

ERTSEN

door Jan-Hessel Brons

Een ertsafzetting is een gesteente-afzetting, waaruit nuttige mineralen met winst te exploiteren zijn. Daar ligt de basis voor een belangrijke toepassing van de geologie, ingeklemd in een economisch keurslijf.

Dat delfstoffen een enorme betekenis hebben in onze maatschappij is voor een ieder duidelijk.

Wat behoort tot de ertsen? Metalen en metaalhoudende mineralen en enkele andere, zoals zwavel en fluoriet, noemen we erts. Er behoort niet toe: steen, klei, zout, olie e.a. We moeten wel bedenken, dat 'waarde' een relatief begrip is ten opzichte van deze tijd en dat vanuit het oogpunt van de natuur al die ganggesteenten, die nu op de storthopen van een mijn terecht komen en alle andere gesteentevormende mineralen even belangrijk zijn als het door de mens zo vurig gewenste koper- of zilvermineraal. In elk gesteente vindt men de meeste elementen terug en kijken we naar de metalen, dan zien we gemiddelde waarden van ppm's (parts per million). Het is niet mogelijk deze er op redelijke wijze uit te halen, zowel technisch als economisch niet. Alleen waar de natuur in volle gulheid een duizendvoudige aanrijking heeft gepleegd, liggen nu de mijnen. Het zoeken naar deze ideale plaatsen geschiedt door exploratie-geologen aan de hand van 'ervaringen' en wijze lessen van reeds bekende vindplaatsen.

Het is de bedoeling van dit artikel over ertsen om naast het belangrijkste uit de systematiek de nadruk te leggen op de paragenese, het samen voorkomen van mineralen, op enkele mogelijkheden van zonering en oxydatie (secundaire mineralen) in afzettingen.

Epigenetisch en syngenetisch

Een eerste groep van ertsen is epigenetisch ontstaan. Dat betekent, dat het erts op één of andere manier duidelijk later aan een gesteente is toegevoegd (dus later dan het gesteente ontstaan is). Een andere groep, waarbij erts **gelijktijdig** met het gesteente ontstaan is, heet syngenetisch. Van de epigenetische ertsen weten we, dat de metaalconcentraties als vloeibare of gasvormige massa door spleten in vast gesteente van hogere ouderdom gedrongen zijn en door niet altijd even duidelijke processen ergens zijn neergeslagen. Maar het resultaat is een voormalige spleet, die geheel of gedeeltelijk gevuld is met erts: een ertsader. De oorsprong van deze waterige oplossing ligt in een stollende magmahaard. Dit genetisch verband tussen stollingsgesteenten en erts werd o.a. onderkend, omdat nikkel, chroom en platina steeds gevonden werden in associatie met donkere, ultrabasische gesteenten zoals noriet (soort gabbro) en peridotiet (olivijngesteente). Tin daarentegen altijd met granieten, zoals in Cornwall (zuid-Engeland) en koper-spijkelertsen met porfiergesteenten. Van een magma dat in de aardkortst omhoogstijgt, blijft gedurende het stollen een steeds kleiner deel over: de restfractie. Het afkoelen gaat volgens twee wegen: de randen worden steeds dikker door het contact met het omringende koudere gesteente en gelijktijdig zinken kristalletjes, eerst van basische samenstelling (olivijn, pyroxenen, amfibolen en plagioklaas) naar beneden.

De omlaaggezakte kristallen vormen een dik pakket donkere gesteenten, die de basis uitmaken van de rest

van de stollingsgesteenten uit hetzelfde magma. Doordat de basische elementen (calcium, ijzer, titaan, magnesium, chroom e.a.) dus sterker verbruikt worden in dit eerste deel van de stolling, vindt er een differentiatie (scheiding) plaats. Dat houdt ook andere gesteentesoorten in. Want daarna ontstaan uit hetzelfde, nu zuurdere en relatief aan natrium, kalium en aluminium aangerijkte magma de zure stollingsgesteenten als graniet en syeniet. Daar-tussen ligt nog een overgangsfase met vorming van gesteenten met intermediaire samenstelling, zoals granodioriet en monzoniet.

Omdat warmte-uitwisseling een steeds dikkere korst van gestold gesteente tot gevolg heeft, is er voor de restsmelt steeds minder volume beschikbaar. In deze restsmelt bevinden zich die elementen, die weinig of niet in gesteenteminerale ingebouwd worden.

Dat zijn bijvoorbeeld zwavel, fluor, chloor, arseen en metalen als koper, lood, zink, en goud. Met de relatief sterk aangerijkte hoeveelheid water geeft dit een hoge druk in de restsmelt.

Wordt dit residu dan ook afgetapt doordat een spleet ontstaat, dan wordt de restsmelt als het ware door de gassen in de spleet gelanceerd.

Daar is de druk lager: 'wegvallen' van druk is reden tot kristalliseren. In de eerder gestolde korst, maar ook in het nevengeesteente, ontstaan daaruit de pegmatieten met kwarts, alkalielveldspaat, topaas, beryl en ertsen: molybdeniet vergezeld van hoge-T-oxyden als wolframiet en kassiteriet.

Van de volatielen (vluchtige bestanddelen) is daarbij wel het één en ander gebruikt of verbruikt, maar het meeste 'water' gaat met gassen en metalen verder omhoog door de ader. Er zijn verschillende factoren aan te wijzen die beiden tot neerslaan van erts: verlagen van de temperatuur en/of druk; reactie met nevengeesteente doet de chemische samenstelling van de ertsbrennende oplossingen veranderen. Het resultaat is dat achtereenvolgens verschillende groepen van ertsmineralen neerslaan. De vaste combinatie van een aantal ertsmineralen in zo'n groep is de **paragenese**.

De eerste erts-onderafdeling, die door omlaagzinken ontstaat uit een nog vloeibaar magma heet **liquidmagmatisch**, het zijn de chromiet-ilmeniet-ertsen met nikkel in basische gesteenten. Ook ertsen met gedegen platina uit de Oeral en magnetiet-apatiet-ertsen van Miruna (Noord-Zweden) behoren hiertoe. De tweede groep ertsen ontstaat als een aureool om het magma, doordat gassen of vloeistoffen vanuit het magma in het nevengeesteente binnendringen. Zo is de reactie van carbonaatgesteenten, kalk en mergels met deze gassen uit het magma de oorzaak van rijke, maar smalle randen van **skarnen**, bestaande uit magnetiet en hematiet, om de stollingsgesteenten. **Kontakt-metasomatische** afzettingen is de verzamelnaam. **Metasomatische** wijst op het binnendringen van de gassen uit het magma en **kontakt** op de nabijheid van de magmahaard.

Hydrothermale ertsen.

De mens heeft een subjectieve scheiding gemaakt binnen de hydrothermale ertsafzettingen (= uit een water-

ige oplossing ontstane ertsen).

Op basis van parageneses zijn dat van hoge naar lagere temperatuur : hypo-, meso-, epi-, telethermaal, Hoe verder van de bron betekent ook hoe dichter aan de aardoppervlakte; reactie met grondwater verduistert vaak de kom-af van erts.

Hypothermaal

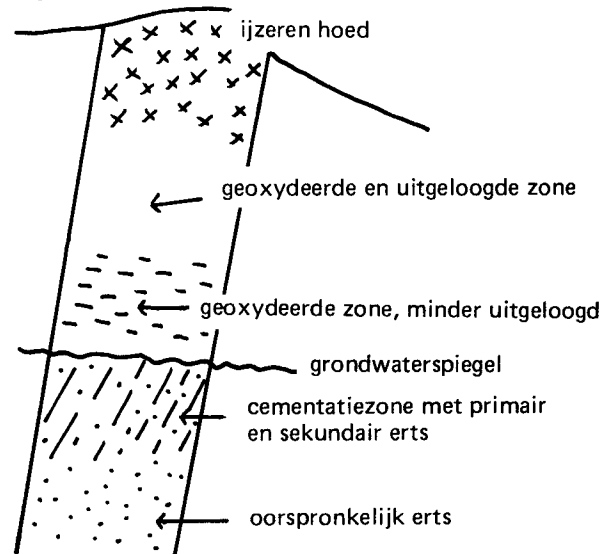
De diepste zone, die ontstaat bij hoogste druk en temperatuur, heet hypothermaal. Die is gekenmerkt door de metalen tin, wolfram, bismut en goud. Afzettingen komen voor op de "oude schilden" of in oudere gebergteketens waar erosie het bovenliggende verwijderde. In Cornwall komt een goede regionale zonerings van hypo- en mesothermale afzettingen voor: rond intrusies liggen zones van wolframiet/kassiteriet - kopererts - sfaleriet/galeniet - sideriet. (Zie ook Gea vol. 6 nr. 3).

Oxydatie en Cementatie

Het is noodzakelijk in de tijd vooruit te lopen. Hoe diep ook afgezet, normaliter komt elke afzetting door denudatie binnen het bereik van verwerking. Belangrijk in de verwerking is grondwater. Heel ander water dus dan het uit de diepte opgestegen water, dat de ertsen bracht. Dit hemelwater, met zuurstof "geladen", heet meteorisch en neemt in de bodem (de eerste meters van de aardkorst) nog humuszuren op. Het is dan wat reaktiever, kan wat meer dan zuiver zoet water. Ook stijgt de temperatuur naar dieper. Nu geldt in de Natuur steeds het streven naar evenwicht tussen met elkaar in contact staande fasen. De ene fase is hier grondwater, de andere de ertsafzetting. Eerst bekijken we de oxydatiezone, de bovenste zone. Die ligt boven de grondwaterspiegel : dus steeds vers doorsijpelend water. Zuurstof uit het water reageert met sulfiden tot sulfaten (fig.1). Van een sulfaat kan het metaal zowel als de sulfaat-groep apart als ionen in de oplossing gaan. Van pyriet is bekend, dat het tamelijk makkelijk oxydeert tot ijzersulfaat. De sulfaatgroep laat als het ware los van de ijzer en maakt het grondwater zuurder. Ondertussen is de ijzer "snel" een verbinding aangegaan met water en zuurstof om als limoniet achter te blijven : limoniet is onoplosbaar. Het ontstaat ook uit sideriet. Ook doet zich het geval voor, dat uit een sulfidische verbinding een onoplosbaar sulfaat ontstaat, loodsulfaat bijvoorbeeld. Dus heeft een afzetting van lood-zink-sulfide in de oxydatiezone wel loodsulfaat = anglesiet, maar geen zinksulfaat. Om dit beeld aan te vullen : is het nevengeesteente van de ader kalksteen, dan volgt reactie van sfaleriet met kalkhoudend water tot onoplosbaar zinkcarbonaat = smithsoniet. Onder dezelfde omstandigheden is loodcarbonaat = cerussiet aannemelijk. Want in kalksteen zal het grondwater wel nooit zuur genoeg worden voor loodsulfaat! Voor koper ongeveer hetzelfde : malachiet en azuriet zijn bekende carbonaten uit de oxydatiezone, foto 16. Ze ontstonden uit kopersulfiden. Wat achterblijft is ijzer. Pyriet, ijzersulfide, gaat via ijzersulfaat over tot het ijzeroxyde limoniet. Magnetiet reageert al of niet tot hematiet, maar gaat niet in oplossing. Met limoniet vormt hematiet de "ijzeren hoed", een belangrijke aanwijzing aan het aardoppervlak voor sulfidisch erts in de diepte.

Onder de grondwaterspiegel ligt de cementatie-zone. Daar worden de opgeloste afbraakprodukten van de oxydatiezone heengevoerd. De metalen komen in dit zure grondwater, dat ook nog stagneert, in contact met dezelfde sulfiden als waaruit ze hoger ontstaan zijn. Nu blijkt **verdringen** op te treden en wel volgens de reeks : Hg - Ag - Cu - Bi - Pb -

Figuur 1



Zn - Fe - Mn. Ieder voorgaand metaal is in staat een volgend metaal uit diens sulfide te verdringen.

Een voorbeeld. Chalkopyriet en pyriet zijn twee sulfiden in een ertsader. In de oxydatiezone reageren beide verschillend. Pyriet levert sulfaat-ionen en blijft als limoniet achter. Met dit sulfaat-ion als extra is het grondwater zuur genoeg om de koper uit chalkopyriet (CuFeS_2) op te lossen. Ook van dit mineraal is het restant limoniet. Het water stagneert in diepergelegen delen van de ader. Volgens de reeks kan koper het metaal ijzer uit diens sulfide verdringen. Dus wordt op de plaats van pyriet langzaam een kopersulfide afgezet : chalkosien (Cu_2S). Dit heet een sekundair of supergeen mineraal. Maar ook uit chalkopyriet kan de Fe verworden worden met als gevolg : $\text{CuFeS}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{S}_2$ (= CuS), dit heet covellien. De reeks is voor oplosbaarheid van rechts naar links te gebruiken.

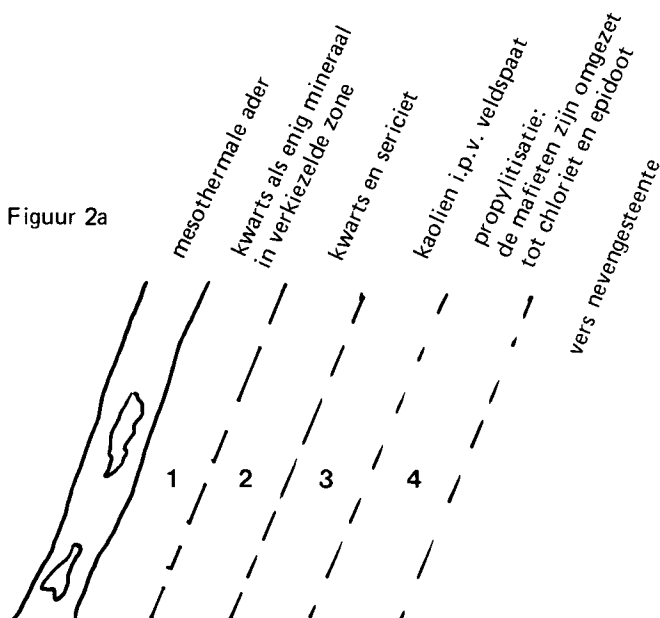
Mangaan en ijzer zijn het meest oplosbaar uit hun verbindingen en kwik het geringste. Oplossen van kopermineralen gaat beter als er al sulfaat (van een ander mineraal afkomstig) in de oplossing aanwezig is. Een andere conclusie : er zijn geen cementatiezones van lood of zink, ijzer of mangaan mogelijk; des te beter ontwikkeld, ten koste van andere sulfiden, zijn die van zilver en koper, foto 17. Cementatie kan een sekundaire aanrijking aan zilver of koper geven, die een primair te arme afzetting uit tilt boven het economisch minimum. Omdat in drogere klimaten sulfiden wel oxyderen, maar door gebrek aan water niet of slechts gedeeltelijk oplossen, kunnen ook de gehalten aan metalen in deze oxyden voldoende zijn voor rendabele exploitatie. Ook vanwege de eenvoudige verwerking. Na malen lost men ze op en slaat vervolgens de zuivere metalen elektrolytisch neer. Sulfidische ertsen moeten gemalen worden, dan gefloteerd (soort van sorteren van ertsdeeltjes en gesteentedeeltjes). Tenslotte moet het gesorteerde erts in een oven geroost worden. Dat is verhitten onder voldoende zuurstoftoevoer: de zwavel van de sulfiden ontwijkt dan als zwaveldampen en het metaal blijft in zuivere vorm achter.

Mesothermaal

Nu terug naar de hydrothermale afzettingen, naar het stadium volgende op hypothermaal. Dus afzettingen bij middelmatige temperatuur en diepte = druk. Mesothermaal (300-200°C) heet deze zone. Een moeilijkheid is dat deze zone niet gekenmerkt kan worden door één of meer mineralen, die niet in een andere zone voorkomen. Daarom is bij de indeling van een negatief criterium uitgegaan : het

ontbreken van bepaalde mineralen. Waar we granaat, topaas en toermalijn niet meer aantreffen ligt de grens tussen hypo- en mesothermaal. Waar zeolieten gevonden worden, zijn ze uit de mesothermale in de epithermale zone aangekomen.

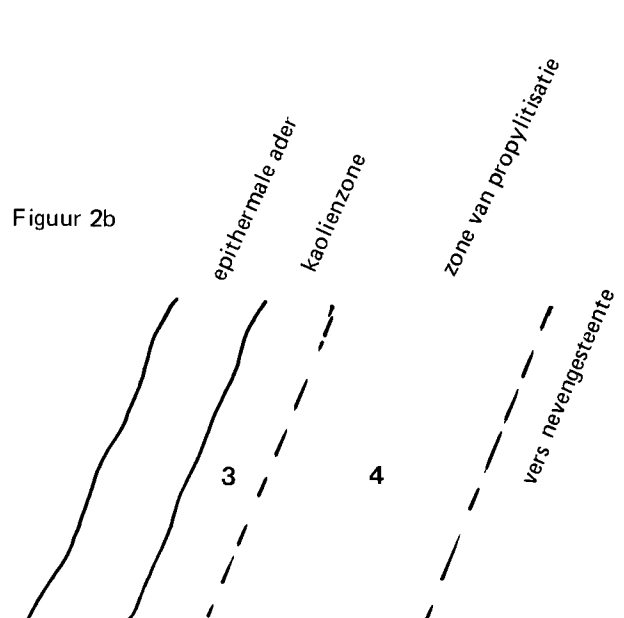
De belangrijkste producten zijn koper, lood, zink en zilver uit de ertsmineralen: chalkopyriet, enargiet, sfaleriet, galeniet en pyriet. Het nevgesteente is meestal sedimentair; natuurlijk is ook kristallijn nevgesteente mogelijk. Opvallend is de uitgebreide, intensieve omzetting van silikaatig nevgesteente rond een ader. De ertsbrengende oplossing kwam in contact met veel koeler nevgesteente. Het proces van streven naar chemisch evenwicht resulteerde in een aantal zones evenwijdig aan de spleet, de latere ader. Vanaf de ader : 1. een zone van verkiezeling, waarbij alle mineralen vervangen zijn door kwarts, 2. een zone met alleen kwarts en sericiet (muskoviet), 3. een zone waarin de veldspaten vervangen zijn door kleimineralen (kaolien), 4. een zone waarin alleen de donkere mineralen maar aangetast zijn en omgezet tot chloriet en epidoot (propylitisatie). Zie fig. 2a. "Bleken" heet dit proces. Het is kontinu verlopen vanaf de spleet. Door buitenwaardse groei van de zone met kaolien wordt de chloriet/epidootzone nog verder opgedreven. Aan de binnenzijde wordt de kaolienzone verdrongen door de sericietzone, die weer voortgedreven wordt door de opdringende kwartszone. Laaggebonden ertsmassa's, manto's, zijn in de plaats gekomen van kalksteen. In een opeenvolging van sedimentair afgezette lagen wordt een opstijgende oplossing tegengehouden door schalielagen. Die zijn namelijk weinig door-dringbaar. Stagneert de zure oplossing in een onderliggende kalksteen of dolomietlaag, dan volgt oplossen. De oplossing neutraliseert door de carbonaten en zoals gezegd is veranderen van chemisch milieu, hier van zuur naar neutraal, een reden voor neerslaan van erts. In de open ruimte kunnen massieve lichamen van sulfidische ertsen als borniet, chalkopyriet, sfaleriet en galeniet gevormd worden. Na hydrothermale omzetting zijn ertsmassa's met 90 pct. sulfidische ertsen op de plaats van silikaatgesteenten neergeslagen. Van ongehoorde afmetingen zijn de pyrietlichamen bij Rio Tinto in Spanje. Het zijn des werelds grootste pyrietafzettingen en daarmee één van de belangrijkste koperproducenten van Europa : er zit namelijk 2 pct Cu in de pyriet naast nog wat Au en Ag.



In tabel 1 werd tetraëdriet genoemd, één der mineralen uit de groep van vaalertsen. Binnatal of Binnenthal is bekend vanwege impregnaties van vaalertsmineralen in dolomiet. Schwaz in Tirol is een bekende zilvermijn, eeuwenlang één van de rijkste afzettingen van Europa door het zilveragehalte van de vaalertsen. De grote rijkdom van de Fugger-familie uit Augsburg steunde op het mijnen van deze ertsen.

Tsumeb ligt in het Otavi-gebergte in Zuidwest-Afrika en is beroemd vanwege de prachtige en zeldzame mineralen uit de oxydatiezone. In een steile flank van een plooi in dolomiet drong een pijp van pseudo-apliet als intrusie in. De mineralisatie door primair erts volgde op deze intrusie en vond plaats langs het contact van apliet met dolomiet. De ertsbrengende oplossing verdrong plaatselijk de breccieuze dolomiet, zo plaatsmakend voor tamelijk massieve ertslichamen. Die bestaan uit mesothermale ertsen : chalkopyriet, enargiet, vaalertsen, galeniet, cadmiumrijke (triboluminescente) sfaleriet, foto 18. Als ganggesteenten zijn aanwezig: kwarts, dolomiet, calciet. Het germaniumrijke mineraal germaniet werd hier voor het eerst aangetroffen.

Cu-ertsen in kalksteen (inclusief dolomiet) hebben vaak rijke oxydatie- en cementatiezones. In Tsumeb komen 80 mineralen van koper, lood, zink, vanadium en arseen voor in de oxydatiezone : descloisiet (loodvanadaat), aurichalciet (zink-koper-hydroxycarbonaat), adamiet (zinkarsenaat), tenoriet en cupriet (koperoxyden). "Porphyry coppers" oftewel koperspikkelerts-afzettingen komen voor in de bovenste uitstulpingen van grote batholieten in o.a. Chili, Peru en het zuidwesten van de V.S. De afzettingen schijnen genetisch gebonden te zijn aan subduktiezones : in de theorie van continentverschuivingen en plaattektoniek de plaats waar een plaat met oceanische korst onder een plaat met continent erop duikt. Op deze daalzone treedt partiële opsmelting op van het oceanische sediment en korst. Deze smelt dringt via zwakkezones door de korst naar dicht onder het aardoppervlak. De uitstulpingen zijn tektonisch gekraakt. In een vroeg stadium is het porfierisch stollingsgesteente uit de magma gebleekt tot gesteenten van kwarts/sericiet/klei. Daarna vond pas de eigenlijke mineralisatie plaats. In het meer permeabele doorlaatbare gesteente treft men impregnaties aan van pyriet-



chalkopyriet-borniet en soms een beetje molybdeniet of sfaleriet. Er zijn overgangen naar meer hypothermale afzettingen. Het kenmerk daarvan is het veel hogere molybdenietgehalte onder de sulfiden. De plaatvorm met grote horizontale en relatief geringe diepte-uitbreiding wordt bedekt door een tientallen meters dikke ertsloze laag van kaoliengesteente. De zeer arme (0,5pct) Cu-ertsen zijn eerst na sekundaire aanrijking in de cementatie-zone winbaar geworden.

In de **Chuquicamata**-mijn in Noord-Chili vond het volgende plaats na mineralisatie en enige erosie. In het Tertiair heerste er een regenrijk klimaat. Er ontstond een oxydatiezone, waaruit de Cu opgelost werd en naar beneden afgevoerd. Onder de grondwaterspiegel sloeg koper neer als chalkosien op de plaats van pyriet en als randen van covellien om chalkopyriet en borniet. Dat werd de eerste cementatiezone. Maar vrij plotseling deden zich twee ingrijpende processen voor. Het gebied werd opgeheven en het klimaat werd regenloos. Het gezamenlijke gevolg was drastisch dalen van de grondwaterspiegel. De eerste cementatiezone kwam zodoende ver boven de grondwaterspiegel te liggen. Oxydatie in deze koperrijke zone deed prachtige mineralen ontstaan, die voor ons bewaard zijn gebleven door de geringe regenval. Want het zijn chloriden en sulfaten, die alleen in een dergelijk extreem woenstijnklimaat kunnen ontstaan en blijven bestaan. Atacamiet (koperchloride), chalcantiet en antleriet (kopersulfaten) marshiet (koperjodide) zijn slechts enkele. Uit de chemische formules valt op te maken, dat elementen uit de groep der halogenen een rol speelden in de vorming. De enige mogelijkheid daarvoor op die plaats, honderd km van de kust en 3000 meter hoog, is te veronderstellen dat de wind in staat is spatwater als uiterst kleine druppeltjes mee te voeren. Bij het sterk dalen van de temperatuur des nachts slaat dauw neer wat bij de eerste zonnestralen weer verdampt. Zo zullen de genoemde mineralen moeten ontstaan : door oxydatie uit primaire en sekundaire (=supergene) sulfiden en reactie met halogenen en heel weinig dauwwater.

Lood en zinkertsen treden in het algemeen met elkaar geassocieerd in dezelfde afzettingen op. Lood en zink komen evenals koper in de vorm van sulfiden in hydrothermale aders als spleetopvulling en als vervanging van kalkstenen voor. Cu-ertsen zijn echter voornamelijk hypotot mesothermaal. Daarentegen zijn sfaleriet/galeniet meer meso- tot epithermaal van karakter. Ze komen uitsluitend verbonden met zuurdere plutonieten en subvulkanische magma's voor. Naast galeniet en sfaleriet vindt men pyriet, chalkopyriet en soms vaalertsen. Omdat galeniet bij een iets lagere temperatuur gevormd is dan sfaleriet, wordt een ader van deze twee ertsen naar beneden zinkrijker. Ook is het zilveragehalte het hoogste in afzettingen op de grens met hypothermaal. Zelfs aparte zilvermineralen komen dan naast vaalertsen voor. De bij lagere T gevormde aders hebben meer galeniet met minder zilver erin. Ganggesteenten zijn kwarts, calciet, sideriet, bariet, fluoriet.

Zoals gezegd kan in een oxydatiezone anglesiet ($PbSO_4$) aangetroffen worden. In afzettingen in kalksteen (of veel calciet als ganggesteente) cerussiet $PbCO_3$ met smithsoniet $ZnCO_3$.

Epithermaal

In minder grote hoeveelheden komen ook lood- en zinkafzettingen voor in epithermale aders. De overgang naar **epithermaal** (ook de naam leptothermaal wordt gebruikt) is dus niet scherp en hangt meer samen met structurele kenmerken van de geringe diepte. Breuken en breukbreccies komen eigenlijk hier pas goed ontwikkeld voor. Het gesteente is door breuken permeabeler geworden. Erts zet zich bij voorkeur af in deze open ruimtes : de druk is daar laag ! Verder is er verbinding met de aardoppervlakte, te zien aan hete bronnen. Want het was al wel duide-

lijk dat ertsafzetting en vulkanisme gebeurtenissen met dezelfde bron en oorzaak zijn ! Au en Ag komen voor in gangen met andesiet en daciet. Omdat erosie deze ondiepe afzettingen al opgeruimd heeft vóór het intrusieflichaam, waaruit de ertsoplossingen zijn voortgekomen, aangesneden wordt, is soms het verband moeilijk te leggen. Ook komen andere hypothesen van ontstaan sterk naar voren. Op deze diepte kan ingesloten poriewater van sedimenten ook metalen oplossen. Want dat water is zout en opgewarmd. Komt dit door migratie op een plaats van veranderende omstandigheden of waar het niet verder omhoog kan, dan kan het erts als sulfiden neerslaan. De processen zijn bekend uit de leer van aardolie-migratie en kunnen daar heel goed mee vergeleken worden. Voor de Mississippi Valley-ertsen wordt dit ontstaansmechanisme aangevoerd, omdat geen intrusieflichaam van voldoende grootte en ongeveer dezelfde ouderdom in de redelijke nabijheid van de uitgestrekte afzettingen in Kansas en buurstaten te vinden is. Telethermaal noemde men vroeger dergelijke afzettingen zonder zichtbare magmatische bron, die er toch wel moest zijn.

Ook hier liggen rond de ader uitgestrekte omzettingszones. Het temperatuursverschil was toch nog aanzienlijk, maar alleen mineralen kenmerkend voor lagere temperaturen konden ontstaan. **Propylitisatie** heet het proces waarbij chloriet/epidoot/sericiet/albiet ontstaat. Dit was ook de buitenste zone bij omzettingen rond mesothermale aders. Het gaf daar de laagste T aan. De zone van iets hogere temperatuur (kaolienzone) komt soms als smalle rand dicht tegen de epithermale ader voor. Fig. 2b. Gangmineralen zijn kwarts, soms als amethyst, rhodochrosiet, bariet, fluoriet en chaledoon. Zeolieten geven per definitie het onderscheid tussen mesothermaal en epithermaal. Nogmaals zij benadrukt, dat alleen geologisch jonge gebieden of jong vulkanisme in oudere gebieden epithermale afzettingen kunnen geven : erosie heeft oudere epithermale gebieden allang opgeruimd.

Siderietaders komen in Cornwall voor in de ertszone, die het verst van de intrusieve graniet verwijderd is. In Siegerland volgen siderietaders met 10pct mangaancarbonaat de diaklaasrichtingen in zandige sedimenten uit het Devoon. Al gedurende tweeduizend jaar pleegt men hier te mijnen. Het is nu nog Duitslands grootste reserve aan mangaan en het derde ijzermijnen-district. Een ander soort ontstaat door metasomatose (omzetting door stoftoevoer). IJzer uit hydrothermale oplossingen reageert met carbonaatgesteenten tot sideriet, foto 19. ($CaCO_3$ plus Fe \rightarrow $FeCO_3$ plus Ca). Dit gaat het beste in permeabele, poreuze lagen. De ertshorizonten liggen tussen schalie en zandsteen op de plaats van kalksteen. In Bilbao (Spanje) ligt een zo ontstane siderietafzetting nu boven de grondwaterspiegel. Door oxydatie is hier limoniet te mijnen. Voor de hoogovens van levensbelang. Goud en zilver maakten het westen van de V.S. in de vorige eeuwen aantrekkelijk. Vulkanisme was het mechanisme waardoor de felbegeerde metalen afgezet werden. In de geologisch jonge gebieden vond men "bonanza" — rijke ertsgangen; het woord leeft nog voort. Mother Lode in Californië is een 200 km lang adersstelsel, dat tot 1,5 km diepte wordt uitgegraven. Het zijn goudtelluriden met zilversulfiden en -seleniden. Andere bekende namen: Cripple Creek, Tonopah, El Oro. In hypothermale aders kwam gedegen goud voor met veel kwarts en weinig pyriet.

Van antimoniet of stibniet liggen 's werelds grootste reserves in China, in de provincie Hunan. Het is genetisch verbonden met intrusies in oudere sedimenten. Als het nevengeesteente zandsteen is, wordt een spleet opgevuld gevonden met kwarts/stibniet. In kalksteen daarentegen treft men stibniet aan met galeniet en arsenopyriet.

Kwarts is dus het enige gangmineraal. In enkele aders komt nog het erts cinnaber voor in de bovenste delen. Men doet (nog) geen moeite dieper te mijnen dan honderd meter, dus een eventuele zonerings, een overgang naar mesothermaal erts, is nog niet gevonden.

Kwik komt als druppeltjes kwikzilver of als het sulfide cinnaber voor met pyriet. Sekundair kan calomel (HgCl₂) ontstaan. De relatie in tijd en plaats tussen fumarolen, porfierische gangen en zuur vulkanisme in Californië en het Adriatisch gebied is opvallend. Voor Almadén (Spanje) en Idria in Joegoslavië is dit verband niet aan te wijzen. Op eerstgenoemde plaats drongen Tertiaire gangen van porfier of diabaas in en door veel oudere sedimenten. Cinnaber vervangt kwartsiet en gaat vergezeld van zeolieten. De Romeinen mijnden al ten zuiden van Madrid voor verfpigment de rode massieve klompen cinnaber, de Moren "stookten" er duizend jaar later kwikzilver uit. Omdat het erts met 6ppt Hg tweemaal zo rijk is als de naaste concurrent, is de kwikmijn een "goudmijn" voor de Spaanse regering. Sekundaire aanrijking van zilverhoudende ertsen levert in Mexico de paragenese gedegen zilver/zilverchloriden en -bromiden/acanthiet (Ag₂S). De afzetting staat in verband met vulkanisme. Tevens zijn uitgestrekte omzettingen aanwezig.

Telethermaal

Soms zijn de oplossingen zover van de bron gemigreerd, dat ze het grootste deel van hun warmte verloren hebben en nauwelijks meer in staat zijn het nevengeesteente in chemisch opzicht te beïnvloeden. Dit eindstadium van hydrothermale werking heet telethermaal. Magmatische activiteit in de nabije omgeving van in de tijd wordt lang niet altijd aangetroffen. Er is zeer zeker een grote bijdrage van kouder meteorisch water of ingesloten poriewater (connaat water). Omdat druk en temperatuur laag zijn, zullen mineralen uit dergelijke oplossingen ongeveer dezelfde zijn als mineralen, ontstaan door oxydatie van een hydrothermale ader als gevolg van indringen van meteorisch water. De mineralogie geeft dan ook geen uitsluitel om te kiezen tussen deze twee processen. Markasiet komt voor naast sfaleriet (honingblende; ijzerarm) en galeniet (zilvervrij). Ook gedegen koper en oxyden van uranium, vanadium en koper (carnotiet, autuniet, torbernieet, tenoriet, cupriet) komen voor. Met als gangmineralen : bariet, fluoriet, chalcedoon en opaal, foto 20.

Van de afzettingen is het Mississippi Valley-type reeds genoemd. Misschien afgezet door circulerend connaat water, misschien door hydrothermale oplossingen, die ver van de bron verwijderd waren. Misschien door een samenspel van deze twee : de connate oplossingen gingen migreren, nadat een geringere hoeveelheid magmatisch water er een extra portie warmte aan afstond. Het wordt dan een mengsel van de twee genoemde oplossingen met de kleinste bijdrage van de laatstgenoemde. Hetzelfde voor uranium-vanadium-ertsen van het Colorado Plateau, geïmpregneerd in Jura-zandstenen. Er is een syngenetische theorie : zandstenen bevatten hier dunne koollagen en plantenresten. Ze zijn in ondiepe bekkens op het continent in een warm en droog klimaat afgezet. Het weinige oppervlaktewater bracht U- en V-sulfaten mee, die door reducerende reactie met de plantenresten neersloegen. Door de volgende zandlaag afgesloten. Inderdaad is een duidelijke concentratie rond de plantenresten in oude stroombeddingen te vinden. De andere theorie maakt gebruik van dezelfde veldgegevens. Door remobilisatie van diepergelegen en veel eerder ontstane pekblendegangen werden de metalen naar de jongere zandstenen gebracht. Dit opstijgende water volgde de meest permeabele structuren in de zandstenen, nml. de begraven oude rivierbeddingen. De aanwezige kool en planten vertolken de rol van reducerend object om de metalen uit de oplossing neer te slaan. Hier-

in is het erts dus epigenetisch, later aan het huidige gesteente toegevoegd. Dat het erts al in aders aanwezig was vóór de zandsteen werd afgezet, speelt geen rol. Het proces heet sekundair-hydrothermaal. Ook in de Alpen kan dit proces gespeeld hebben : Hercynische ertsafzettingen worden door metamorfose geremobiliseerd. Uit die oplossingen (opstijgend!) kunnen weer meso-epi-telethermale afzettingen ontstaan in het Alpiene stadium. Belangrijk hierbij is dat er geen echte magmatische bron voor nodig is.

Metamorf

Omdat ertsafzettingen aan metamorfose blootgesteld kunnen worden, is er nog de groep van **metamorfe ertsafzettingen**. De oorspronkelijke aard van de afzetting is zelden of nooit te achterhalen, maar er is geen reden aan te nemen, dat die in vroegere (Precambrische) tijden anders was dan van de nu te bestuderen afzettingen. In de Alpiene gebieden liggen enkele voorbeelden.

Syngenetisch

De laatste hier te bespreken groepen zijn gelijktijdig met sediment afgezet en liggen nu hoog en droog op het land. Allereerst de **exhalatief-sedimentaire** afzettingen. Uit vulkanen en in gebieden met actief vulkanisme ontwijken gassen uit de diepte. Deze gassen kunnen ook submariën (onder water) optreden. Fumarolen van de Vesuvius en andere vulkanen over de gehele wereld hebben in de spleten waardoor de gassen ontwijken, afzettingen van hematiet, magnetiet en zwavel. IJzer was dus zeker een bestanddeel van de gassen. Volgens Duitse geologen zijn de hematiet-voorkomens van het Lahn-Dill-distrikt het gevolg van vulkanisme in het Devoon. Submariene extrusie van een aan volatielen rijke lava mengde zich met het kalkslib-sediment op de zeebodem. De daaruit ontstane vulkanische gesteenten hebben dan ook een relatief hoog carbonaatgehalte: weilburgiet. De gasvormige exhalatie-producten reageerden met zeewater. Er werd hematiet en kwarts gevormd. Door uitvlokken sloegen de mineralen neer. Dus kiezelig hematieterts kan er nu gemijnd worden. De lichamen liggen op tuffen of lava en worden bedekt door kwartsgesteenten : SiO₂ bleef voor een deel langer in oplossing of bleef "zweven". Precambrische ijzerkwartsieten zouden ook te verklaren zijn door submariën gasontwikken en neerslaan. Er ontbreekt elk spoor dat op erosie (kontinentaal sediment zoals zandsteen) wijst. Want er zijn ook ijzerertsen ontstaan door submariene sedimentatie. Een geheel ander proces dus. Van de submariene-exhalatieve afzettingen moeten nog de economisch belangrijke zwavelafzettingen in Chili, Japan en Indonesië genoemd worden. En niet te vergeten de hematiet en pyriet van Elba!

Sedimentair

De laatste groep is dus de **sedimentaire groep**. Van de marien-sedimentaire gesteenten zijn interessant : de Kupferschiefer en oölietische ertsen. In het Zechstein (Perm) werden in een maximaal halve meter dikke (dunne) laag over een erg grote oppervlakte zwarte leien met fijnverdeelde ertskorrels afgezet in een afgesloten zeebekken met geringe zuurstoftoevoer. In de ondiepere delen langs de randen van het bekken werd meer zink afgezet als sulfide, terwijl in de diepere delen koper overheerst met borniet, pyriet, chalkosien, sfaleriet en galeniet. Organisch materiaal speelde een rol bij het neerslaan van de metalen, die in oplossing van het vasteland naar zee werden gevoerd.

Mansfeld (Harz) is één van de vindplaatsen.

Door intensieve verwerking op het vasteland en kontinu transport van opgeloste ijzerverbindingen naar zee was het mogelijk dat ijzer ging uitvlokken. In bewegend zee-

ALPENERTS

ENKELE VINDPLAATSEN IN DE FRANSE ALPEN

door P. Stemvers

Zo oostelijk als mogelijk was doortrokken wij in de zomer van 1972 de Franse Alpen, met de bedoeling, wandelingen door de ruige natuur boven de 2000 m te maken. Enkele van onze tochten voerden naar petrologisch of mineralogisch interessante oorden, die bovendien alle in een bijzonder imponerende omgeving gelegen waren. Als literatuur gebruikten we: *Alpes, Savoie et Dauphiné* door J. Debelmas, uitg. Masson et Cie, 120 Boulevard St. Germain, Paris VI^e, 1970. Als kaarten de uitgaven van het Institut Géographique National. Deze kaarten houden het midden tussen wandelkaarten van de Alpen en de Michelinkaarten. De schaal is 1 : 100.000.

Loodzilverbij in Tarentaise

Omgeving Bourg-St-Maurice, kaart 53, Grenoble-Mont Blanc van I.G.N., kaart 74 Michelin.

Vanaf Albertville de N 90 volgen naar Bourg-St-Maurice. Het aanvankelijk smerige geïndustrialiseerde dal van de Isère wordt verderop voor toeristen aantrekkelijk. Ongeveer 8 km voor Bourg-St-Maurice, ofwel 1 1/2 km na het passeren van Bellentre slaan we rechtsaf de weg in naar Landry. Hier recht door rijden naar Peisey-Nancroix. Direct buiten Landry is een vrij kamp bij de turbine, dat aantrekkelijker is dan het doorgangskamp bij Bourg-St-Maurice. Maar ook boven, bij Peisey-N. kunt u kamperen.

Na het passeren van Nancroix voert de weg over de beek le Ponturin, direct hierna is er rechts een oprijlaan met

bomen aan weerszijden. Links van de oprit een oriëntatiebord voor het Parc National de la Vanoise, rechts een kampeerplaats. De oprijlaan volgen tot de helling steil wordt en zich splitst in rechts en links. Hier laten we de auto achter. Rechts van de oprijlaan staat een groot huis: een mijnmuseum, gesticht door Franse mijnbouwkundige ingenieurs "uit bewondering voor hun collega's van weleer".

Ook in de tijd van Napoleon werd hier al gemijnd. Toen wij er waren was het gebouw gesloten. Bij het genoemde kruispunt vindt u overal om u heen gaten in de hellingen en kunstmatige, begroeide heuveltjes. Deze laatste bestaan vaak uit brokken prachtig zwartglimmend gesteente - slakken van het ertsverwerkende bedrijf dat hier gestaan heeft. Hoeveel leken zullen dit materiaal voor obsidiaan verslijten?

Het loodzilverbij dat hier gevonden werd, en waarvan men de exploitatie wellicht opnieuw ter hand zal nemen, bevat galeniet met een zeker percentage zilver. Wij namen aan dat het erts samen met kwarts is uitgekristalliseerd en zochten naar kwartsrijke stukken. Sloegen we deze door, dan was het zilverbijachtig glimmende erts vaak aanwezig als kleine kristallen. Ook hoger op de helling zijn oude mijningangen en ook nieuwe exploratiepunten te vinden. Oppassen is wel geboden, wilt u niet plotseling in de diepte verdwijnen.

Kopermijn in Queyras

Omgeving Château Queyras, kaart 54, Grenoble-Gap van I.G.N., kaart 77 Michelin.

Château Queyras is te vinden aan het zuidelijke begin van de Col d'Izoard (route N202), die uiteindelijk bij Briançon, 34 km noordwestelijk, uitkomt.

Gemakkelijker toegankelijk is de plaats vanaf de N94 tussen Briançon en Embrun langs de Durance. Via Guillestre gaat het langs de N202 noordoostwaarts. 2 km voor Château Queyras wordt het de N547. Deze weg blijven volgen tot Ville Vieille, dan rechtsaf (D5) naar St. Vêran. U hebt dan heel wat geklommen, want St. Vêran is het hoogst gelegen dorp van Europa (2040 m). De weg blijft redelijk berijdbaar. Bijna 6 km voorbij het plaatsje ligt links op de helling puin uit de kopermijn. Een wrakke trap leidt enkele tientallen meters omhoog naar de mijn. Deze was in 1972 gesloten, in afwachting van betere koperprijzen. Want uitgeput is de mijn zeker niet en onrendabel evenmin. Men beweerde, dat hier kopererts met het hoogste percentage van Frankrijk voorkomt. Het koper is aanwezig in de vorm van borniet. Het mineraal komt bruin-glanzend uit de diepte en krijgt, aan de lucht blootgesteld, snel een mooie, helblauwe kleur. Ook boven, ter hoogte van de mijningang, liggen er stortplaatsen, waar met enig zoeken stukjes borniet (vaak met een verweringslaagje van malachiet) gevonden kan worden. Ook gedegen koper, eveneens met malachiet, ligt hier en daar. Verder vonden we arsenopyriet en grote brokken glaukofaan, de naaldvormige blauwe ambibool, waartussen soms borniet. Het is mogelijk, dat glaukofaan gesteentevormend in de mijn voorkomt. Langvezelige serpentijn is ook op de stortplaatsen te vinden. Bij mooi weer levert een bezoek aan deze vindplaats een prachtige tocht op. (Foto 20).

Bij Château Queyras kan worden gekampeerd.

(vervolg van pagina 45)

water op enige afstand (50 km) van de kust in relatief zuurstofrijk water zetten zich om kleine kernen (organische partikels van kalk of kwartskorreltjes) limoniet of hematiet af, waardoor oölieten ontstonden. Bekende oölieten liggen in Lotharingen en Luxemburg; het zijn de Minette-ijzerertsen uit het Dogger-tijdperk. Over de gehele wereld komen oölieten in gordels voor binnen bepaalde geologische tijdperken. Dit suggereert een verband tussen oölietvorming, klimaatzones en periodes van grote mariene transgressies.

Chemisch geconcentreerde ertsafzettingen in of door oppervlaktewater.

Daar behoren de residuaire bodems toe. Bauxiet, lateriet en garnieriet bij voorbeeld. Dat zijn ertsen voor respectievelijk aluminium, ijzer en nikkel. Supergene aanrijking in de cementatie-zone valt hier onder. We zijn vooruitgelopen door het tussen de hydrothermale afzettingen te bespreken. De reden is de grote invloed op deze aders en omdat het de vindplaatsen zijn van de kleurrijkste kristalgroepjes en zeldzaamste mineralen.

Mechanisch geconcentreerde afzettingen, "placers", van zware en harde (chemisch moeilijk aantastbare) mineralen, meestal oxyden of gedegen metalen (goud, platina) zijn ontstaan na verwerking van één der genoemde ertsafzettingen. Hypothermaal is kassiteriet, dat nu in oude rivierbeddingen in Indonesië gevonden wordt. Hetzelfde geldt voor goudzanden. In menige "Western" uitgewassen en tot spannende avonturen aanleiding gevend; het goud is door alle tijden begerenswaard gebleven!