Het begrip 'winst' houdt dus in dat 'erts' niet een geologische, maar een economische term is: een gesteente moet een voldoende percentage en hoeveelheid metaal in een verwerkbare vorm bevatten om het voor de industrie (of andere belangen) financieel of anderszins aantrekkelijk te maken.

Men moet onderscheid maken tussen voorraden en reserves van metaalertsen. Onder voorraden verstaat men alle voor de mens te eniger tijd bereikbare en ontginbare hoeveelheden van een bepaald erts. Hoe groot precies de voorraad daarvan is, zal men pas weten als de laatste resten ontgonnen zijn. Zeker is dat die voorraden eindig zijn. Voor sommige metalen is dit einde eerder in zicht dan voor andere. Onder reserves verstaat men dat gedeelte van de voorraden dat onder de gegeven omstandigheden thans economisch winbaar is. Onder sub-economische reserves verstaat men dan de afzettingen waarvan alle gegevens bekend zijn, maar die op het moment van de inventarisatie nog niet economisch winbaar zijn. Ze kunnen het wel eens worden, bv. als de marktprijs voor het betreffende metaal stijgt, of als de technologische ontwikkeling een ontginning binnen bereik brengt.

Die beslissing tot winning van een bepaald gesteentelichaam als delfstof hangt dus af van een groot aantal factoren die de

term 'winst' kunnen beïnvloeden: onveranderlijke (bv. geologie en mineralogie, gehalte en tonnage, textuur, kwaliteit, geografische ligging) en veranderlijke (bv. metallurgie, innovatie, vraag en aanbod, kartels, lonen, arbeidsrust). Exploratie naar nieuwe ertsafzettingen is derhalve altijd een uitermate complex geheel van handelingen en besluiten, en bovendien een zeer tijdrovende zaak, ca. 10 - 15 jaar voor een grote ertsafzetting.

Metaalertsen kunnen onderscheiden worden in de volgende groepen:

- ferrometalen: Fe, Mn, Ni, Co, Cr, W, Mo, V
- non-ferrometalen: Sn, Cu, Pb, Zn, As, Sb, Hg, Bi
- lichte metalen: Mg, Al, Ti, Be, Li, Na
- edele metalen: Au, Ag, Pt-groep
- radioactieve metalen: U, Th, Ra
- zeldzame metalen: Nb, Ta, Cd, Sc, Ga, Ge, Se, Te, Zr, In, Cs, Hf, Re, Tl, Z.A.-groep (Y, La, Ce, enz.)

Zie Tabel 1 met metalen, mineralen, productielanden en productie in 2006.

## Ertsen: concentratie van metalen

Van de 92 chemische elementen die op aarde voorkomen vormen slechts 10 ervan (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti en H) ca. 99,2 massaprocent van de aardkorst. De overige 82 elementen vormen samen dus maar ca. 0,8% van de aardkorst. Veel van de elementen die in onze samenleving een belangrijke rol spelen zijn eigenlijk zeer zeldzaam in de aardkorst als geheel.

Het belangrijke en bekende metaal koper (Cu), komt in de aardkorst gemiddeld voor in een gehalte van 55 gram per ton gesteente (= 55 ppm, *parts per million*). Uit een gesteente met een dergelijk gehalte kan koper niet met winst gewonnen worden. Mineralen (bv. chalcopryiet,  $\text{CuFeS}_2$ ), ertsafzettingen (bv. de Outokumpu mijn in Finland), en metallogenetische provincies (bv. de hele keten van mijnen in de Copper Belt in Zambia) zijn op verschillende schaal concentraties van het element koper, dat in de gemiddelde aardkorst slechts een sporenelement is.

Voor een winstgevende exploitatie van koper uit een erts moet dat erts, afhankelijk van de vele onveranderlijke en veranderlijke factoren, ca. 0,5 tot 5 massaprocent koper bevatten, dat is 5.000 tot 50.000 gram per ton of ppm. In vergelijking met de gemiddelde waarde van 55 ppm is dus voor het vormen van een erts een concentratiefactor van 90 tot 900 nodig: geologische processen moeten er op een of andere manier voor zorgen dat het element koper in een bepaald gesteente op een bepaalde plaats sterk aangerijkt wordt.

Meer voorbeelden van concentratiefactoren in ertsen:

Element	ppm in aardkorst	minimumgehalte voor winning (ppm)	concentratiefactor
IJzer (Fe)	50.000	500.000	10
Zink (Zn)	70	1300-13000	200-2000
Lood (Pb)	13	1600-16000	1250-12500
Tin (Sn)	2	100*-10000	50-5000
Zilver (Ag)	0,07	500	7000
Goud (Au)	0,004	0,015*-100	4-2500
Uranium (U)	1,8	2000	1000
Wolfram (W)	1,5	5000	3300
Molybdeen (Mo)	1,5	6000	4000

\*In alluviale afzettingen ('*placers*'), waarbij de exploitatiekosten veel lager zijn dan uit vast gesteente!

Natrium (Na) en magnesium (Mg) zijn de enige metalen die geëxploiteerd kunnen worden uit een ertsafzetting die een lager gehalte heeft dan hun gemiddelde voorkomen in de aardkorst: zeewater.

Tabel 1

Metaal	Productie in 2006	Voornaamste landen	Mineralen
<b>Ferro-metalen</b>			
IJzer, Fe	1.700 miljoen ton	China, Australië, Brazilië	hematiet, limoniet, goethiet
Chroom, Cr	20 miljoen ton	Z.-Afrika, India, Kazachstan	chromiet
Mangaan, Mn	11 miljoen ton	Z.-Afrika, Brazilië, Gabon	psilomelaan, pyrolusiet, mangaaniet
Nikkel, Ni	1,5 miljoen ton	Rusland, Canada, USA	nickelien, nickelskutterudiet, gaspeiet, pentlandiet, gersdorffiet, rammelsbergiet
Molybdeen, Mo	180.000 ton	USA, China, Chili	molybdeniet, wulfeniet, ferrimolybdiet
Wolfram, W	73.000 ton	China, Rusland	wolframiet, scheeliet
Kobalt, Co	67.000 ton	Congo, Zambia, Australië	skutterudiet, erythrien, heterogeniet, carroliet
Vanadium, V	45.000 ton	Zuid-Afrika, China	vanadiniet, descloiziet
<b>Non-ferro-metalen</b>			
Koper, Cu	15 miljoen ton	Chili, USA, Peru	chalcopriet, borniet, malachiet, gedegen koper, chalcosien, tennantiet, gedegen koper, cupriet
Zink, Zn	10 miljoen ton	China, Australië, Peru	sfaleriet, "schalenblende", smithsoniet, wurtziet
Lood, Pb	3,5 miljoen ton	China, Australië, USA	galeniet, cerussiet, bournoniet
Tin, Sn	275.000 ton	China, Indonesië, Peru	cassiteriet, stannien
Arseen, As	60.000 ton	China, Chili, Marokko	arsenopyriet, gedegen arseen (Scherbenkobalt), stibarseen (allemontiet), realgar, auripigment
Antimoon, Sb	135.000 ton	China	stibniet, berthieriet
Kwik, Hg	1.500 ton	China	kwik, cinnaber
Bismut, Bi	6.000 ton	China, Mexico	gedegen bismut, bismuthiniet
<b>Lichte metalen</b>			
Aluminium, Al	33 miljoen ton	China, Rusland, Canada	bauxiet, cryoliet
Titaan, Ti	10 miljoen ton TiO <sub>2</sub>	Australië, Z.-Afrika, Canada	ilmeniet, rutiel, titaniet
Magnesium, Mg	4 miljoen ton	China, Turkije, N.-Korea	magnesiet, gibbsiet
Lithium, Li	21.000 ton	Chili, Australië, China	lepidoliet, spodumeen, petaliet, amblygoniet
Beryllium, Be	150 ton	USA	beryl, bertrandiet
Natrium, Na	42.000 ton Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	USA	haliet, natron
<b>Edele metalen</b>			
Zilver, Ag	20.000 ton	Mexico, Peru, China	gedegen zilver, acanthiet, proustiet, freibergiet
Goud, Au	2.500 ton	Australië, USA, China, Peru	gedegen goud, een aantal sulfidische ertsen (o.a. pyriet, chalcopriet) hebben voldoende bijmenging van goud om als gouderts te dienen
Palladium, Pd	230 ton	Rusland, Zuid-Afrika	gedegen platina, soms in goud
Platina, Pt	220 ton	Zuid-Afrika, Rusland	gedegen platina, sperryliet
<b>Radioactieve metalen</b>			
Uranium, U	40.000 ton	Canada, Australië, Kazachstan	uraniniet, autuniet, torberniet
Thorium, Th	6.500 ton monaziet	India	thoriet, monaziet
<b>Zeldzame metalen</b>			
Niobium, Nb	60.000 ton	Brazilië, Canada	samarskiet, columbiet-Fe, pyrochloor
Cadmium, Cd	21.000 ton	China, Korea, Japan	hawleyiet, wurtziet, otaviet
Selenium, Se	1.400 ton	Japan, Canada, België	seleen, berzelianiet, krutalet
Tantaal, Ta	1.300 ton	Australië, Brazilië	mangaantantaliet, plumbomicroliet, stibiomicroliet
Indium, In	500 ton	China, Japan, Canada	roquesiet, sakuraiiet
Rhenium, Re	45 ton	Chili, USA, Peru	rheniet
Telluur, Te	150 ton	USA, Canada, Peru	tellurobismuthiet, petziet, altaiet
Thallium, Tl	10 ton	Rusland, België, Nederland	hutchinsoniet
Cesium, Cs	onbekend	Canada, Zimbabwe	polluciet
Gallium, Ga	70 ton	China, Duitsland, Japan	galliet (bijmenging in germaniet/renieriet)
Germanium, Ge	100 ton	Canada, België	renieriet, germaniet, briartiet
Rubidium, Rb	onbekend	Canada	rubiclien
Scandium, Sc	onbekend	China, Kazachstan, Rusland	thorveitiet
Zeldzame Aarden	123.000 ton (oxiden)	China, India	bastnäsiet, monaziet, allaniet en samarskiet; deze 4 mineralen vormen de belangrijkste bron voor de metalen van de Zeldzame Aarden
<b>Overige ertsen/delfstoffen</b>			
Strontium, Sr	600.000 ton	China, Spanje, Mexico	celestien, strontianiet
Barium, Ba	8 miljoen ton	China, USA, India	bariet, witheriet
Boor, B	5 miljoen ton	Turkije, Chili, Argentinië	colemaniet, datoliet, kerniet, ulexiet, inderiet
Chloor, Cl	55 miljoen ton	China, USA, Duitsland	haliet, sylvien, carnalliet
Fluor, F		China, USA	fluoriet, cryoliet
Jodium, I	25.000 ton	Chili, Japan	
Broom, Br	550.000 ton	USA, Israel	(zee)water
Fosfor, P	150 miljoen ton fosfaat	USA, China, Marokko	apatiet
Zwavel, S	65 miljoen ton	USA, Canada, China, Rusland	zwavel, pyriet,



## ← Ertsen en metalen: bekend en onbekend

Afb. 8. De gigantische dagbouwgroeve Corta Atalaya bij Rio Tinto in de provincie Huelva, Zuidwest-Spanje. De karakteristieke ellipsvormige groeve meet 1200 bij 900 meter, en is 350 meter diep. Er werd 1 miljoen ton pyriet per jaar uit gewonnen. De mijnen bij Rio Tinto behoren tot de oudste ter wereld, de Feniciërs exploiteerden ze al in de 10<sup>e</sup> eeuw voor Christus. Maar pas de Romeinen gingen goed aan de slag: alleen zij al lieten 16 miljoen ton ovenslakken achter (die overigens nog grote hoeveelheden koper en goud bevatten, later zijn ze opnieuw opgesmolten). De moderne mijnbouw is in 1724 hervat, thans zijn de mijnen gesloten. De ertsen hadden gehaltes van 0,5-2% koper, en daarnaast aanzienlijke hoeveelheden goud en zilver. Zo werd in het jaar 1987 ca. 5.500 kg goud geproduceerd. Mei 1982.

Afb. 9. Enorme 100-tons truck (chauffeur als maatstaf!) in de zink- en loodmijn Reocín bij Torrelavega in de provincie Cantabrië, Noord-Spanje. Juli 1989. De mijn is ontdekt in 1856 door een Belgische firma, werd later door een Spaanse firma overgenomen, en wegens gebrek aan voorraden gesloten in 2003. Er is 60 miljoen ton erts gemijnd met een gemiddeld zinkgehalte van 8%. Deze mijn had problemen met water, 25% van de exploitatiekosten werden besteed aan het afvoeren van water. Transport is eveneens een grote kostenpost, enorme trucks halen het erts uit de open groeve, banden kosten tot tienduizenden dollar per stuk! Hoewel in de mijn mooie markasietkristalgroepen en redelijk gekristalliseerde galeniet en sfaleriet gevonden werden, kwamen deze zelden of nooit op de mineralenmarkt terecht.

Afb. 10. Een nogal schrijnend contrast met de grootschalige mijnbouw uit de vorige plaatjes. In de Assunção mijn bij Ferreira de Aves, prov. Beira Alta in het Viseu district (Noord-Portugal) worden brokken gesteente met de hand gesorteerd. De groeve is geopend eind jaren 1980 voor de commerciële productie van kwarts en veldspaat uit een grote pegmatiet. De grote afmetingen van de afzonderlijke mineralen maken machinale sortering bijna onmogelijk. De pegmatiet is bekend voor de enorme kristallen van groene beryl (tot 4 meter lang). Ook andere berylliummineralen komen er voor, zoals bertrandiet en phenakiet. Eveneens beroemd van deze vindplaats zijn de uiterst fraaie kristallen van het uraanmineraal autuniet. Juli 1989.

Afb. 11. Nogmaals min of meer handmatige mijnbouw. Karren gevuld met gedolven erts werden in de St. Barbara schacht met de hand uit de lift gehaald in de Jales goud- en zilverbijna bij Vila Pouca de Aguiar in het Vila Real district ten oosten van Porto, Portugal. De Romeinen hebben hier al naar goud gezocht (en het gevonden). In moderne tijden is in de mijn tot een diepte van 620 meter gewerkt van 1932 tot 1992. Het erts was zeer rijk, niet minder dan 13 gram/ton goud. In die periode zijn 26.000 kg goud en 94.000 kg zilver geproduceerd. Het erts was zeer massief en er zijn dan ook geen kristalgroepen uit deze mijn bekend. Juli 1989.

Voor alle andere metalen is een concentratiefactor tot meer dan 10.000 nodig vooraleer een winstgevend exploitatie mogelijk is. Deze hoge factoren verklaren de relatieve zeldzaamheid van exploiteerbare voorraden van metaalertsen; de lange tijd die nodig is om nieuwe voorraden te vinden leidt bovendien tot aanzienlijke prijsstijgingen bij onverwacht grote vraag ernaar.

### Metaalertsen in Nederland?

In de Nederlandse ondergrond komen metalen als ijzer, koper, zilver, zink, lood en tin niet meer voor in winbare concentraties en hoeveelheden.

De vroegmiddeleeuwse ijzerindustrie op de stuwwallen van de Veluwe moet in de periode van de zevende tot de negende eeuw een van de grootste van Noordwest-Europa zijn geweest. De opbrengst van het ijzerproductieproces kon worden berekend aan de hand van de chemische samenstelling van de slakken en het gebruikte ijzererts. Veldverkenningen tonen aan dat op de Veluwe tenminste 110.000 ton slak aanwezig moet zijn geweest. Daarvoor is ongeveer 200.000 ton klappersteen gesmolten. Veel van de slakkenhopen zijn inmiddels verdwenen,

Afb. 12. Om de edele mineralen uit het ruwe erts van de Jales mijn (zie vorige afbeelding) te kunnen verwijderen wordt dat eerst fijn gemalen (meestal de grootste kostenpost van een mijnoperatie), en vervolgens op een bepaalde manier behandeld met processen die tot mineraalscheiding leiden. In Jales wordt dat met flotatie bereikt. Aan het gemalen erts worden met water bepaalde vloeistoffen toegevoegd die zich specifiek hechten aan het oppervlak van de korrels van de verschillende mineralen; ook moet er een vloeistof bij die bij het inblazen van perslucht schuimende luchtballen veroorzaakt. Aan die naar boven drijvende (= flotatie) luchtballen hechten zich dan de gewenste mineralen, en die kunnen dan op die wijze gescheiden worden van de waardelose mineralen. Op de foto ziet men het zwarte schuim, luchtballen waaraan de korreltjes van gedegen goud en zilver gehecht zijn. Juli 1989.

Afb. 13. Door mineraalscheiding verkregen concentraten van ertsmineralen worden vervolgens naar smelters gebracht om de metalen eruit te krijgen. De concentraten van Afb. 12 worden naar België verscheept om daar te worden opgesmolten.

Op de afbeelding is de aftap te zien van de hoogoven Senelle in Herserange bij Longwy, departement Meuse-et-Moselle (regio Lotharingen, Noordoost-Frankrijk). In de 19<sup>e</sup> eeuw ontstond in Lotharingen een belangrijke staalindustrie die de plaatselijk voorkomende, relatief arme ijzerertsen verwerkte. In de jaren na de 2<sup>e</sup> Wereldoorlog was het gebied nog goed voor tweederde van de Franse staalproductie (zij het met forse overheids subsidies). Maar in de jaren 1970-1980 kwam door een aantal factoren de grote neergang van die industrie: onder meer de import van betere en goedkopere ijzerertsen, en de verplaatsing van hoogovens naar de kuststreken (minder transportkosten!). In december 1985, toen deze foto werd gemaakt, waren van de vijf hoogovens er nog twee in bedrijf.

Afb. 14. Mijnbouw, zowel in dagbouw als ondergronds, heeft meestal ingrijpende gevolgen voor het milieu: afbraak van het landschap, uitlogen van giftige elementen uit afvalhopen, waterverontreiniging, etc. Bij Panasqueira in het district Castelo Branco, provincie Beira Baxa, Portugal bevindt zich een van de grootste wolfram mijnen ter wereld (thans zijn de Chinese mijnen de grootste leverancier van wolfram). De afzetting bij Panasqueira is al bekend sinds het einde van de 19<sup>e</sup> eeuw, maar de systematische exploitatie startte in 1934. Thans wordt per jaar 600.000 ton erts gedolven met een gehalte van slechts ca. 0,25% WO<sub>3</sub>. De aanwezige voorraden zijn nog voldoende voor ongeveer 9 jaar productie. De mijn is bekend bij verzamelaars voor de uiterst fraaie specimens van wolframiet en apatiet. De afbeelding toont de installatie waarin de wolframmineralen met flotatieprocessen uit het erts geconcentreerd worden, en de vallei waarin daarna de ca. 99% afval van het erts (vooral kwarts) gedumpt is. De firma zorgt goed voor zijn arbeiders, er zijn zelfs voetbalvelden aangelegd bovenop het afval, maar de vallei (die nog verder naar beneden volgestort is) heeft aanzienlijke milieuschade ondervonden. Augustus 1992.

gebruikt als wegverharding of als erts in de hoogovens. Uit deze geschatte hoeveelheid slak volgt dat er minimaal 55.000 ton ruwijzer op de Veluwe moet zijn geproduceerd. De middeleeuwen kwamen aan ijzer door klappersteen in houtskoolovens te verhitten. De houtskool reduceerde het ijzeroxide tot metallisch ijzer. Dit product is via de handelsplaats Dorestad, nu Wijk bij Duurstede, geëxporteerd naar andere Europese landen. Een andere belangrijke conclusie gaat over de relatie tussen de ontbossing van de Veluwe en de ijzerindustrie. De eerdere veronderstelling dat het hoge brandstofverbruik ten behoeve van de ijzerproductie tot ernstige aantasting van de bossen en daarmee indirect tot winderosie heeft geleid, wordt niet gesteund door pollendiagrammen van de regio. Deze tonen aan dat de ontbossing van de Veluwe niet door de vroegmiddeleeuwse ijzerindustrie is veroorzaakt, maar pas begon nadat de ijzerproductie daar was verdwenen. Het eind van de productie is waarschijnlijk niet veroorzaakt door een brandstoftekort. Mogelijk was het ijzererts op, of was de markt voor ijzer ingestort.

In aansluiting op de bekende voorkomens van zink- en loodertsen bij Moresnet (van 1816 tot 1916 neutraal gebied onder Pruisisch-Nederlands beheer, thans in België), al ontgonnen

door de Romeinen, werd ook herhaaldelijk gezocht naar dergelijke ertsen in Limburg, laatstelijk vanaf 1935 door de maatschappij Cavando Acquiro N.V. Men verwachtte op basis van de opbrengst van de vlak over de grens gelegen Belgische mijnen zo'n 200.000 ton zuiver lood- en zinkerts te kunnen winnen. In juni 1936 werd de eerste Nederlandse schuine boring geplaatst. Er werd onder een hoek van 45° geboord maar al na 50 meter moest worden gestopt omdat men in de taai klei niet meer verder kwam. Ondanks dat grootschalige vererfsingen niet werden aangetoond, waren de verwachtingen toch zo groot dat een concessie werd aangevraagd van ruim 31 km<sup>2</sup>. Nadat resultaten uitbleven, was het een jaar later definitief gedaan met de activiteiten van Cavando Acquiro.

De enige metalen die thans in Nederland worden gewonnen zijn magnesium, calcium, kalium en natrium. Dat gebeurt in combinatie met de zoutwinning. Zout ontstaat door verdamping van zeewater. Tijdens het Perm en het Trias kwam zoutvorming op massale schaal ook in Nederland voor. De verbreiding van steenzout is beperkt tot het noorden en oosten van het land (Friesland, Groningen, Twente).

De totale Nederlandse zoutproductie bedraagt 4 tot 5 miljoen ton per jaar. Dat maakt ons land tot de grootste zoutproducent in Europa en één van de grootste ter wereld. De winning gebeurt ondergronds door zoet water in de grond te spuiten. Daardoor lost het steenzout op, en kan de pekelaag naar boven worden gepompt en naar de raffinaderijen geleid. In Noord-Nederland vindt op een diepte van 3.000 meter de diepste oplossingsmijnbouw ter wereld plaats.

De totale aanwezige steenzoutvoorraad in de Nederlandse ondergrond is meer dan 1.000 miljard ton. Maar de economisch winbare voorraad aan steenzout bedraagt voor de komende 50 jaar 'slechts' ruim 350 miljoen ton, wat een bruto economische waarde van ca. 3,5 miljard Euro vertegenwoordigt.

## Metaalproductie in Nederland

Nederland heeft weliswaar zeer weinig metaalertsen in zijn ondergrond (op zout na), maar wel een belangrijke industrie die diverse buitenlandse ertsen verwerkt tot metalen. Hierbij enkele gegevens over het jaar 2006.

Pechiney Nederland NV (PLN) in Vlissingen produceerde ca. 300.000 ton aluminium en is daarmee een van de grootste fabrieken van zijn soort in Europa. De complete fabriek werd door de eigenaar, het Canadese Alcan Inc., in oktober 2006 te koop aangeboden. Inmiddels zijn alle aandelen van de fabriek verkocht aan de Britse private equity onderneming Klesch & Company Ltd. uit Londen. De naam van de fabriek is omgedoopt in *Alco*, wat staat voor Zeeland Aluminium Company. Voor het productieproces, dat bekend staat als het *Hall Process*, is zeer veel elektriciteit nodig. Pechiney sloot destijds met de elektriciteitsmaatschappij in Zeeland, PZEM, een contract af dat voorzorg in levering tegen een lage prijs. PZEM kon elektriciteit tegen deze lage prijs niet rendabel opwekken door middel van een conventionele elektriciteitscentrale, en bouwde daarom de kernenergiecentrale Borssele.

De Corus Group in IJmuiden (thans van het Indiase Tata Steel) produceerde in 2005 6,9 miljoen ton staal. Dit staal wordt gebruikt in de auto-industrie, in de bouw en in de verpakkingindustrie (bijvoorbeeld in drankblikjes en spuitbussen). Staal van Corus wordt ook toegepast in buizen, batterijen en in witgoed. Corus beschikt over tal van fabrieken. Op het terrein, verdeeld over Heemskerk, Beverwijk en Velsen, staan onder andere twee kookfabrieken, een pellets- en sinterfabriek, twee hoogovens, een (oxi)staalfabriek, een warm- en twee koudbandwalserijen en diverse fabrieken waar het staal gecoat of geverfd wordt, zoals in de DVL (dompel-verzinklijn). Daarnaast zijn er vier havens, waarvan twee een directe verbinding met de Noordzee vormen. De research en development afdeling van Corus vormt een be-

langrijk onderdeel van het bedrijf. Grote onderhouds-, renovatie en nieuwprojecten worden uitgevoerd door het interne ingenieursbureau Projects & Technical Consultancy (PTC).

Zinifex Limited in Budel-Dorplein (thans van Nyrstar) produceerde 240.000 ton zink, 17.000 ton lood en 570 kg cadmium uit concentraten afkomstig van hun eigen Century mijn in Queensland, Australië. Deze mijn zal waarschijnlijk tot rond 2015 open blijven. Minerale concentraten worden in de vorm van een soort modder via een ondergrondse pijplijn van 304 km lengte naar de haven van Karumba gesluisd, daarvandaan wordt een gedeelte per schip naar Nederland gebracht voor verwerking in Budel.

Uit pekelaag van vier putten (2 km diep) in Tripscompagnie bij Veendam wint Nedmag Industries per jaar zo'n half miljoen ton magnesium. De productie daaruit van magnesiumoxide bedraagt 150.000 ton en die van magnesiumchloride 70.000 ton. Daarnaast wordt ook nog per jaar 40.000 calciumchloride geproduceerd. De zoutlaag is zo groot en dik dat, zelfs als de huidige jaarproductie wordt verdubbeld, nog honderden jaren ononderbroken toevoer mogelijk is. Nedmag is de toonaangevende Europese producent van doodgebrand magnesiumoxide van hoge kwaliteit.

Akzo Nobel produceerde in Delfzijl en Hengelo meer dan 2 miljoen ton zout. Akzo boort al sinds 1918 naar zout in de Twentse bodem. Twente was miljoenen jaren geleden een binnenzee, en nadat het zeewater was verdampt bleef er op een diepte van 450 meter in de grond een 50 meter dikke laag steenzout achter. Onder de naam Koninklijke Nederlandse Zoutindustrie werd bij Boekelo begonnen met het winnen van steenzout. Na de opening van het Twenthekanaal werd de fabriek in 1936 verplaatst naar Hengelo. Ook de concessiegebieden waar naar zout geboord mocht worden verplaatsten zich. In totaal is er zo'n 72 miljard kilo naar boven gehaald. En de zoutvoorraad is zo groot dat Akzo nog honderden jaren door kan gaan met zout winnen in de regio. In Hengelo wordt per jaar zo'n twee miljoen ton zout geproduceerd en verwerkt. Een klein deel daarvan is keukenzout, het overgrote deel wordt gebruikt in de voedingsmiddelenindustrie, landbouw en veeteelt of als wegeenzout. Vijf procent van al het zout wordt gebruikt voor de productie van chloor.

Frisia Zout BV in Harlingen (onderdeel van ESCO) produceert en verkoopt jaarlijks ca. 1 miljoen ton zout van hoge kwaliteit. Het kristalzuivere, 300 miljoen jaren oude zout wordt in Noordwest-Friesland (rond Sexbierum en Harlingen) uit de bodem gewonnen. Afnemers zijn met name de chemische industrie en daarnaast producenten van voeding voor mens en dier. Tevens wordt zout geproduceerd voor waterontharding en gladheidsbestrijding van wegen.

## Alledaagse toepassingen van enige weinig bekende metalen

**Beryllium (Be):** wordt gewonnen uit de mineralen beryl en bertrandiet, veruit het meest in de USA. Beryllium is een giftig metaal; het wordt toegepast in allerlei legeringen, met name in 'berylliumbrons', een legering met koper. Dit brons is vonkvrij (gereedschap in een vuurwerkfabriek!), niet-magnetisch, zeer hard en veerkrachtig (remschijven in vliegtuigen en zware vrachtwagens, horlogeveren en afslagvlak van golfclubs).

**Cadmium (Cd):** wordt gewonnen als bijproduct bij de winning van vooral zink, maar ook van lood en koper; China, Korea en Japan zijn de grootste producenten. Meer dan 80% van de cadmiumproductie wordt thans gebruikt in batterijen, maar omwille van zijn giftigheid hebben een groot aantal landen (bv. de hele EU) het gebruik van cadmium verboden in een aantal artikelen, o.a. in bepaalde soorten batterijen. Nieuwe toepassingen worden ondertussen ontwikkeld voor gebruik van cadmium in zonnepanelen.

**Cesium (Cs):** wordt gewonnen uit het mineraal polluciet. Canada en Zimbabwe zijn de enige producenten. Cesium wordt



toegepast in atoomklokken en voor het maken van zware vloeistoffen die gebruikt worden bij het boren naar olie en gas.

**Gallium (Ga):** wordt gewonnen als bijproduct bij de winning van zink, slechts ca. 70 ton/jaar, vooral uit China, Duitsland, Japan en Oekraïne. Het wordt in de vorm van GaAs (galliumarsenide) en GaN (galliumnitride) gebruikt (85%) in elektronische apparatuur (vooral mobiele telefoons), voor laser diodes en LED's, en in zonnepanelen.

**Germanium (Ge):** wordt gewonnen als bijproduct bij de raffinage van zink, slechts ca. 100 ton/jaar, vooral in Canada en België (uit concentraten afkomstig van Congo). Germanium stond aan de wieg van de elektronische industrie, het werd gebruikt in de eerste transistoren. Thans wordt germanium vooral toegepast in glasvezels, in nachtkijkers, in zonnepanelen en als katalysatoren.

**Indium (In):** wordt gewonnen als bijproduct bij de winning van zink, vooral in China, Canada en Japan. Indium wordt vooral gebruikt in LCD's, in platte televisie-schermen, in lasers (de rode scanners in supermarkten).

**Lithium (Li):** wordt gewonnen uit ondergrondse pekelbronnen, vooral in Chili en Argentinië, en ook uit het mineraal lepidoliet. De voornaamste toepassing ervan is nu nog in keramiek en glas, maar het gebruik in oplaadbare batterijen neemt sterk toe, met name in camera's, computers, telefoons en snoerloze apparatuur. Die batterijen worden ook gebruikt in hybride auto's (met verbrandingsmotor en elektrische motor).

**Niobium (Nb)** (vóór 1950: Columbium) en **Tantaal (Ta):** worden gewonnen uit de mineralen columbiet-tantaliet (bekend als 'coltan') en voor niobium uit pyrochloor. Brazilië is veruit de grootste producent van niobium, Australië die van tantaal. Niobium wordt vooral gebruikt als ferroniobium in de staalindustrie en als niobiumlegeringen in de ruimtevaartindustrie. Tantaal wordt het meest gebruikt (60% van het totaal) voor elektronische condensatoren in mobiele telefoons, computers en auto's.

**Rhenium (Re):** wordt gewonnen als bijproduct bij de winning van molybdeen. Chili en Kazachstan zijn de grootste producenten (slechts ca. 45 ton/jaar, prijs \$ 5.000/kg). Rhenium wordt vooral gebruikt als superlegering in hoge-temperatuur turbineonderdelen en als platina-rhenium katalysator bij de productie van loodvrije benzine met een hoog octaan gehalte, ook in thermokoppels.

**Rubidium (Rb):** wordt gewonnen als bijproduct bij de winning van cesium en lithium uit de mineralen polluciet en lepidoliet, praktisch uitsluitend in Canada. Rubidium wordt gebruikt in nachtkijkers en als vervangingsmiddel van kwikzilver in lampen.

**Scandium (Sc):** wordt vooral gewonnen uit het mineraal thortveitiet en uit fluoriet, meestal in China, Kazachstan, Rusland en Oekraïne. Scandium wordt vooral gebruikt in legeringen met aluminium voor sportartikelen (honkbalknuppels, fietskaders, golfclubs, tentstokken), maar ook in hoge-intensiteit metaalhalidelampen.

**Strontium (Sr):** wordt gewonnen uit de mineralen celestien en strontianiet, vooral in China, Spanje en Mexico. Strontium wordt het meest gebruikt voor de fabricage van het glas van het front-

paneel van televisietoestellen. Strontium wordt ook toegepast in vuurwerk (de prachtige rode kleur!).

**Thallium (Tl):** wordt gewonnen bij de raffinage van erts van zink, koper en lood. Thallium is zeer giftig, in het verleden werd het gebruikt tegen ratten en insecten, maar sinds het einde van vorige eeuw is het gebruik als pesticide niet meer toegestaan. Het metaal wordt toegepast in halfgeleiders, in infrarood apparatuur en in glas. Interessant is zijn toepassing in hoge-temperatuur supergeleiders, maar dit is nog niet commercieel mogelijk.

**Zeldzame Aarden (Engels: Rare Earths):** dit zijn het element yttrium en de lanthaniden: cerium, dysprosium, erbium, europium, gadolinium, holmium, lanthanum, lutetium, neodymium, praseodymium, samarium, terbium, thulium, en ytterbium. Zij worden gewonnen uit de mineralen bastnäsiet, monaziet en loparriet, en ook uit klei in bauxiet. China en Rusland zijn de grootste producenten. Deze reeks elementen wordt in talrijke toepassingen gebruikt, vooral in katalysatoren van auto's, in legeringen, in glas en keramiek, in permanente magneten, in de schermen van televisietoestellen en monitoren. Zeer alledaags gebruik: in vuursteentjes van aanstekers!  
Zie ook de artikelenserie "Zeldzame Aarden" 1 t/m 3 in Gea jaargang 2008 nr. 2, 3 en 4.

De foto's zijn gemaakt door: Ernst A.J. Burke: afb. 1, 2, 7 en 8, en Herman van Dennebroek: afb. 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13 en 14.

## Literatuur

- Bernard, J.H. & Hyršl, J. (2004). Minerals and their localities. Granit, Praha, 807 pp.
- Burke, E.A.J. & Dennebroek, H. van (2007) 92 elementen, bouwstenen voor 4200 mineralen. Gea, 40, nr. 2, pp. 35-40.
- Duijvenvoorde, R. van (2006). Vroeghistorische ijzerproductie in Nederland. Gea 39 (2006), 3, 86-93.
- Felder, W.M. & Engelen, F.H.G. (1989). Metaalertsen in de bodem van Limburg. Grondboor en Hamer, 43, 371-376.
- Joosten, I. (2004) Technology of Early Historical Iron Production in the Netherlands. Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies 2, 133 p.
- Montfrans, H.M. van, Graaff, L.W.S. de, Mourik, J.M. van, Zagwijn, W.H. (1988) Delfstoffen en samenleving. SDU Uitgeverij, Den Haag, 83 p.
- Strunz, H. & Nickel, E.H. (2001) Mineralogical tables. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 870 p.
- Uytenbogaardt, W. (1983) De aarde is eindig. Minerale grondstoffen / waar zijn ze / wat doen we er mee / hoe lang nog? Ten Have, Baarn, 96 p.

## Internet

- [www.webmineral.com](http://www.webmineral.com)  
<http://nl.wikipedia.org/>  
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity>