

Mineralen

Argentiet: In lamellaire en vormloze zwart-grijze massa's. Ook kubische en octaëdrische kristallen komen voor. Kleurenfoto F.

Breithauptiet: Een nikkel-antimoonmineraal. Komt zelden voor als bronskleurige spitse bipiramidale kristallen.

Galeniet: Zeer gangbaar en veelal sterk zilverhoudend. Meestal in de calciet.

Gedegen zilver: In plaatjes en dendritische aggregaatjes. Vaak vormen de kristalletjes mooie micromounts.

Sfaleriet: Dit mineraal komt veel voor. Soms in prachtige kristallen met een diepbruine kleur.

Ullmanniet: Een nikkelmineraal, dat meestal samen voorkomt met galeniet en breithauptiet. Het vormt grijze, metallische kubussen met een horizontale streping op de vlakken.

ENKELE ANDERE VINDPLAATSEN

Su Elzu

Willemiet in fraaie, hexagonale kristalletjes zijn te vinden in Su Elzu, nabij Ozieri in het noorden van het eiland. Men kan deze vindplaats bereiken door vanaf Ozieri in oostelijke richting de SS128bis te nemen. Na ongeveer 2 km ziet men aan zijn linkerhand de betrekkelijk kleine storthoop op enige afstand van de weg liggen. Bij een kapel, op ca 200 m van de storthoop, kan men parkeren. Verder kan men hier onder meer hemimorfiet, serpieriet en vanadinit vinden.

Arenas

Vanaf de parkeerplaats bij Sa Duchessa (zie hiervoor) volgt men de onverharde weg in noordelijke richting tot men bij een groot mijngebied komt, met talloze grote en kleinere afvalhopen. Op enkele plaatsen zijn hier prachtige micro's te vinden met angle-siet-, hemimorfiet-, bariet- en fluorietkristallen. Soms treft men alle vier mineralen in hetzelfde stuk erts aan.

Verblijfsmogelijkheden

Verblijfsmogelijkheden zijn er vooral in de periode half juni tot half september volop in Sardinië. In augustus, de vacantiemaand bij

uitstek voor de Italianen, moet men echter wel tijdig boeken. Maar ook buiten het toeristenseizoen zijn er overal betaalbare hotels en pensions te vinden. Campings zijn echter uitsluitend in juli en augustus geopend; alleen in het noorden soms een paar weken eerder en later. In de vacantiemaanden zijn er ook veel vakantiehuurhuizen te huur. Een handig boekje over huisvesting is de 'Sardegna Annuario Hotels & Campings' van de Sardijnse VVV. Een deel van ons groepje heeft - tot volle tevredenheid - enkele keren op een boerderij verbleven (*Agroturismo*). Verspreid over het eiland kan men op enkele tientallen boerderijen terecht. Men zit meestal samen met het boerengezin aan tafel, wat de mogelijkheid biedt tot meer dan vluchtige contacten met de plaatselijke bevolking. Een probleem daarbij is overigens wel dat men zelden Engels, Frans of Duits spreekt, zodat men is aangewezen op handen, voeten en het woordenboek. Dat maakt het echter niet minder leuk. De maaltijden zijn uitgebreid, met soms wel zeven gangen, waaronder plaatselijke gerechten. Al met al de moeite meer dan waard.

LITERATUUR

Brizzi, G., Scanu, S., Stara, P. & Tanca, G., 1992. I minerali del giacimento di Monte Tamara. Riv. Miner. Ital. 15: 167-180 en 237-248.

Brizzi, G., Olmi, F. & Sabelli, C., 1994. Gli arsenati di Pira Inferida, Gonnosfanadiga (CA). Riv. Miner. Ital. 17: 193-206.

Manca, A., Manca, R. & Manca, L., 1995. La Miniera di Masaloni (Sarrabus, Sardegna). Riv. Miner. Ital. 18 : 291- 297

Olmi, F., Sabelli, C., Santucci, A. & Brizzi, G., 1995. Minerali rari in Sardegna. Riv. Miner. Ital. 18: 9-41.

Olmi, F., Sabelli, C., Santucci, A. & Brizzi, G., 1995. I silicati e I vanadati di Ozieri (SS). Riv. Miner. Ital. 18: 145-160.

Stara, P., Astolfi, M. & Pani, F., 1991. Nuovi ritrovamenti nella miniera di Baccu Locci. Riv. Miner. Ital. 14 : 1-15.

Stara, P., Rizzo, R. & Tanca, G.A., 1996. Iglesias e Arburese, Miniere e Minerali, Vol. I & 2. EMSa- Ente Minerario Sardo, Cagliari.

Von Borsig, T.A., Lilliu, G. en Fischer, D., 1977: Sardinien; Hirmer Verlag, München.

Themanummer Sardinien - mineralreiche Insel, div. auteurs, Lapis, jg. 7, nr. 11 (nov. 1982).

Meteorieten: stenen met raadsels

door Dr. J. van Diggelen

Jaren geleden was de ondertitel van dit verhaal ook de titel van een lezing, die ik voor heel wat van onze Kringen heb gehouden. Zo'n titel spreekt aan, maar zegt weinig. Velen van ons hebben in hun verzameling stenen waar zij geen raad mee weten. Het zijn inderdaad stenen met raadsels voor hen. Over deze stenen gaat dit verhaal niet. Er is echter ook voor de vakmensen een grote groep stenen, die vol zitten met raadsels. Sommige stenen daarvan hebben in de afgelopen decennia ons enkele zeer boeiende geheimen onthuld over hun levensloop. Enkele daarvan hebben tot in de pers kortgeleden opschudding verwekt, zodat zelfs de president van Amerika er zijn woordje over sprak. Op iedere beurs kunt u bijna altijd wel één (en soms meer dan één) handelaar aantreffen, die ze

aanbiedt. Het zijn stenen van andere werelden dan onze Aarde; het zijn stenen uit het heelal, meteorieten.

Stenen vallen uit de hemel

De val van een meteoriet is nog steeds een zeer bijzondere gebeurtenis, maar meestal beperkt het zich tot een spectaculair lichtverschijnsel: we zien een vuurbol, die in een of enkele seconden langs de heldere nachthemel voortsnel. Soms zijn vuurbollen helderder dan de volle maan en trekken de aandacht van tientallen toeschouwers.

Toch zijn dat meestal maar kleine steentjes van hoogstens enkele centimeters, die vaak in de lagere luchtlagen verdampen. Ze missen nu eenmaal een hiteschild en een parachute, zoals terugkerende ruimteschepen. Enkele (en dat zijn dan de grotere)

slagen erin tot op het aardoppervlak door te dringen en daar als meteoriet terecht te komen. Maken we een statistiek van het aantal bekende meteorietinslagen, dan komen we tot de conclusie dat er per jaar één meteoriet op Aarde valt per miljoen km². Dit leidt tot ongeveer één val ergens op aarde per twee uur, individueel of in brokstukken, want zelfs flink grote meteorieten breken vaak tijdens hun tocht door de dampkring in stukken uiteen. Het gevolg is dat ze dan vaak in groepen of zwermen de bodem bereiken. Ontdekken we dus ergens een meteoriet, dan liggen er vaak meer. Soms vallen er zoveel tegelijk dat men van stenenregens of ijzerregens spreekt. Hier een aantal historische voorbeelden:

l'Aigle, Frankrijk 26.4.1803: ca 3000 stenen op 12 x 4 km, 40 kg in totaal;
 Pultusk, Polen 30.1.1868: 100 000 stenen op 8 x 1,5 km;
 Hollbrook, Arizona 19.7.1912: 16 000 stenen op 1,6 x 4,8 km, 218 kg;
 Sikhote Alin, Siberië 12.2.1947: duizenden ijzers op 2,5 x 2,5 km; zie afb. 1;
 Allende, Mexico 8.2.1969: duizenden stenen op 50 x 12 km, 3500 kg;
 Jilin, China 8.3.1976, 200 stenen op 65 x 10 km.

De brokken die vallen zijn te vinden in een strooiveld, dat meestal de vorm van een ellips heeft met de lange as in de richting van de baan, waarlangs de meteoroïde de atmosfeer binnentrad. (Voordat het object de Aarde bereikt spreken we nog niet van een meteoriet, maar van een meteoroïde). Eerst vallen de kleine stukjes en de grootste liggen aan het eind van het strooiveld. Bij een verticale baan komt er een cirkelvormig veld. Afb. 2.

Bij hun korte passage door de aardse dampkring met snelheden van veelal enkele tientallen km/s ontstaat er aan de buitenkant van een meteoriet slechts een oppervlakkige smeltkorst. Dat is een belangrijk kenmerk van meteorieten, omdat die meestal geheel of gedeeltelijk aanwezig is. De vluchttijd is zo kort en het geleidingsvermogen zo laag, dat de warmte nauwelijks naar binnen dringt. Meteorostenen zijn dan ook niet te heet om op te pakken na hun val, maar bestaan ze uit ijzer dan vaak wel door hun hoger geleidingsvermogen. De smeltkorst is zwart bij stenen maar bruinachtig bij ijzers en 5 - 20 mm dik. Bij ijzers bestaat hij gewoonlijk uit ijzeroxide (Fe₃O₄).

Meteorieten in soorten

Een oppervlakkig onderzoek bracht inderdaad het bestaan van twee soorten meteorieten aan het licht: **steenmeteorieten** en **ijzermeteorieten**. Ijzermeteorieten bestaan bijna geheel uit ijzer met een groot nikkelgehalte, terwijl de steenmeteorieten uit diverse silicaatmineralen bestaan. Wel bevatten ze vaak kleine hoeveelheden ijzer. Later ontdekte men dat er ook een soort tussencategorie bestaat, die ongeveer evenveel silicaten als metalen bevatten: de **steenijzermeteorieten**.

Er vallen veel meer stenen dan ijzers. maar er worden veel meer ijzers gevonden. Dat komt, omdat de stenen een aards verblijf zelden lang ongeschonden overleven, terwijl bovendien zelfs geroutineerde geologen verweerde meteorieten vaak moeilijk kunnen identificeren. Ze zijn in geologische musea aangetroffen geïdentificeerd als stukken magnetiet, basalt, zwerfsteen, enz.

Zodra een meteoriet onder het grondniveau komt, is hij inderdaad meestal niet meer als zodanig te herkennen. Erosie en vegetatie trachten de steen te slopen, zodat die uiteindelijk in een groot aantal kleine

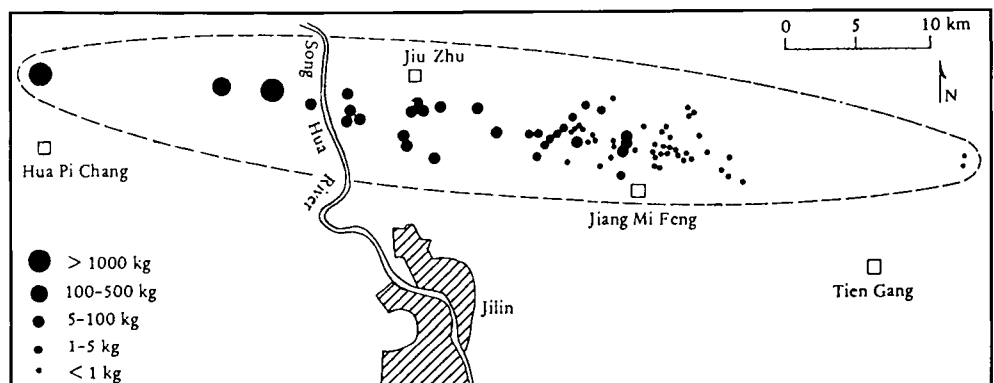
Afb. 2. Het strooiveld van de meteoriet, die in 1976 in China bij Jilin in een groot aantal stukken op Aarde viel.



Afb. 1. Een enorm heldere vuurbol, hier gevolgd door een reusachtige stofstaart, getuigt van de val van een grote meteoriet, die dikwijls in stukken breekt, zodat er een groot aantal brokken van kunnen worden verzameld. Dit is een afbeelding van een schilderij van P.I. Medwedew van de vuurbol, die de "ijzerregen" veroorzaakte op 12 februari 1947 in het verre oosten van Siberië. Het origineel hangt in een museum in Moskou.

stukjes uiteenvalt. In oudere geologische lagen worden dan ook meestal alleen maar ijzermeteorieten aangetroffen. Een interessante uitzondering daarop is een 460 à 480 miljoen jaar oude steenmeteoriet, die in de groeve bij Brunflo in Zweden is gevonden tussen resten van fossielen. Ook op het poolijs van Antarctica zijn veel meer stenen dan ijzers gevonden, maar die waren geconserveerd in een "diepvrieskast".

Al in de vorige eeuw ontwikkelden de Europese petrologen Rose, Tschermak en Brezina een classificatie-systeem, dat nu nog vaak als het RTB-systeem wordt aangeduid. De steenmeteorieten noemden ze **aerolieten**, de ijzermeteorieten heten **siderieten** en de steenijzers **siderolieten**. In 1920 wijzigde G.T. Prior het systeem enigszins en voerde afkortingen voor de diverse soorten in. De aerolieten worden onderverdeeld in **chondrieten** en **achondrieten** (zie Classificatie-schema).



Classificatie van meteorieten						
aerolieten (stenen)			siderieten (ijzers)			siderolieten (steenijzers)
achondrieten		chondrieten	hexahedrieten	oktahedrieten	ataxieten	pallasieten
met veldspaat	zonder veldspaat	met C zonder C	Neumann-lijnen	Widmanstätten-figuren		nikkelijzer sponzen met olivijn
1. <i>eucrieten</i> augiet anorthiet 2. <i>shergottieten</i> augiet maskelyniet	1. <i>chassignieten</i> olivijn 2. <i>amphoterieten</i> olivijn, bronziet 3. <i>nahklieten</i> olivijn, diopsied 4. <i>chladnieten</i> enstatiet 5. <i>bustieten</i> bronziet, diopsied 6. <i>angrieten</i> augiet 7. <i>ureilieten</i> met C					

Stenen uit de oertijd van ons zonnestelsel

Soms komt je een stenenverzamelaar tegen, die je met trots vertelt dat hij in zijn verzameling stukken steen heeft van miljarden jaren oud. Persoonlijk kreeg ik eens van een dame een steen cadeau, die zij ooit als souvenir in Canada had gekocht. Het steentje zou wel 3,5 miljard jaar oud zijn. Het is echter niet zo moeilijk om nog veel oudere stenen aan uw verzameling toe te voegen. Bepaalde steenmeteorieten, de chondrieten, behoren tot de oudste gesteenten die wij kennen.

De naam van deze interessante groep meteorieten, waartoe meer dan 80 % van de gevallen exemplaren behoren, is afkomstig van het Griekse woord *chondros*, dat "korrel" of "zaadje" betekent. Stenen van dit soort bestaan inderdaad uit een matrix (grondmassa) waarin een groot aantal ronde insluitels zitten, die **chondrulen** genoemd worden, precies zoals krenten in een krentenbrood. Afb. 3.

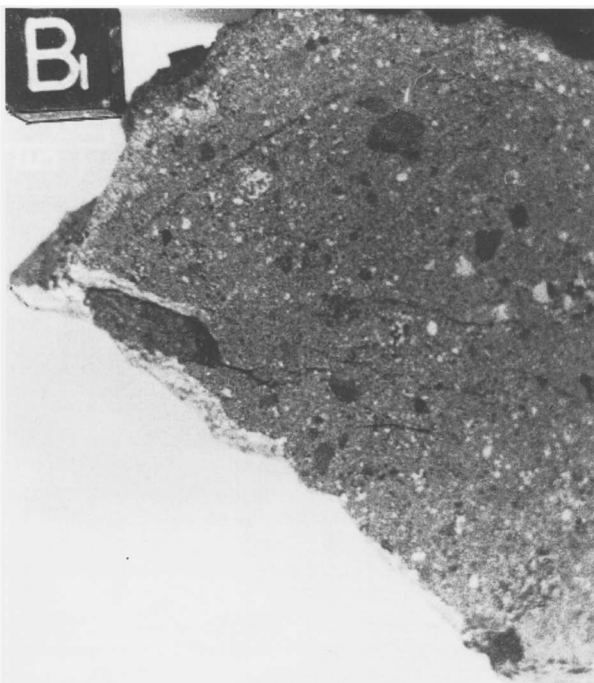
Dat fijne matrixmateriaal (het "deeg", waar de chondrulen als "krenten" in zitten) bestaat meestal uit zeer kleine kristalletjes van olivijn en pyroxeen, vermengd met accessoria, zoals sulfiden, oxi-

den en kleimineralen. Andere soorten bevatten grafiet, gemengd met magnetiet.

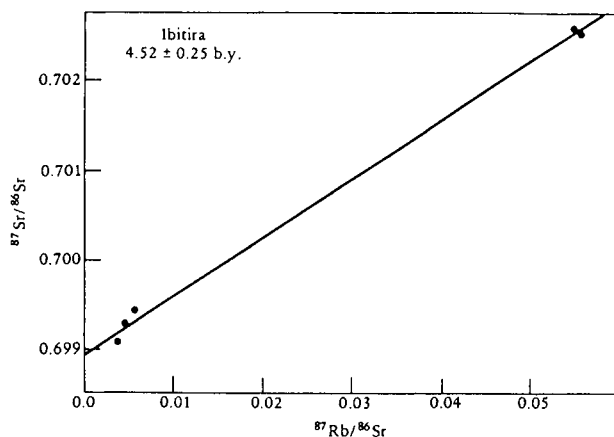
Bij een zeer nauwkeurige analyse blijkt dat er kleine verschillen zijn in de chemische samenstelling van diverse chondrieten, zodat men een drietal soorten kan onderscheiden. Een zeer interessante soort zijn de koolstofhoudende chondrieten. Die koolstofhoudende chondrieten zijn zeer oud. Hun ouderdom bepaalt men met behulp van rubidium-strontium isochronen. Het element rubidium komt deels voor in de vorm van het isotoop rubidium-87. Dat zijn radioactieve kernen, die na verloop van tijd uiteenvallen, waarbij strontium-87, een isotoop van het element strontium, ontstaat. Na ongeveer 49 miljard jaar is de helft van een hoeveelheid rubidium-87 uiteengevallen (dit tijdsverloop heet de *halfwaardetijd*). Behalve het door dit proces ontstane isotoop strontium-87 zit er ook strontium-86 in het gesteente, dat niet door dit proces is ontstaan. Dat is een stabiel element en daarom meten we hoeveelheden steeds t.o.v. die strontium-86. De hoeveelheid strontium-87 neemt dus geleidelijk toe t.o.v. strontium-86, terwijl de hoeveelheid rubidium-87 afneemt. Stel we hebben in zo'n steen twee mineralen en bij het ontstaan van die steen kreeg het eerste mineraal twee maal zoveel rubidium-87 mee t.o.v. strontium-86 als het andere mineraal. Na verloop van tijd zit er in het eerste mineraal dan ook twee maal zoveel strontium-87 als in het tweede (alles steeds t.o.v. strontium-86). Zetten we in een grafiek de hoeveelheid rubidium-87 uit tegen de nog aanwezige hoeveelheid strontium-87 voor diverse mineralen in dezelfde steen dan liggen de meetpunten keurig op een rechte lijn. Zo'n lijn wordt **isochroon** genoemd. Afb. 4.

Hoe ouder de steen, hoe meer rubidium-87 er is omgezet en hoe meer strontium-87 er is gevormd. Het gevolg is dat alle meetpunten op de rechte lijn omhoog schuiven, maar de hogere meer dan de lagere. Ze blijven dus op een rechte lijn liggen, met andere woorden: hoe steiler die lijn loopt hoe ouder de steen is; de helling van de isochroon bepaalt de ouderdom van een gesteente. Zo vinden we vaak een ouderdom van 4,5 miljard jaar voor verscheidene chondrieten. Afb. 5.

Volgens de meest gangbare hypothese ontstond ons zonnestelsel uit een wolk gas en stof, die onder invloed van de zwaartekracht begon samen te trekken. Er vormde zich een centrale massa-concentratie, de **oerzon**. Door de rotatie kreeg de overgebleven gaswolk de vorm van een platte schijf, de **zonnenevel**.



Afb. 3. De Kediri is een gewone chondriet van het type L 4. Dit fragment is een stukje van de 70 brokken, die in 1940 op Java bij Kediri vielen en waarvan de grootste steen (3,3 kg) in Amsterdam werd onderzocht. De kubus is 1 cc. (Collectie en foto Th. van Dijk)



Afb. 4. De rubidium-strontium-isochroon van de in Brazilië gevallen Ibitira-eucriet bewijst dat die meteoriet een ouderdom van 4,52 miljard jaar heeft.

Een deel van het stof was door de bij de samentrekking vrijkomende warmte verdampt en recondenseerde bij latere afkoeling en werd vloeibaar. Uit de druppels vormden zich mineralen, waarvan de resten nu nog terugvinden in het matrixmateriaal van de chondrieten. De chemische samenstelling van de chondrieten komt goed overeen met die van de Zon. Geen enkel aards gesteente zou dat zo mooi doen, omdat allerlei geologische processen het aardse gesteente hebben veranderd. De elementen die afwijken van de rechte lijn zijn of sterk vluchtig, zoals waterstof, helium, en dergelijke, of ze nemen deel aan kernreacties in de zon en dat beïnvloedt hun abundantie.

De koolstofhoudende chondrieten zijn bij betrekkelijk lage temperaturen ontstaan en nooit verder verhit. Natrium, magnesium, calcium en ijzer maken 45 % van de gewichtssamenstelling van de koolstofhoudende chondrieten uit. Die bevatten naast water ook in water oplosbare zouten, zoals magnesiumsulfaat, verder zwavel en in het bijzonder organische stoffen. Deze vormen een soort thermometer, want hun aanwezigheid bewijst dat de temperatuur niet boven de 200 à 350° C geweest is. Daarom worden ze vaak als de oermaterie van het zonnestelsel opgevat. Behalve bijzondere mineralen, zoals chlorieten en serpentijn, bevatten ze ook kleine ronde deeltjes, die lijken op fossiele algen.

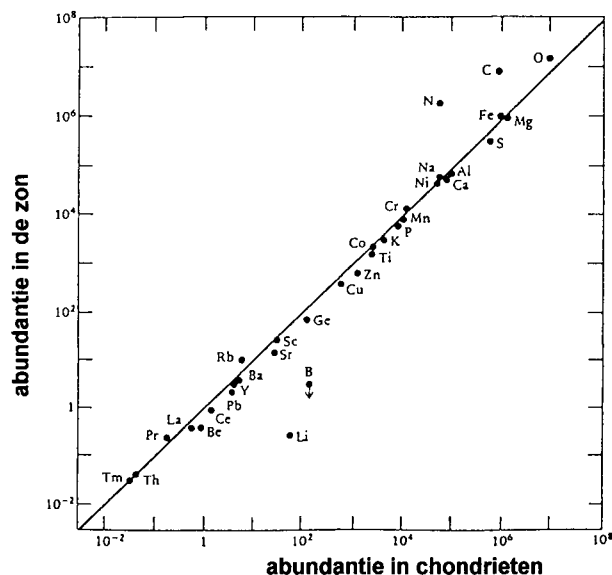
De in de matrix gesloten korrels, de **chondrulen**, zijn zo genoemd door de Duitse mineraloog Rose in 1864. Ongeveer in dezelfde tijd concludeerde de Engelse onderzoeker Sorby (die de petrografische microscoop uitvond) dat ze moeten zijn afgekoeld voor ze in de chondrieten werden ingesloten. Het zijn restanten van interstellair korrels uit de oernevel, die slechts gedeeltelijk zijn gesmolten. Wij weten echter nog bitter weinig over de processen waarbij ze ontstonden.

Behalve chondrulen bevatten koolstofhoudende chondrieten: onregelmatig gevormde witte insluitsels, die op grond van hun chemische samenstelling als calcium-aluminium-insluitsels worden aangeduid. Sommige van die insluitsels bevatten op hun beurt weer kleine korreltjes platina of legeringen van andere zeldzame metalen die, met een daarvoor in gebruik geraakte Duitse term, *Fremdlinge* genoemd worden.

80 % der chondrieten vertoont zwarte aders, 0,01 tot 30 mm dik, meestal echter 0,01 mm. In achondrieten zijn ze zeldzaam. Ze bestaan uit glasachtig materiaal en zijn sterk verrijkt aan zwavel.

Achondrieten

Oppervlakkig lijken de achondrieten op aardse basalt, zodat ze zelden worden gevonden als men ze niet heeft zien vallen. Er zijn een aantal groepen te onderscheiden, die waarschijnlijk door verwante vulkanische processen ontstonden. Enkele soorten zijn **eucrieten**, **diogenieten**, **shergottieten**, **nahklieten**, **chassignieten** en **ureilieten**. Ze bevatten calciumrijke plagioklaas en de pyroxeen is pigeoniet, met zeer weinig calcium. De langwerpige



Afb. 5. De hoeveelheid (abundantie) van de chemische elementen in de koolstofhoudende chondrieten is voor de meeste elementen bijna gelijk aan die in de zon. Vandaar dat de meetpunten in een grafiek op een rechte lijn vallen, die precies 45° helt. Blijkbaar bestaan zulke meteorieten uit de oermaterie van ons zonnestelsel. (Beide schalen zijn logaritmisch en alle metingen zijn t.o.v. een miljoen atomen silicium)

plagioklaas worden omgeven door pyroxeen. Dezelfde textuur vertonen aardse vulkanische gesteenten, zodat we daarom veronderstellen dat de achondrieten niet diep in het binnenste, maar aan het oppervlak van een planeet stonden. Uit experimenten blijkt ook dat ze zeer snel zijn afgekoeld, zoals alleen plaatsvindt op of vlakbij de bodem. Aardse basalten bevatten natriumrijkere plagioklaas en calciumrijke pyroxeen, voornamelijk augiet.

De **eucrieten** zijn fijnkorrelig. De meeste zijn breccies, bestaande uit onregelmatige brokstukken vulkanisch gesteente met daartussen verpulverde mineraalkorrels. Diogenieten bestaan bijna geheel uit calciumarme pyroxeen met maar heel weinig plagioklaas of olivijn. Vaak zijn ze met eucrieten vermengd en vormen samen breccies, die dan howardieten genoemd worden. Dit ondersteunt de gedachte dat ze samen gevormd zijn op hetzelfde hemellichaam.

De shergottieten, de nahklieten en de chassignieten worden gezamenlijk wel de **SNC-meteorieten** genoemd. Alle drie ontleen hun naam aan een gevallen meteoriet, een historische vondst dus. De **shergottieten** zijn genoemd naar een meteoriet, die op 25 augustus 1865 in Shergotty viel in de staat Bihar in India. Er zijn momenteel slechts enkele shergottieten bekend: Shergotty, Zagami, EETA 79001, ALHA 77005 en LEW 88516. Afb. 6. Ze lijken mineralogisch volkomen op die aardse basalten en bestaan dus uit pyroxeen en plagioklaas. Ze bevatten ook kleine hoeveelheden van een waterhoudend mineraal, de amfibool kaersutiet. Shergottieten zijn drastisch beïnvloed door schokmetamorfose. Zo is plagioklaas omgezet in maskelynieet, een glasvormig mineraal met dezelfde chemische samenstelling, dat in vaste toestand ontstaat bij een schokdruk van 300 000 atm (30 GPaascal). Enkele andere mineralen vertonen sporen van een schokdruk van 45 GPaascal. Omdat schokeffecten de radiometrische klok verstellen zijn er problemen bij hun ouderdomsbepaling.

Uit de overgang van samarium (^{147}Sm) in neodymium (^{143}Nd) volgt een ouderdom van 1,3 miljard jaar. Ze zijn geologisch jong. Het rubidium-strontium-systeem, dat door de schok is bijgesteld, geeft als ouderdom 180 000 jaar. Blijkbaar wijst dat op het ogenblik van een belangrijke gebeurtenis in het leven van de shergottieten.

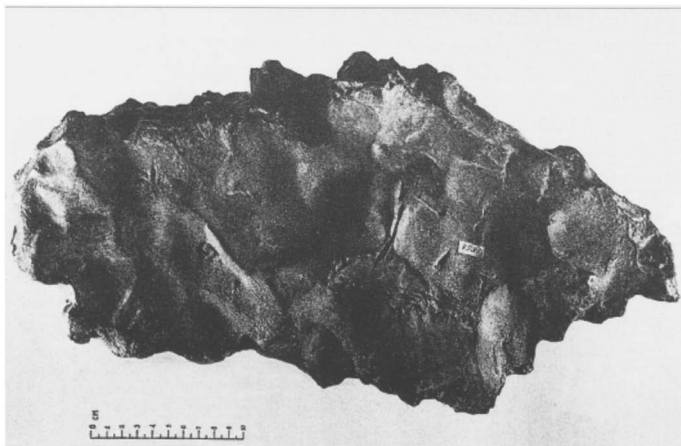
De **nahklieten** zijn genoemd naar de Nahkla, die in 1911 in stukken op die plaats (dicht bij Alexandrië in Egypte) viel en waarvan een brok een hond trof. Nahklieten zijn ook basaltachtige



Afb. 6. Deze steenmeteoriet viel in Zagami in Nigeria en is een shergottiet. Dit brok weegt bijna 2,8 kg en is ongeveer 15 cm groot. Het inwendige toont pyroxeenkristallen en de buitenkant een deel van de zwarte smeltkorst.

accumulaten, die uit kristallen van pyroxeen (augiet), diopsied en olivijn bestaan; die mineralen geven ze bij doorzagen een olijfgroen voorkomen. R.C. Friedmann en G.J. Taylor vergeleken ze met *Theo's flow* in Ontario, een 120 m dikke, Archaïsche lavastroom met een 54 m dikke pyroxenitische zone. Nahklieten vertonen geen sporen van schokeffecten. Hun ouderdom is ca 1,3 miljard jaar.

Tot voor kort was er slechts een enkele **chassigniet** bekend, gevallen in Chassigny in Frankrijk en voornamelijk bestaande uit olivijn met een kleine hoeveelheid van de mineralen pyroxeen en chromiet. Een gesteente van deze samenstelling wordt op aarde een duniet genoemd. Kort geleden is een tweede exemplaar van deze soort gevonden. Deze meteorieten vertonen ook schok-effecten.



Afb. 7. Een exemplaar van de ijzermeteoriet van Sikhote Alin. Deze viel in duizenden stukken, waaronder zeer grote exemplaren, uiteen in februari

IJzermeteorieten

In 1978 vond een groep geologen uit Nieuw-Zeeland tijdens hun veldwerk in Antarctica op de helling van Derrick Peak toevallig een aantal ijzermeteorieten. Dit was een gebied waar geen sneeuw of ijs de bodem bedekte en met behulp van een helikopter slaagde de groep erin 16 brokstukken op te sporen. Sommige waren zo zwaar, dat het een heel karwei was om ze langs de steile hellingen van de berg naar beneden te transporteren. Afb. 7.

Afb. 8. (Rechts) Het Widmanstätten-patroon van de Apoola-octahedriet, het staafje links is 1 cm groot.

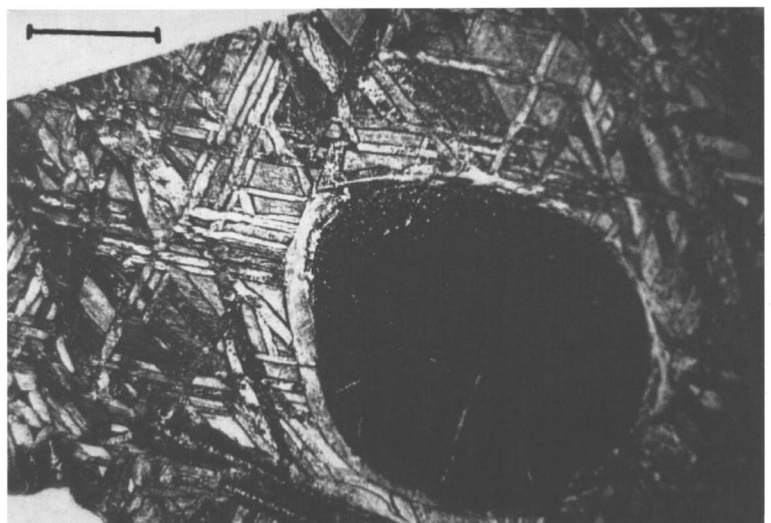
Het is eigenlijk geen bijzonderheid, dat er naast steenmeteorieten speciale ijzermeteorieten voorkomen. Een hemellichaam in ons zonnestelsel bevat als een der belangrijkste elementen juist ijzer; 40 % van de aarde is ijzer, waarvan we veronderstellen dat het zich grotendeels in de aardkern bevindt. Waarom het zich daar heeft opeengehoopt is wel verklaarbaar, want ijzer behoort tot de zware elementen, maar zo'n centrale opeenhoping hangt uiteraard van factoren af, die in kleinere hemellichamen in mindere mate of in het geheel niet voorkomen. Niet alleen is de gravitatie daar veel kleiner, maar ook zullen ze sneller volledig zijn afgekoeld tijdens hun levensloop. In de ijzermeteorieten heeft men meer dan 40 verschillende mineralen gevonden, waarvan enkele op aarde niet voorkomen. We zullen er enkele van noemen, zoals kamaciet, dat 7,5 % nikkel bevat en taeniet dat voor ongeveer 20 tot 50 % uit nikkel bestaat. In de metallurgie worden ze alfa- en gamma-ijzer genoemd. Het zijn belangrijke bestanddelen van staal. Onder 1400° C begint vloeibaar ijzer te stollen en te kristalliseren. Maar ook bij lagere temperatuur gaat het kristallisatieproces in het inmiddels vast geworden ijzer nog verder. In een fasediagram kan men laten zien hoe het in een nikkel-ijzer-mengsel verloopt. IJzermeteorieten met minder dan 6 % (naar gewicht) aan nikkel bevatten alleen kamaciet, maar geen taeniet. Omdat kamaciet-kristallen kubisch zijn, heten ze hexahedrieten. Gepolijste oppervlakken daarvan vertonen Neumannlijnen. Dit zijn grenzen tussen tweelingen.

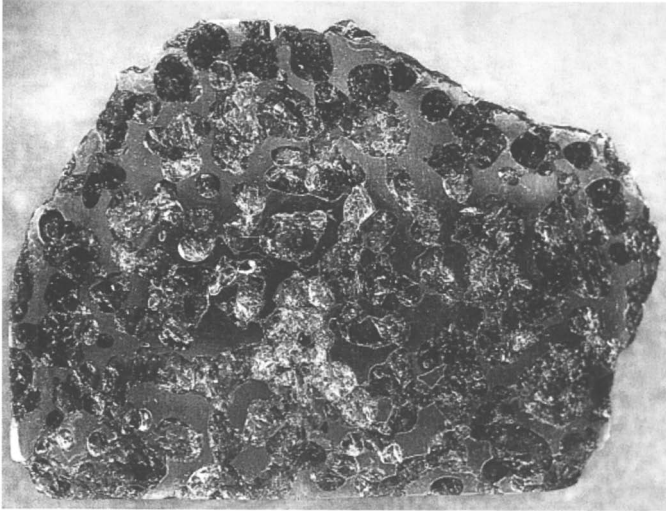
Octahedrieten hebben een nikkelgehalte tussen 6 en 17 %. Ze bevatten kamaciet en taeniet in een Widmanstätten patroon. Dat ontstaat doordat ze opgebouwd zijn uit plaatjes of lamellen kamaciet tot 3 mm dik, terwijl de ruimte ertussen gevuld is door plesiet, een mengsel van taeniet en kamaciet van variabele korrelgrootte. Het is van de plaatjes gescheiden door een dunne strook zuiver taeniet. Ze vormen het merendeel van de ijzermeteorieten. Het Widmanstätten patroon is ontstaan toen de ijzermeteorieten langzaam afkoelden bij 900° C door diffusie in nagenoeg vaste toestand. Afb. 8.

Ataxiëten hebben een nog hoger nikkelgehalte en lijken structureel, maar ze bezitten microscopische Widmanstätten figuren.

De metaalsamenstelling van de verschillende ijzermeteorieten varieert nogal. Sommige ijzermeteorieten bezitten silicaatinsluitels. Die zijn radioactief te dateren en de rubidium-strontium-isotopen laten zien dat bepaalde silicaat-insluitels 4,45 miljard jaar oud zijn, net als de chondrieten.

Verder zitten er in ijzermeteorieten ronde, donkere korrels van troiliet, zwavelijzer, genoemd naar de Italiaanse Jezuïetenpriester Dominico Troili, die het ontdekte. Pas een eeuw later





Afb. 9. Een doorgezaagde en gepolijste pallasiet met geelgroene olivijn van de Haviland-meteorietkrater in Kansas.

beweest een nauwkeurige chemische analyse dat het verschilde van pyriet (troiliet is FeS en pyriet is FeS_2). Koolstof zit in het mineraal coheniet (Fe,Ni,Co) $_3\text{C}$. Dit mineraal is onstabiel en valt uiteen in kamaciet en zuiver koolstof (grafiet). Fosfor vormt het mineraal schreibersiet (Fe,Ni) $_3\text{P}$, opvallende witte prisma's tussen de metaalkorrels.

Steenijzermeteorieten

Deze worden **pallasieten** genoemd naar de Duitse geleerde P.S. Pallas. Deze publiceerde in 1776 een uitvoerige beschrijving van een van dit soort objecten. Het zijn meteorieten bestaande uit zeer veel olivijnkorrels, ingesloten in metaal. Een volume-verhouding van olivijn tot metaal van 2 tot 1 komt veel voor. Afb. 9. Er zijn ook steenijzermeteorieten die ongeveer evenveel metaal als silicaten bevatten. Sommige hebben een duidelijke breccieachtige structuur. Hun metaalsamenstelling vertoont weinig variatie. Ze tonen wel opvallende schokeffecten, maar ook Widmanstättense patronen. Ze zijn zeer langzaam afgekoeld (1° in twee miljoen jaar). Ze worden **mesosiderieten** genoemd.

Duizenden nieuwe vondsten

Tot 1969 waren er in de verzamelingen van onze musea en instituten wel een groot aantal meteorieten van allerlei plaatsen op aarde, maar hun aantal nam maar langzaam toe en ook de kennis daarvan groeide wel gestaag maar uiterst traag. Sinds dat jaar echter is het aantal vondsten spectaculair gestegen tot meer dan 16 000. Het zijn brokken van 3 à 5000 gevallen meteorieten, grotendeels afkomstig uit Antarctica. Daar in dat barre zuidpool-land zijn op een aantal plaatsen heel veel stenen en ijzers op het ijs aangetroffen. Onder die nieuwe vondsten waren ook enkele SNC- meteorieten en dat leidde tot een hernieuwde belangstelling voor de studie van deze steentjes. Die spectaculaire hoeveelheden nieuwe vondsten heeft ook geleid tot een aanzienlijke verrijking van onze kennis op dit gebied. Hoe het komt dat er hier zoveel meteorieten geconcentreerd liggen is nog niet volkomen duidelijk, al is het wel begrijpelijk dat ze daar lang tegen de verwerking bestand houden.

Er zijn ook opvallende verschillen geconstateerd tussen veel van de Antarctische meteorieten en die uit onze collecties van vroegere aardse vindplaatsen. Of dat een gevolg is van de erosie of van voor hun val op aarde is nog problematisch.

Kort geleden is er nog een nieuwe categorie meteorieten bijgekomen. In droge gebieden, in uitgestrekte woestijnen zoals de Sahara, Nullarbor Plain in West-Australië en Roosevelt County in de U.S.A., liggen betrekkelijk veel meteorieten, die echter een kortere aardse verblijftijd tonen dan die uit Antarctica, waar ze

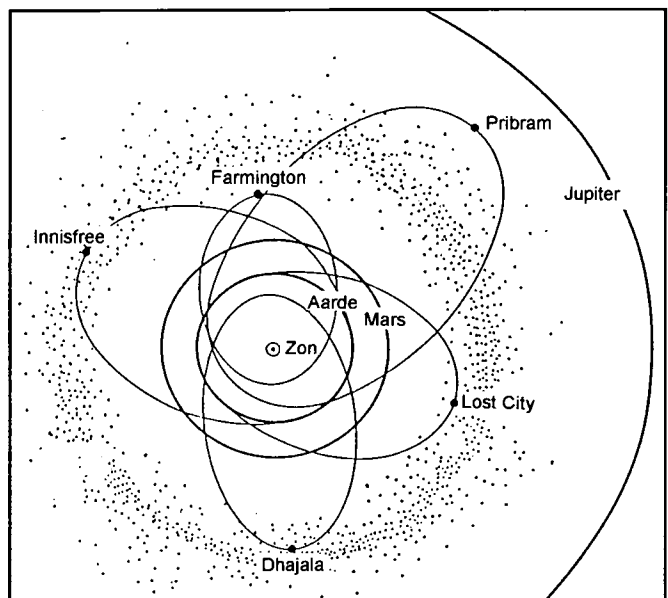
gemiddeld 100 000 jaar kunnen overleven in die aardse koelkast. In 1989, 1990 en 1991 werden 400 meteorieten verzameld op diverse locaties in de Sahara, maar vooral op de Nullarbor Plain. Die is geologisch al oud en daar bevinden zich ook een 15-tal inslagkraters met diameters tussen 20 m en 160 km. De vlakte ligt 1000 km ten oosten van Perth. Het is een vlak bassin van kalksteen waar het bijna nooit regent. Het is dan ook vanzelfsprekend dat in deze streken ook meteorieten moeten zijn. Er bestaat hier echter geen mechanisme dat de meteorieten op bepaalde plaatsen concentreert, zoals in Antarctica.

A. Bevan van het Western Australian Museum leidt het zoeken naar meteorieten vanuit Perth op de Nullarbor-vlakte. De meteorieten worden op de plaats waar ze insloegen gevonden. Het zoeken gebeurt lopend 6 à 7 uur per dag in een tempo van 2 à 3 km/h door een ploeg van 9 mensen op 10 m onderlinge afstand voortgaande. De Nullarbor-vlakte beslaat een gebied van 240 000 km² (6 x Nederland). Tot nu toe heeft Bevan duizenden stukken van enkele honderden meteorieten gevonden, die in de afgelopen 16 000 tot 18 000 jaar vielen, waaronder een brok van 500 gram.

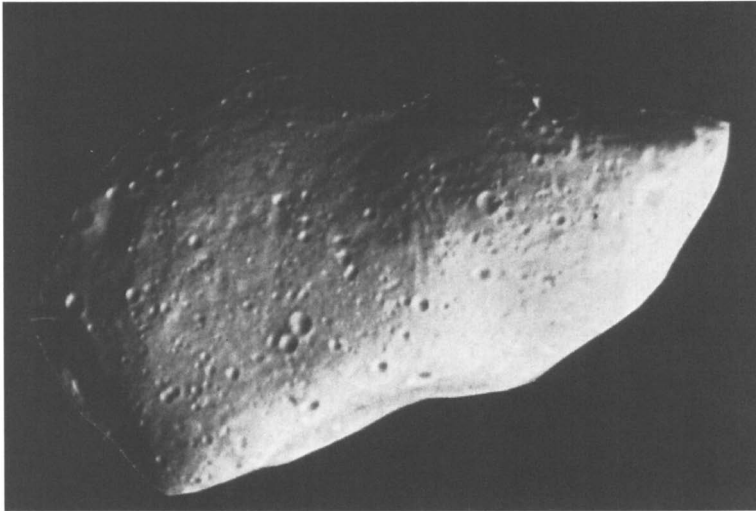
Meteoroiden en planeten

Meteorieten vallen als vuurbollen en komen uit de wereldruimte. We moeten dus hun herkomst buiten de Aarde zoeken. Op enkele plaatsen op onze planeet heeft men met een netwerk van camera's, die bij helder weer onafgebroken de gehele hemel waarnemen, getracht vuurbollen te fotograferen en daaruit hun baan vast te leggen. Tevens probeerde men later de gevallen meteoriet op te sporen. Dat bleek een uiterst moeilijke opgave; niettemin is men erin geslaagd zo ook de banen van een aantal vuurbollen vóór hun val op aarde te berekenen. Het blijkt dat zo'n meteoroïde eeuwenlang als een miniatuur-planeetje om de Zon heeft gecirkeld, voordat het tijdens een passage vlak langs de Aarde door onze planeet werd ingevangen. Ze behoren dus inderdaad tot ons zonnestelsel.

We kennen in ons zonnestelsel een aantal grote planeten, Mercurius, Venus, onze Aarde, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus en Pluto. Ze lopen in banen om de Zon, weliswaar niet precies in één vlak, maar in de meeste gevallen lijkt dat er toch aardig op. Reeds twee eeuwen geleden vonden de astronomen, dat er tussen de planeet Mars en zijn buur, de reuzenplaneet Jupiter, wel



Afb. 10. De weinige goed bekende banen van enkele chondrieten suggereren dat die afkomstig zijn uit de planetoïdengordel, die inligt tussen de banen van de planeten Mars en Jupiter (om de banen duidelijk te laten zien zijn ze niet in de juiste oriëntatie weergegeven).



Afb. 11. Een opname van een ruimteverkenner van de planetoïde Gaspra. De kleinste details zijn 55 m groot. Het 200 miljoen jaar oude oppervlak is bezaaid met kloven, barsten en kraters.

een erg wijde lege ruimte bestaat en dat het om verschillende redenen niet onwaarschijnlijk zou zijn dat er zich daar ook nog een planeet bevond. Die was echter nog nooit gezien en daarom ging men ernaar op zoek.

Die gezochte planeet werd in 1801 ontdekt en bleek erg klein te zijn, maar zes jaar later waren er nog vier zulke kleine planeetjes gevonden, allemaal met een baan tussen Mars en Jupiter in. Toen er verscheidene planeetjes met banen in de strook van het zonnestelsel tussen Mars en Jupiter werden aangetroffen, dacht men dat ze brokstukken waren van de gezochte grotere planeet, die op een of andere manier in fragmenten was uiteengevallen. Waarschijnlijk hebben de aantrekkingskracht en de storingen van de reuzenplaneet Jupiter verhinderd dat er tussen Mars en Jupiter één planeet ontstond of zo'n planeet kort na zijn ontstaan uiteen doen vallen. Afb. 10.

Die gedachte inspireerde de sterrenkundigen tot verder onderzoek om nog meer van die brokstukken te vinden en hun banen nauwkeurig vast te leggen. Men zocht naar een punt in de ruimte waar al die banen zouden samentreffen. Het lukte echter niet dat te vinden, maar er werden wel heel wat kleine planeetjes bij ontdekt, waaronder een aantal zeer bijzondere exemplaren. Er zijn er nu ongeveer 4500 bekend, d.w.z. ze zijn definitief genummerd en hun banen zijn berekend. Van dit aantal hebben er ongeveer 3500 ook een eigen naam. Ze worden planetoïden genoemd. Men schat dat er wel 100 000 zijn in ons zonnestelsel met een middellijn van meer dan 1 km. De grootste is Ceres met een diameter van 1025 km. De helderste planetoïde is Vesta, die op 29 maart 1807 door H. Olbers in Bremen ontdekt werd. De totale massa van alle planetoïden samen is niet meer dan een fractie van de massa van de Maan.

De banen van de meeste meteoroiden om de zon blijken niet cirkelvormig maar elliptisch en het deel van de baan dat het verst van de Zon af ligt, bevindt zich meestal juist binnen die strook, waarin zich de planetoïden ophouden. Het is dus niet moeilijk om zich voor te stellen dat ze bij het uiteenvallen van die planeet, die daar eens trachtte te ontstaan, zijn weggespat. Misschien zijn sommige ook door latere onderlinge botsingen van de vele planetoïden als brokstukken ontstaan. Omdat we ons een planeet meestal eenvoudig voorstellen als een object met een nikkel-ijzeren kern, omringd door een mantel van gesteente en een korst met wellicht veel bazalt, is het volkomen begrijpelijk dat er zowel steemmeteorieten als ijzermeteorieten uit de planetoïdengordel komen. Misschien was er ook nooit een planeet tussen Mars en

Afb. 12. Een registratie van het spectrum van het door sommige mineralen teruggekaatste zonlicht toont duidelijke absorptiebanden bij bepaalde golflengten. Zo kunnen mineralen op planetoïden soms met die van meteorieten worden vergeleken en geïdentificeerd. Omdat een waargenomen gebied echter uit gesteenten bestaat, opgebouwd uit een mengsel van diverse mineralen, vinden we gewoonlijk een spectrum dat is samengesteld uit een mengsel van dit soort grafiekjes.

Jupiter en zijn de meteorieten niet anders dan uiterst kleine planetoïden, die door storingskrachten na miljoenen jaren in hun excentrische banen zijn terecht gekomen.

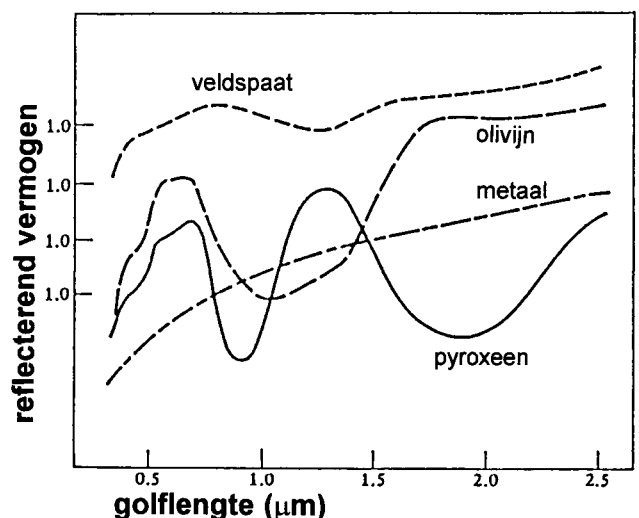
De meeste planetoïden zijn zo klein dat ze in de afgelopen 4,6 miljard jaar slechts een kleine thermische en geologische evolutie hebben doorgemaakt, vergeleken met de grotere planeten. Zij tonen ons dus materie en condities, zoals die te vinden waren in het zonnestelsel kort na zijn ontstaan. Enkele daarentegen tonen sporen van een uitgebreide evolutie en een complexe chemische samenstelling. Waarschijnlijk is er een duidelijke samenhang tussen planetoïden en meteorieten. Daarvoor zoeken we uiteraard nog steeds naar overtuigende bewijzen.

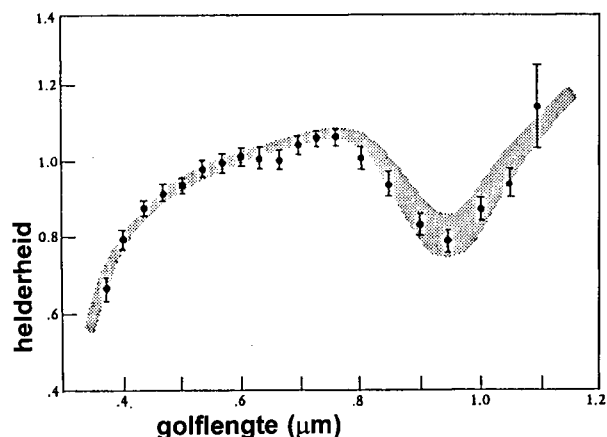
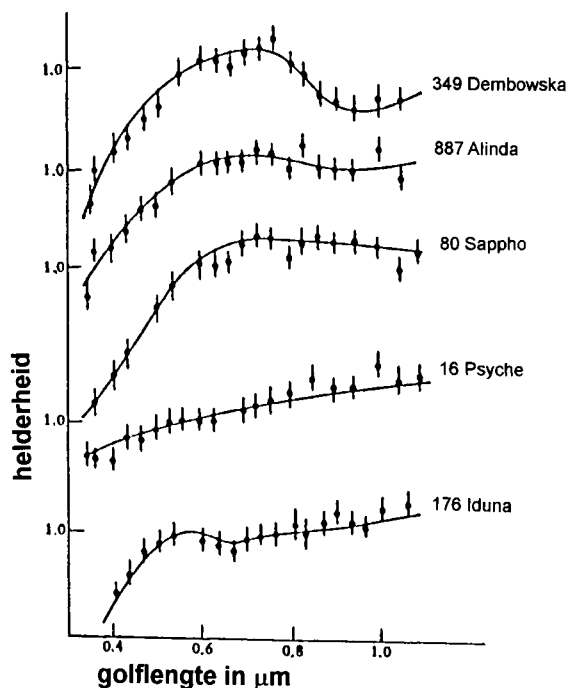
Met behulp van ruimtesondes zijn in de afgelopen jaren enkele planetoïden zeer gedetailleerd onderzocht en hun oppervlak is gefotografeerd. Het blijkt dat ze bezaaid zijn met kraters, puin en gruis en bedekt door een regolithlaag net als onze Maan. Waarschijnlijk hebben ze heel wat inslagen en onderlinge botsingen meegemaakt. Afb. 11.

Het onderzoek van de spectra

Het licht dat door een mineraal wordt teruggekaatst kan in zijn kleuren worden ontleed. We krijgen dan een spectrum, zoals we dat kennen aan de regenboog, waarin het zonlicht door waterdruppels wordt ontleed. Bij iedere kleur behoort een bepaald golflengtegebied. Het verloop van de helderheid in zo'n spectrum kan men registreren en in zo'n registratie manifesteren zich de terugkaatsingseigenschappen van het mineraal. Het spectrum van door een mineraal teruggekaatst zonlicht mist die golflengtes, die door de elektronen in de buitenste lagen van het mineraal worden geabsorbeerd. Afb. 12.

Zo absorbeert ijzer bijv. energie in de zichtbare en nabije infrarode delen van het spectrum, als er zich ijzer in een mineraal bevindt. Dat veroorzaakt de kleur van veel ijzerhoudende mineralen. Gesteenten die uit meer dan een mineraal bestaan vertonen reflectiespectra die opgebouwd zijn uit een samenstel van de spectra van hun individuele mineralen. Omdat de meteorieten zowel als planetoïden ook uit gesteenten bestaan, zullen zij ook dergelijke reflectiespectra vertonen. Afb. 13. De registratie van ieder spectrum heeft echter een bijzondere vorm, omdat enkele mineralen domineren, hoewel uiteraard andere in kleinere hoeveelheden altijd aanwezig kunnen zijn. In het algemeen wijst een lineair registragram op veel nikkel-ijzer en een gebogen registratie van een





Afb. 13. (Links.) Registraties van spectra van diverse soorten chondrieten (voluit getekende lijnen) komen goed overeen met die van bepaalde met naam aangegeven planetoïden (punten met verticale streepjes, die de onzekerheidsmarge aangeven). Alle registraties zijn bij 0,56 micrometer op de helderheid 1,0 gebracht.

Afb. 14. (Boven.) Een registratie van het spectrum van de planetoïde Vesta, hier afgebeeld door punten met foutenmarge komt precies overeen met dat van een soort meteorieten, de eucrieten (grijze band). De kuil bij 0,950 micrometer wordt veroorzaakt door pyroxeen.

spectrum met absorptiebanden op silicaten, zoals pyroxeen of olivijn.

In het laboratorium zijn ook de spectra van allerlei meteorieten opgenomen, zodat hun registratie met die van diverse planetoïden kan worden vergeleken. Dit leverde als resultaten op dat het helderheidsverloop in hun spectrum met geen van de 1000 onderzochte planetoïden volledig overeenkomt.

De oorsprong van de chondrieten is zo al 30 jaar omstrede. Zij moeten deel hebben uitgemaakt van een of andere oerplaneet (of enkele oerplaneten) en zijn daaruit weggeslagen. Inslagen in zulke hemellichamen kunnen brokstukken ervan wegslingeren of (als ze niet te groot zijn) zulke hemellichamen volledig in stukken breken. De chondrieten kunnen dus diverse inslagen hebben meegeemaakt, voordat ze zelf uit hun oerplaneet werden vrijgemaakt. Zulke inslagen produceren o.m. breccies en inderdaad blijken 99 % van de chondrieten breccies te zijn, die insluitsels (*clasts*) blijken te bezitten van dezelfde soort chondritisch materiaal maar van verschillende graad van metamorfose. Blijkbaar onderging ieder oerplaneetje een reeks metamorfe processen en inslagen wierpen diep gelegen (en dus sterk gemetamorfoseerd materiaal) omhoog, waar het gemengd werd met minder omgezet oppervlaktesteente. De inslagen gaan gepaard met hevige trillingen van de bodem en daardoor wordt het gesteente rondom de plaats van de inslag sterk geschokt. Het ondergaat schokmetamorfose; er treden wijzigingen in de kristalstructuur op, er kan glasvorming optreden of zelfs kan er een deel smelten.

Ook het tijdstip van zo'n schok kan gedateerd worden. Radioactief kalium-40 gaat over in het gas argon-40 en bij zo'n inslag kan de schok voldoende zijn om al het aanwezige argon te doen ontsnappen. Daarna begint er uit het overgebleven kalium-40 opnieuw argon-40 te ontstaan; dat blijft in de steen ingesloten en de daaruit bepaalde ouderdom levert ons dus de tijd die verliep sinds de meteoriet zijn laatste hevige thermische storing ondervond. De gevonden waarden variëren van 0,5 tot 4,4 miljard jaar.

Uit onderzoek van de duizenden meteorieten uit Antarctica blijkt dat de gemiddelde samenstelling van de soorten chondrieten met de tijd verandert. De afgelopen tien miljoen jaar vielen op aarde veel gewone chondrieten, maar vroeger was dat anders. De reflectiespectra van ijzermeteorieten vertonen geen bijzondere kenmerken. Uit de snelheid waarmee ijzermeteorieten zijn afgekoeld, volgt dat ze diep in flinke planetoïden zijn ontstaan. De bepaling van die afkoelsnelheid is echter in discussie, want enkele recente experimenten die rekening houden met de invloed van fosfor op de Widmanstättenfiguren wijzen erop dat de afkoelsnelheid

heel wat groter is geweest. Als dat juist is zijn ze diep in lichamen van slechts enkele kilometers ontstaan of dicht bij het oppervlak van een of meer grotere lichamen.

De meeste problemen deden zich voor om het ontstaan van de achondrieten te begrijpen. Het spectrum van de eucrieten vertoont een sterke absorptieband bij 950 nm van pyroxeen en komt zeer fraai overeen met dat van de planetoïde Vesta. Afb. 14. De diameter van Vesta bedraagt ca 550 km. Er zijn geen andere planetoïden ontdekt met een spectrum zoals de eucrieten. Uit het feit dat in de eucrieten bij lage druk drie mineralen vrijwel gelijktijdig zijn gekristalliseerd concludeert men dat het hemellichaam waarop ze ontstonden klein was. Omdat de diogenieten vaak met eucrieten vermengd zijn en breccies vormen (die dan **howardieten** genoemd worden) ondersteunt dat de gedachte dat ze samen gevormd zijn op hetzelfde hemellichaam, waarschijnlijk de planetoïde Vesta.

Rectificatie

Databases als hulp voor de mineralenverzamelaar

Om het systematiseren, determineren en catalogiseren van mineralencollecties in goede banen te leiden zijn voor de PC diverse programma's ontwikkeld. Zes van deze programma's werden in het maantnummer van *Gea* door dr. ir. W.J. Toetenel op hun bruikbaarheid getest en met zg. *screen dumps* geïllustreerd. Door een hoogst ongelukkige en wel zeer fatale communicatiestoornis tussen de auteur en de redacteur - waarvoor de laatste zich geheel verantwoordelijk beschouwt - zijn 6 van de 9 afbeeldingen niet op hun goede plaats terechtgekomen. De hulp voor de verzamelaar leidde daarmee eerder tot chaos dan tot systeem!

Op de volgende pagina worden nu de eerste en de laatste drie figuren nogmaals afgebeeld, ditmaal in de goede volgorde en met de juiste bijschriften, zodat wie dit wil de afbeeldingen kan uitknippen en op hun eigen plaats in het artikel plakken. Excuses voor dit ongemak!

J. Stemvers-van Bommel