
Ertsen: mineralen waar winst in zit

door J. Stemvers-van Bemmel

Het is onvermijdelijk dat in een themanummer over Mijnbouw en Mineralen vaak over de vorming van ertsen gesproken wordt. Nu is met de literatuur over ertsen een zeer flinke bibliotheek te vullen. We zullen dan ook maar niet de pretentie hebben, bij deze korte uiteenzetting over het ontstaan van ertsen zelfs maar bij benadering volledig te zijn. Hooguit kunnen die processen in een kader worden geplaatst, die in de hoofdartikelen ter sprake komen, in de hoop dat hun plaats in het geheel van de ertsgenese iets duidelijk wordt.

Om te beginnen is het begrip "erts" niet een zuiver geologisch, maar ook een economisch begrip. Een erts is een mineraal of een associatie van mineralen die, bij de beschikbare technische mogelijkheden, met winst geëxploiteerd kan worden om er een of meer metalen uit te halen.

Niet ieder gesteente dat metaal bevat is dan ook een erts. Is er geen winst te behalen, dan is er sprake van een mineraalvoorkomen of een mineralisatie.

De kwalificatie "erts" geldt bij de diverse metalen bij sterk verschillende percentages nuttige inhoud. Zo is het winnen van ijzer pas economisch als een gesteente 50 % van dit metaal bevat. Dit percentage kan overigens tot 22 dalen, als het ijzer aan carbonaat is gebonden (sideriet). Tin is rendabel bij 1 %. Nikkel in sulfidenvorm is bij 1 % wel rendabel, in silicaatvorm bij 1,4 % nog niet. Het gehalte van kopererts dient tussen de 0,5 en 1 % te zijn; het lood- en het zinkpercentage moet 3 % bedragen. Goud kan bij 0,0001 % (1 gram per ton!) nog economisch te winnen zijn.

Vaak maken kleine gehalten aan edele metalen de exploitatie van een goedkoper metaal rendabel: bij lood komen vaak zilver en goud voor; in Canada (Sudbury) worden lage opbrengsten uit koper-nikkelertsen door het voorkomen van platina goedgemaakt. Van pyriet, dat voor 46 % uit ijzer en 54 % uit zwavel bestaat, is de ijzerproductie niet lonend (zwavelhoudend erts is trouwens voor hoogovens ongeschikt). Dit mineraal wordt wel gebruikt voor de bereiding van zwavelzuur.

Ijzer maakt in de aardkorst 5 % van het totaal uit. In erts moet het dus 10 x verrijkt voorkomen ten opzichte van het aardkorstgemiddelde. Koper (aardkorst 0,005 %; erts 0,5-1 %) moet 100-200 x geconcentreerd voorkomen en zilver zelfs 1000 x wil het als erts gewonnen kunnen worden. Geologische processen hebben voor plaatselijk zeer sterke concentratie van mineralen gezorgd. Ertsen zijn, evenals "normale" gesteenten, natuurlijke mineralen of mineraalaggregaten. Ook hebben zij, qua ontstaanswijze en stabiliteit, hun eigen begrenzingen. Er is dan ook samenhang tussen bepaalde ertsen en het "favoriete" neven- of moedergesteente dat hetzelfde stabiliteitsgebied heeft. Zo komt diamant van oorsprong alleen voor in kimberliet, een ultrabasisch, olivijnrijk dieptegesteente; wolfram en tin zijn alleen in zure gesteenten te vinden.

Indeling van ertsen naar hun ontstaanswijze

A. Endogeen gevormd (binnen de aarde, uit of t.g.v. magma ontstaan)

1. liquid-magmatisch
2. contact-metasomatisch
3. pegmatitisch-pneumatolitisch
4. hydrothermaal
5. exhalatief (t.g.v. vulkanische processen)

B. Exogeen gevormd (onder invloed van verschijnselen aan het aardoppervlak)

1. verweringsafzettingen
 - a. mechanisch (vnl. door uitspoeling geconcentreerd)
lateritisch
terra rossa (karst)
ijzeren hoed
 - b. chemisch-residuaair
 - c. via infiltratie
2. sedimentair
 - a. mechanisch: 1. eluviaal; 2. deluviaal; 3. alluviaal
 - b. chemisch
 - c. biogeen
3. humane afzettingen (bv. storthopen van mijnen)

C. Metamorf gevormd. Ertsen die gevormd worden onder invloed van verhoogde druk en temperatuur uit bestaande gesteenten.

Vooraf aan de *cursief* gedrukte groepen zal in deze uitgave aandacht gegeven worden.

Endogene ertsafzettingen

Enkele termen die de magmatisch ontstane ertsen betreffen vragen om een verklaring.

Liquid-magmatisch: in vroeg stadium van kristallisatie in - diep gelegen - magmahaard (gesteentesmelt) geconcentreerde mineralen; bv. door het zinken van zware kristallen of door ontmenging in een sulfidensmelt.

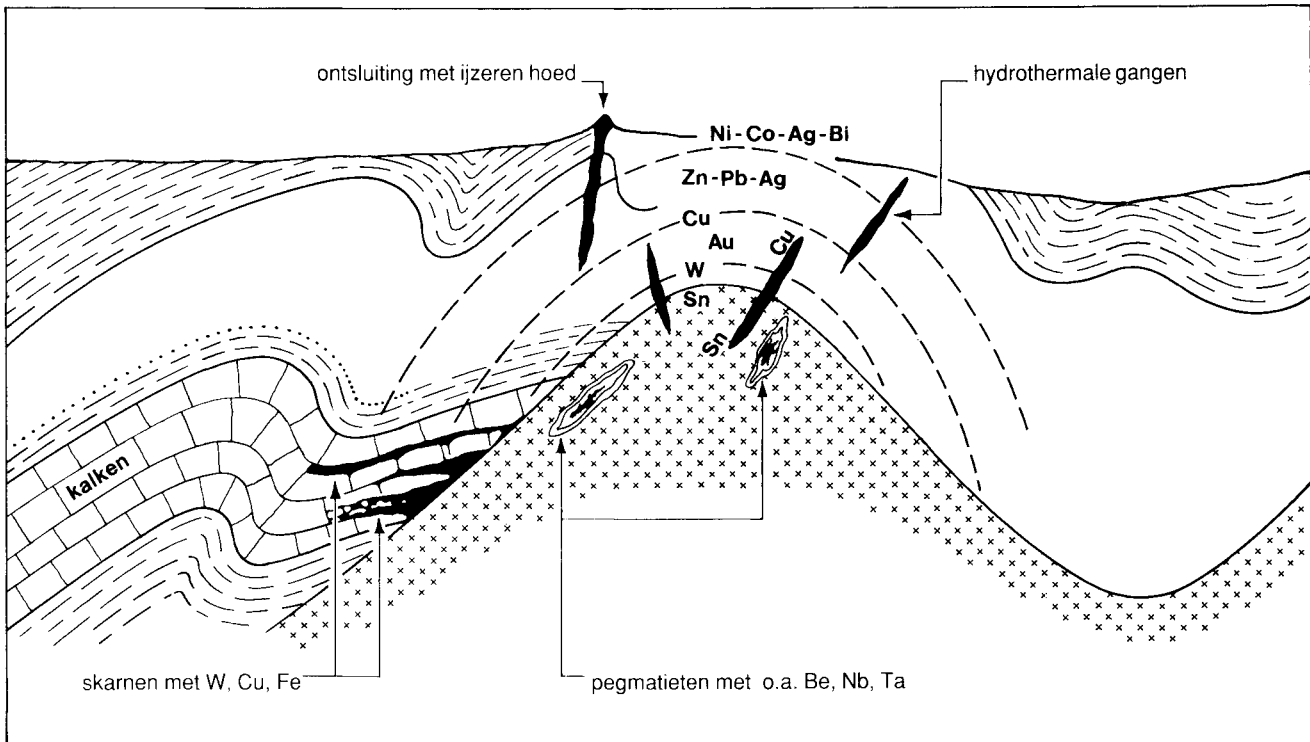
Contact-metasomatisch: vanuit de magmahaard kunnen gasen of vloeistoffen het nevengeesteente binnendringen. De samenstelling van dit nevengeesteente wordt daardoor in de contactzone veranderd (dit is contact-metasomatose). Wanneer het nevengeesteente kalkig is kan dit proces rijke, maar smalle randen van skarnen opleveren, met o.a. koper-, lood- en zinksulfiden.

Pegmatitisch-pneumatolitisch: Ook in een laat stadium van kristallisatie vanuit een magmahaard ontstaan ertsen, met name waar het magma een granietische samenstelling heeft. Een groot aantal metalen wordt geconcentreerd in een vluchtige, granitische restsmeelt. Deze staat onder hoge druk en kan in spleten en het bovenliggende gesteentepakket dringen en daar afkoelen tot pegmatietgangen. Omdat temperatuur en druk verminderen naarmate de pegmatietgangen verder van het granietcomplex verwijderd raken, verandert hun samenstelling. Uit de stoffen die nog in de restsmeelt aanwezig zijn worden immers, ieder in zijn eigen stabiliteitsgebied, mineralen gevormd. Zo ontstaan zones of aureolen om het granietlichaam waarin, veelal in pegmatiet- en kwartsaders, bepaalde mineralen zijn geconcentreerd. Dichtbij het granietcontact ligt (natuurlijk voor zover in de smelt aanwezig) een zone van goud, wolframiet en cassiteriet (tinoxide). Verder verwijderd kunnen zones met koper, zink, lood en zilver voorkomen. Afb. 1.

Hydrothermale ertsafzettingen

Een indeling zoals hierboven gegeven heeft iets willekeurigs. Er lijken grenzen tussen de groepen te bestaan, die in werkelijkheid

Afb. 1. Schema van de ertsafzettingen om een granietintrusie (naar Routhier)



overlappingsen zijn. De grens tussen pneumatolisch-pegmatisch en hydrothermaal is zo'n vage. Daalt de temperatuur van de restsmelt geleidelijk onder de 400 °C (de "kritische" temperatuur voor H₂O: eronder is sprake van vloeibaar water, erboven van fluïde, kritische stoom; het geheel staat onder grote druk), dan treden hydrothermale processen op. Het verband tussen temperatuur, druk en diepte waarop de processen zich afspelen is te zien in Tabel I.

Vaak spelen hydrothermale processen zich af in gangen in het nevengesteente. De verlaging van de temperatuur is de belangrijkste oorzaak van het neerslaan van de mineralen in de hydrothermale gangen.

Goede doorlatendheid bevordert het proces van ertsvorming. De porositeit van het gesteente is van groot belang; deze is bijv. voor klei 30 %, voor zandsteen 15 %, voor graniet 0,3 %. Bij de afkoeling van vooral zure gesteenten treedt krimp op, die zelfs tot 10 % kan bedragen; hierdoor ontstaan spleten, scheuren en gangen. Ook bij verschuivingen kan door rek ruimte ontstaan, waarin erts tot afzetting kan komen. Door verschuivingen kunnen breccies gevormd worden: gesteenten die bestaan uit verbrokkelde, hoekige fragmenten. Om deze gesteentebrokjes zet zich schaalvormig bv. galeniet of sfaleriet af; deze kokarde-ertsen, ook wel ringelerts genoemd, worden veel in de Harz gevonden.

Meer naar het aardoppervlak toe gaan factoren als de zuurgraad van het poriënwater meetellen. Kalksteen wordt door het opper-

vlaaktewater gemakkelijk opgelost. De gevormde holten kunnen verertsen (sideriet, FeCO₃, kan op den duur carbonaat, CaCO₃, vervangen, zoals bv. bij de siderietvoorkomens bij Santander, N-Spanje, gebeurde.

In het eindstadium van de hydrothermale werking kunnen oplossingen het nevengesteente nauwelijks meer beïnvloeden en wordt de rol van het oppervlaaktewater (p^o, zuurstof- en kooldioxide-gehalte, humuszuren) steeds groter. In deze fase komt de ertsvorming terecht in het grensgebied met de exogene processen. Zo zijn er zg. syngenetische (gelijktijdig met het omringende sedimentaire sulfide-afzettingen, waarvan nog niet duidelijk is of zij hydrothermaal of wellicht via biochemische processen zijn gevormd. In het laatste geval zouden bacteriën een rol hebben gespeeld. Voorbeelden zijn belangrijke koperafzettingen van Katanga (Zaire) en het Rammelsbergerts uit de Harz, dat koper-, lood- en zinksulfiden met bariet bevat.

Exogene ertsafzettingen

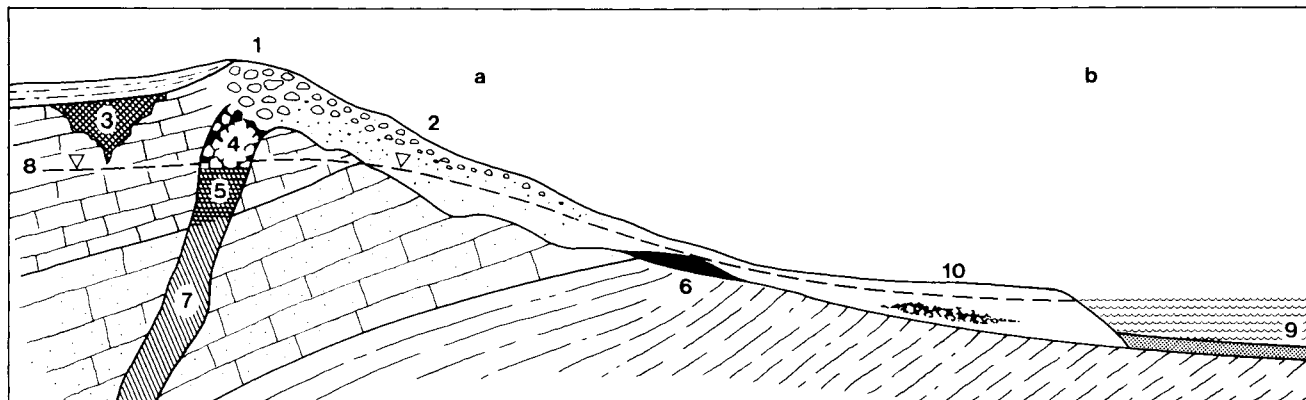
Bij exogene processen spelen verweringsverschijnselen een rol, zie afb. 2. Verwering treedt op bij mineralen, en dus bij gesteenten die deze mineralen bevatten, die niet bestendig zijn onder atmosferische omstandigheden aan het aardoppervlak. Dit is vooral het geval bij mineralen die uit of door de werking van een

Tabel I. Hydrothermale afzettingen

	temp in °C	druk kg/cm ²	diepte in km	metaalvoorkomen
hypothermaal	500 - 300	2500 - 1000	10 - 4	tin, wolfram, bismut, goud
mesothermaal	300 - 200	1000 - 150	4 - 1	koper, lood, zink, zilver
epithermaal	200 - 50	150	1.3 - 0.3	lood, zink, ijzer, zilver, mangaan, antimoon, kwik, uranium + bariet, fluoriëet en calciëet

Afb. 2. Schema van het ontstaan van exogene ertsafzettingen. Mechanogeen: 1. eluviaal; 2. deluviaal; 10. alluviaal. Chemogeen: 3. residuair; 4. ijzeren hoed; 5. cementatiezone;

6. metathetisch (via infiltratie); 7. oorspronkelijke ertsader; 8. grondwaterspiegel; 9. mariene sedimentaire ertsafzetting; a. verwerings- en denudatiegebied; b. accumulatiegebied.



magma zijn ontstaan. De onbestendige mineralen worden omgezet in wél bestendige, of ze worden opgelost, weggevoerd en uiteindelijk weer afgezet door sedimentatie of neerslag. Zo gaat dat met gesteentevormende mineralen als veldspaten, amfibolen en pyroxenen, maar ook met ertsmineralen, zoals de sulfidische ertsen.

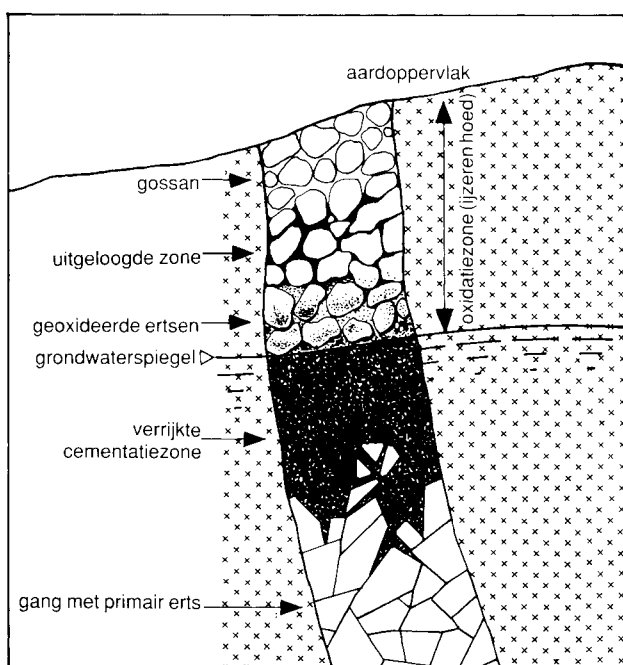
Een van de soorten chemisch-residuair afzettingen is karstformatie (terra rossa). Bij karstverwerking worden carbonaten en gips opgelost. Kleimineralen blijven als residu achter (de aluminiumrijke kleimineralen zijn belangrijke componenten bij de bauxietvorming); verder bestaat het residu uit ijzerverbindingen (limoniet: boonerts), mangaanverbindingen en bariet. De karstafzettingen komen zakvormig in de kalken voor. Karstprocessen veroorzaken vaak redepositie, waardoor veel zink-loodertsafzettingen werden geconcentreerd. Bij het zg. Mississippi-Valley-type van zink-loodertsvorming is waarschijnlijk een combinatie van sedimentatie in kalkgesteente en karst in het spel.

Oxidatie (ijzeren hoed) en cementatie

Door verwerking vindt in de bovenste gedeelten van ertsgangen boven de grondwaterspiegel oxidatie plaats van instabiele mine-

ralen, afb. 3. Het oppervlaktewater, dat zuurstof en kooldioxide bevat, reageert met vooral de sulfidische mineralen in de bodem. Het water, dat zuur is en waarin nu vele opgeloste stoffen voorkomen, sijpelt naar beneden tot aan de grondwaterspiegel. Onopgeloste stoffen: hydroxiden, carbonaten, fosfaten, maar vooral ijzeroxiden, blijven achter. Ijzeroxide blijft aanwezig als limoniet, die aan dit bovenste deel van de oxidatiezone, *gossan* genoemd, een roestbruine kleur geeft. Onder de gossan kan een aan ertsen armere, *uitgeleegde zone* van de oxidatiezone aanwezig zijn. De oxidatiezone in zijn geheel wordt, naar de kleur van limoniet, de *ijzeren hoed* genoemd.

Onder de grondwaterspiegel worden vele van de boven opgeloste metalen weer afgezet, nu in andere verbindingen, in de zg. cementatiezone. Deze cementatiezone is een rijke ertszone, omdat vele van de waardevolle metalen hier geconcentreerder voorkomen dan in de oorspronkelijke, wellicht arme, ertsgang. Deze zone is vaak zeer massief, in tegenstelling tot de veelal poreuze oxidatiezone. De diepte van de oxidatiezone varieert over het algemeen van enige tot tientallen meters. De dikte van de cementatiezone hangt sterk af van seizoensveranderingen in de grondwaterspiegel; in een vochtig klimaat is de dikte enige tot 20 m, in een aride (droog) klimaat enige tientallen tot 100 m. De cementatieprocessen vergen zeer veel tijd.



Afb. 3. De secundaire verrijking in een sulfidisch ertslichaam.

Oxidatiezone: van sulfide naar sulfaat

Ijzer in de oxidatiezone. Magnetiet wordt hematiet of blijft onveranderd; hematiet is niet erg bestendig aan de oppervlakte en gaat over in limoniet of goethiet; sideriet wordt limoniet, soms hematiet; pyriet gaat over in ijzersulfaat en zakt omlaag of het slaat weer neer als limoniet; hetzelfde overkomt markasiet. Alleen limoniet en goethiet blijven in de oxidatiezone achter, samen met veel kwarts-materiaal.

Zink. Sfaleriet of zinksulfide (ZnS) is niet stabiel; het wordt omgezet in zinksulfaat. Dit slaat niet neer en verdwijnt naar omlaag. Als er kalk aanwezig is, wordt in de oxidatiezone smithsoniet ($ZnCO_3$) gevormd. Afb. 4.

Lood. Galeniet of loodsulfide (PbS) gaat in de oxidatiezone over in het onoplosbare anglesiet ($PbSO_4$), of, met kalk, in cerussiet ($PbCO_3$), of in betrekkelijk zeldzame andere verbindingen. De mineralen die de eindproducten van de oxidatie zijn hebben kenmerkende, levendige kleuren. Tabel II.

Cementatiezone

De sulfaten die gevormd zijn in de oxidatiezone, worden in de cementatiezone in contact met primaire sulfiden gereduceerd, waardoor genoemde sulfaten overgaan in sulfiden. Voor de volgorde van neerslag van deze sulfiden is de oplosbaarheid een belangrijke factor. Er bestaat een bepaalde volgorde van

Tabel II

element	kleuren	mineralen	verbindingen
Fe	geel, bruin, rood	"limoniet", goethiet, hematiet	oxiden
Mn	bruin, zwart	wad, psilomelaan, pyrolusiet	oxiden
Pb	wit	cerussiet	carbonaat
		anglesiet	sulfaat
Zn	wit, roestgeel (Fe)	smithsoniet, "galmei"	carbonaat
		hemimorfiet, "galmei"	silicaat
Cu	groen, blauw	malachiet, azuriet	carbonaten
		chrysocol	silicaat
		antleriet, brochantiet, chalcantiet	sulfaten
Ni	groen	annabergiet	arsenaat
		garnieriet, schuchardtiet, pimeliet	silicaten
Co	rose, paars	erythrien	arsenaat
As	oranje, geel	realgaar, auripigment	sulfiden
U	zwart, geel, groen	uraniniet	oxide
		torberniet, autuniet	fosfaten
Hg	rood	cinnaber	sulfide

oplopende oplosbaarheid: de Schürmanns spanningsreeks. Deze luidt: -- kwik -- zilver -- koper -- bismut -- cadmium -- lood -- zink -- nikkel -- kobalt -- ijzer (ferro, tweewaardig) -- mangaan. Goud komt als sulfide niet voor. In omgekeerde richting (mangaan -- kwik) zijn de metaalverbindingen moeilijker oplosbaar; de metalen zijn "edeler".

"Ieder voorgaand metaal is in staat een volgend, minder edel, uit zijn sulfide te verdringen". Ofwel: de oplossing van een zout (bv. een sulfaat) zal ontleed worden door het sulfide van elk der daaropvolgende metalen. Het sulfide van het eerstvermelde metaal zal neergeslagen worden. Voorbeeld:

4FeS_2 (pyriet) + 7CuSO_4 + $4\text{H}_2\text{O}$ --> 7CuS (covellien) + 4FeSO_4 + $4\text{H}_2\text{SO}_4$. Het gevormde ijzersulfaat verdwijnt omlaag.

Ook zink en lood worden door koper verdrongen; zink- en loodzouten verdwijnen omlaag. Daarom bestaan er geen cementatiezones van lood, zink en ijzer. Daarentegen levert de cementatiezone voor koper vaak zeer massief en rijk erts op.

Als de grondwaterspiegel daalt, bv. door een droger klimaat of door verlaging van het bodemoppervlak door verwerking, komt de cementatiezone geheel of gedeeltelijk weer boven de grondwaterspiegel te liggen en is weer aan oxidatie onderhevig. De koper-sulfiden verdwijnen dan weer en laten koperoxiden achter, bv. cupriet (Cu_2O), of gedegen koper, en eventueel weer azuriet, malachiet en chrysokol.

Sedimentaire ertsen

Tot de exogeen gevormde ertsen behoren, behalve de verweringsafzettingen, ook de sedimentaire ertsen. (Afb. 2). Onder deze categorie vallen de Belgische zink/loodertsen waarvan de sedimentatie in kalksteen plaatsvond (Mississippi-Valley-type). Door de concentratie van het erts in nesten of zakken blijkt er verband te bestaan met door karst gevormde ertsformaties, die onder "chemisch-residuair" besproken zijn.

De afzetting van de Zn-, Pb- en Fe-sulfiden geschiedde vaak in concentrische banden, waardoor de zg. *schalenblende* ontstond. Tot de sedimentaire ijzerertsen behoort ook de *minette*, een ijzerrijk sediment met kenmerkende oölitische structuur: het gesteente bestaat uit kleine bolletjes.

Storthopenerts

Een soort ertsformatie die doorgaans in de opsommingen ontbreekt wordt gevormd door afzettingen, die niet door geologische, maar door menselijke kracht zijn teweeggebracht. Het zijn de op storthopen (dumps, halden) en anderszins gedeponeerde

gesteenten, die ten gevolge van mijnbouwactiviteiten in vroeger tijden zijn overgebleven.

Omdat bij de destijds bekende metallurgische processen vaak niet al het aanwezige metaal kon worden gewonnen - of bepaalde bestanddelen van het erts niet eens werden aangesproken - kwam op de dumps materiaal terecht, dat naderhand via betere verwerkingsprocessen nogmaals kon worden gebruikt. Zo werden o.a. in België Gallo-Romeinse ijzersintelhopen opnieuw geëxploiteerd en worden afvalbergen van vroegere goudwinning met grootschalige moderne methoden nogmaals winstgevend. Bij Lavrion, in Griekenland, zijn in recente tijden de antieke storthopen met succes nog eens omgekeerd.

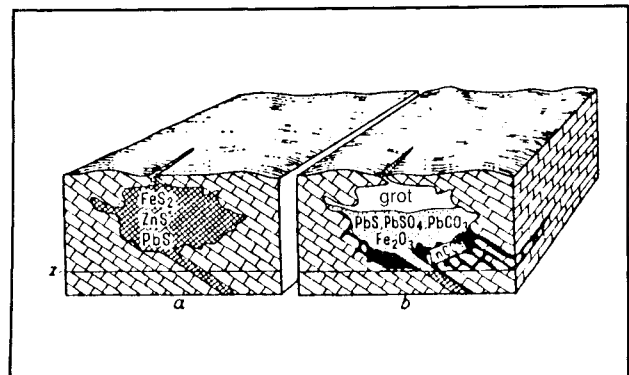
Mineralen op storthopen

Op de storthopen kan een heel gevarieerd gezelschap gesteenten en mineralen terecht komen: oppervlaktegesteente, nevengeesteente, ganggesteente zonder of arm aan mineralisaties; bij verwerkt erts ook nog slakken, restanten van installaties zoals bouwstenen en andere troep. Vooral wanneer het erts verwerkt werd met primitieve methoden zal niet alle nuttige inhoud eraan zijn onttrokken en zal relatief veel materiaal uit instabiele en gemakkelijk verweerbare en omzetbare verbindingen bestaan. Deze kunnen in de loop van eeuwen zijn overgegaan in andere verbindingen. Deze nieuwvormingen zijn voor een groot deel al bekend als "gewone" secundaire mineralen, maar er zijn ook nieuwvormingen gevonden, die juist door de bijzondere samenstelling van de dump tot ontwikkeling kwamen - en die dan ook alleen daar voorkomen, soms zelfs slechts in één ertsareaal. In dit verband kunnen ook de nieuwvormingen voor de kust bij Lavrion genoemd worden, waar bestanddelen uit in zee geworpen ertsslakken in de loop van ruim 2000 jaar met het chloor uit het zoute water hebben gereageerd.

Het heeft enige aanpassing aan de definitie voor mineralen gekost, om deze nieuwvormingen inderdaad daartoe te kunnen rekenen. Mineralen zijn immers *natuurlijke* bouwstoffen van de aarde. Wat de mens met het oorspronkelijke gesteente uitvoerde was niet natuurlijk, dus de producten, uit deze handelingen ontstaan, evenmin, aldus de rechtlijnige gedachte. Momenteel worden de "slakkenmineralen" wel officieel als mineraal erkend en door de International Mineralogical Association geaccepteerd, mits aan bepaalde voorwaarden wordt voldaan.

Als de nieuwvormingen op dumps inderdaad mineralen zijn dan ligt er een groot en interessant verzamelgebied voor de mineralenliefhebber open: de bestudering van slakkenmineralen. Aan deze groep zal in een van de bijdragen over de Harz veel aandacht zal worden besteed. In het artikel over Lavrion-mineralen zullen vooral geoxideerde mineralen belicht worden.

De heren E.A.J. Burke en M.A. Zakrzewski dank ik hartelijk voor hun behulpzaamheid bij het totstandkomen van dit artikel en zijn illustraties.



Afb. 4. Oxidatie van een zink-loodertsafzetting in kalksteen (karst). a. oorspronkelijke toestand; b. na oxidatie.