Meteorieten van Mars, iets heel aparts

door C.E.S. Arps,
Nationaal Natuurhistorisch Museum / NATURALIS, Leiden
Postbus 9517, 2300 RA Leiden, e-mail charps@planet.nl

Meteorieten zijn buitenaardse gesteenten die door de zwaartekracht van de Aarde zijn aangetrokken, de dampkring gepasseerd en getrotseerd hebbend (grotendeels) intact op het aardoppervlak terecht zijn gekomen. We spreken pas van een meteoriet als de steen is gevonden. Vrijwel alle meteorieten zijn fragmenten van *asteroïden*, gesteenten die in het heelal rondzwerven in een baan om de zon. Meteorieten zijn een bron van informatie over het ontstaan van ons zonnestelsel.

Een klein aantal meteorieten is afkomstig van onze *maan* en de planeet *Mars*. Deze meteorieten zien er heel anders uit en zijn daarom lange tijd een probleem geweest, totdat hun herkomst kon worden vastgesteld. Maar hoe zijn deze stenen op Aarde terecht gekomen?

Inslagen op Mars

Asteroïden komen niet alleen terecht op de Aarde, maar worden ook ingevangen door andere planeten, manen en andere asteroïden. Zo kan het gebeuren dat grote *asteroïden*, lichamen met een diameter van tenminste 150 tot 200 m, inslaan op bijvoorbeeld Mars. Bij zo'n zware *impact* kunnen gesteentefragmenten worden losgeslagen en weggeschoten met zo'n grote snelheid dat ze buiten het bereik van de aantrekkingskracht van deze hemellichamen komen. Deze fragmenten kunnen – soms na een verblijf van enige miljoenen jaren in de ruimte – op een veel later tijdstip als meteoriet op onze planeet terecht komen.
Wetenschappers spreken bij meteorieten van een *'vondst'* (find) of een *'val'* (fall). Wanneer niets bekend is over het moment van de val van de meteoriet, hebben we het over een vondst. We spreken van een val wanneer tijdstip en plaats van de inslag bekend zijn. Meteorieten krijgen de *naam* van de dichtstbijzijnde plaats (met postkantoor) waar ze zijn ingeslagen, of ze krijgen een speciaal vastgestelde registratiecode, bijvoorbeeld de meteorieten die in woestijngebieden of op Antarctica zijn gevonden.
De melding en registratie van nieuwe meteorieten en de uiteindelijke publicaties verschijnen in tijdschriften als 'The Meteoritical Bulletin' en in 'Meteoritics & Planetary Science'. Ook op het *internet* is van alles te vinden over meteorieten en nieuwe meteorietvondsten. Deze websites worden niet alleen verzorgd door de NASA of het Natural History Museum (Londen) maar ook door diverse handelaren.
Het is duidelijk dat nieuwe meteorieten al snel in handen komen van de handel en dat goede contacten met bonafide handelaren essentieel zijn om (tijdelijk) aan niet-geregistreerd materiaal voor onderzoek te komen.

De verschillende soorten meteorieten

Van de 24.763 geregistreerde meteorieten die op onze Aardkorst zijn ingeslagen – *inclusief* de 18.714 exemplaren die op Antarctica zijn gevonden – behoren er 17.840 tot de groep der *steenmeteorieten.* Daarnaast zijn ca. 121 *steen-ijzers* en meer dan 885 *ijzermeteorieten* bekend (Tabel I). Het aantal nieuwe meteorieten groeit gestadig, alleen al uit Antarctica worden er per jaar ca. 200 nieuwe vondsten verwacht. Maar ook de grote woestijngebieden, met name de Sahara en het Arabisch Schiereiland, laten zich niet onbetuigd.

Steenmeteorieten worden onderverdeeld in *chondrieten* (17.109) en *achondrieten* (731). Chondrieten zijn buitenaardse (extra-terrestrische) gesteenten die door samenklontering van 'oermateriaal' – accretie tot asteroïden en planetoïden – zijn ontstaan tijdens de vroegste geschiedenis van ons zonnestelsel, 4,6 miljard jaar geleden. Deze meteorieten worden gekenmerkt door de aanwezigheid van *chondrules*, ronde bolletjes van millimeterformaat (afb. 1). Dit zijn *smeltdruppels*, door opsmelting van oerstofdeeltjes ontstaan, die in de ruimte weer snel zijn afgekoeld.

Afb. 1. Dunne doorsnede onder gekruiste polarisatoren van een olivijnchondrule in de L6-chondriet Mócz, Roemenië, RGM 65892. (Foto P. Stemvers, frontpagina van Gea, juni 2003, nr.2. In deze uitgave is a.h.v. foto's uitgebreid aandacht besteed aan het petrografisch karakter van chondrules).

Op grond van hun (chemische) samenstelling worden H-, L- en LL-chondrieten, C-chondrieten, R-chondrieten en E-

chondrieten onderscheiden. Mogelijk zijn deze chondriettypen te correleren met verschillende *parent-bodies*. Op basis van latere rekristallisaties en gesteentevormende processen, met name thermometamorfose in de grotere planetoïden, is de omvangrijke groep chondrieten onder te verdelen in *zes (of zeven) petrografische typen*.
Chondrieten kunnen ook worden geclassificeerd door de *intensiteit van schokmetamorfose* die zij hebben ondergaan. Dit kan vastgesteld worden door bestudering van olivijn in slijpplaatjes. Ook het petrografische karakter van chondrules toont grote verschillen; er worden zeven *texturele typen* onderscheiden (zie ook Norton, 2002 en Gea, juni 2003, nr. 2, p. 40).

Achondrieten zijn kristallijne gesteenten die uit een magma (de hoogste graad van thermometamorfose) zijn ontstaan. Het zijn dus – evenals steen-ijzers en ijzermeteorieten – producten van differentiatie en opsmelting in het binnenste gedeelte van een planetoïde of planetaire *parent-body*. Achondrieten bevatten geen chondrules meer. Een klein aantal z.g. primitieve achondrieten kunnen beschouwd worden als overgangstypen tussen chondrieten en gedifferentieerde (asteroïdische) achondrieten.
Ook meteorieten die afkomstig zijn van de planeet Mars en onze maan worden tot de groep van de *achondrieten* gerekend. Maar ze hebben wel een (geheel) andere wordingsgeschiedenis.

Hoe herkennen we een meteoriet?

Het herkennen van een meteoriet is meestal erg moeilijk. Het vereist veel ervaring; je moet er veel gezien hebben om te kunnen vermoeden dat het echt om een meteoriet gaat. Een karakteristieke eigenschap van een onverweerde steenmeteoriet is de glimmend *zwarte smeltkorst* van ongeveer 1 mm dikte en het vrij gladde oppervlak (afb. 2 en 3).

Afb. 2. Een 12-cm breed fragment van de Mbale meteorietenregen (Mbale, Uganda, 'val', 14 augustus 1992) met een dunne volledige smeltkorst, die bij de val op de Aardkorst iets is beschadigd. (collectie Naturalis)

De meeste steenmeteorieten zijn (enigszins) beschadigd, maar ze bezitten vrijwel altijd nog een stukje goed bestudeerbare smeltkorst. Het gesteente zelf is doorgaans donkergrijs; in *chondrieten* zijn vaak met de loep goed herkenbare chondrules te zien. Maar als het gaat om een *achondriet*, of meer specifiek, om een SNC-meteoriet (een meteoriet afkomstig van Mars) of een lunaïet (een meteoriet afkomstig van onze maan), dan doet de steen meer denken aan bepaalde (mafische) Aardse gesteenten zoals basalt of peridotiet (zie hierna).
Is er helemaal geen smeltkorst te zien, dan wordt herkenning uiterst moeilijk en dan gaan andere criteria een grote rol spelen, zoals het voorkomen van die steen in een omgeving waar je hem geologisch niet zou verwachten (afb. 3).
IJzer- en steen-ijzermeteorieten zijn veel zwaarder, sterk magnetisch en ze zien er, zowel uitwendig als in doorsnede, weer heel anders uit (Arps, 2000).

Afb. 3. Mars-meteoriet Sayh al Uhaymir 150, een olivijn-fyrische shergottiet, bij zijn vindplaats op een grindplateau in de Omani woestijn (Oman). Let op de zwarte smeltkorst van de meteoriet. (Walton et al., 2005).

Antarctica en woestijngebieden: schatkamers van meteorieten

In 1969 vonden Japanse onderzoekers van het *Zuidpoolgebied* voor het eerst concentraties van meteorieten in specifieke gebieden zoals de Yamatoheuvels. Deze meteorieten zijn in de laatste paar miljoen jaar op het poolijs ingeslagen en daarna door de gletsjers meegevoerd. Morfologische

Tabel 1. Alle meteorieten die op Aarde terecht zijn gekomen
Naar gegevens van Norton/Pauli (2002), aangevuld door C.E.S. Arps (2006)

soort	*val*	*vondst*	*totaal*
STENEN	**950**	**16890**	**17840**
chondrieten	871	16238	17109
achondrieten excl Mars/Maan	75	592	667
Maan: (lunaieten)	0	27	27
Mars: SNC meteorieten	4	33	37
STEEN IJZERS	**13**	**108**	**121**
IJZERS	**47**	**838**	**885**
twijfelachtige meteorieten	148	108	256
(werkcollectie Antarctica)		5661	5661
TOTALEN *alle meteorieten*	**1158**	**23605**	**24763**
waarvan *alleen* op Antarctica	geen	18714	18714
en *elders* op Aarde	1158	4891	6049
Mars: SNC-meteorieten per maart 2005			
	val	***vondst***	***totaal***
gevonden gesteenten of fragmenten	43*	57	100
geregistreerde meteorieten	4	33	37
- waarvan gevonden op Antarctica		12	12
- en in woestijngebieden		18	18

** inclusief 40 fragmenten bij Nakhla*

Tabel 2. Geregistreerde SNC-meteorieten (Mars) versie: 6 maart 2006
SNC: genoemd naar de oudste vindplaatsen S=Shergotti, India, N=Nakhla, Egypte en C=Chassigny, Frankrijk

nr.	naam/code	vindplaats	datum	gram	opmerkingen
Basaltische shergottiet					
1	Shergotty	Bihar, India	25/08/1865	4000	val
2	Zagami	Katsina, Nigeria	10/3/62	18000	val
3	QUE 94201	Q.Alexandria Range, Antarctica	12/16/94	12	
4	Los Angeles 001	Californië, USA	10/30/99	452,60	
	Los Angeles 002	Californië, USA		245,40	
5	Dhofar 378	Dhofar, Oman	6/17/00	15	
6	NWA 480	NW-Afrika, Marokko	2000-2001	98	
	NWA 1460	NW-Afrika, Marokko			
7	NWA 1669	NW-Afrika, Marokko	in januari 2001	36	
8	NWA 856	NW-Afrika, Marokko	in maart 2001	320	
9	NWA 3171	NW-Afrika, Algerije	in 2004	506	
10	NWA 2975	NW-Afrika, Marokko	in 2005	70	
Olivijn-phyrische shergottiet					
11	EETA 79001	Elefant Moraine, Antarctica	1/13/80	7900	
12	DAG 476	Dar al Gani, Sahara, Lybië	6/1/98	2015	
	DAG 489		in 1997	2146	
	DAG 735		in 1997	588	
	DAG 670		in 1998	1619	
	DAG 876		in 1998	6,20	
	DAG 975				
	DAG 1037				
13	Y 908459	Yamato Hills, Antarctica	12/4/98	82	
14	Dhofar 019	Dhofar, Oman	1/24/00	1056	
15	SAU 005	Sayh al Uhaymir, Oman	11/26/99	1344	3 fragmenten
	SAU 008		11/26/99	8579	2 fragmenten
	SAU 051		8/1/00	456	
	SAU 094		2/8/01	223,30	
	SAU 060			42,28	(SAU: strooiveld
	SAU 090			94,84	van 3,6 x 2 km)
	SAU 120			75	
	SAU 150	SAU, Ghaba, Oman	10/8/02	107,70	
	SAU 125			31,70	
	SAU 130			27,80	4 fragmenten
	SAU 131				
16	NWA 1068	NW Afrika, Maarir, Marokko	2001-2002	∑ 15000	
	NWA 1110			772	
	NWA 1075				
	NWA 2373			18	
	NWA 1183				
17	NWA 1195	NW Afrika, Saf Saf, Marokko	in maart 2002	320	
18	NWA 2046	NW Afrika, Lakhbi, Algerije	in september 2003	63	
19	NWA 2626	NW Afrika, Marokkko	in 2004	31	
lherzolitische shergottiet					
20	ALH 77005	Allan Hills, Antarctica	12/29/77	48	
21	Y 793605	Yamato Hills, Antarctica	in 1979	18	
22	LEW 88516	Lewis Cliffs, Antarctica	12/22/88	13	
23	GRV 99027	Grove Mountain, Antarctica	2/8/00	10	
24	NWA 1950	NW Afrika, Atlas, Marokko	in januari 2001	812	2 fragmenten
25	NWA 2646	NW Afrika, Algerije/Marokko	in 2005	9	
26	GRV 20090	Grove Mountain, Antarctica	in 2005	7	
27	Y 1075	Yamato Hills, Antarctica	?	55	
Nakhliet (clinopyroxeniet shergottiet)					
28	Nakhla	Alexandrië, Egypte	6/28/11	10000	val
				(40 stenen met smeltkorst)	
29	Lafayette	Indiana, USA	in 1931	800	in universiteitscoll.
30	Governador Valadares, Minas Gerais, Brazilië		in 1958	160	
31	Y 00593	Yamato Hills, Antarctica	in 2000	∑ 15022+	
	Y 00749				
	Y 00802				
32	NWA 817	NW Afrika, Marokko	in december 2000	104	
33	NWA 998	NW Afrika, Algerije/Marokko	in september 2001	456	
34	MIL 03346	Miller Range, Antarctica	12/15/03	715	
Chassigniet (duniet shergottiet)					
35	Chassigny	Haute Marne, Frankrijk	15/10/1815	4000	val
36	NWA 2737	NW Afrika, Marokko	in 2004	611	
Orthopyroxeniet shergottiet					
37	ALH 84001	Allan Hills, Antarctica	12/27/84	1900	

NB. Nrs.4, 6, 12, 15, 16 en 31: Door sterke wrijving met de dampkring heeft fragmentering plaatsgevonden.
Van de SAU-shergottiet zijn reeds 17 fragmenten gevonden (nog niet alle beschreven); er kunnen in dit strooiveld nog meer fragmenten worden gevonden. SAU-005 shergottiet is bij de inslag gebroken, er zijn 3 fragmenten gevonden.

drempels vormen daar plaatselijk obstakels voor de ijsstromen, waardoor het ijs niet verder kan, omhoog wordt gestuwd en daarna door erosie verdwijnt. De meteorieten blijven op het oppervlak achter en zijn sindsdien in grote hoeveelheden gevonden (zie Tabel I). Japanse en Amerikaanse teams hebben inmiddels meer dan 18.700 meteorieten verzameld waarover regelmatig wordt gepubliceerd. De meteorieten van Antarctica zijn zeer goed gepreserveerd en bij het verzamelen worden strenge regels in acht gehouden om iedere vorm van contaminatie te vermijden.
Vooral in de laatste decennia zijn ook veel meteorieten gevonden in de *woestijngebieden* van de Sahara, het Arabisch schiereiland en de Nullabor Plains in Zuid-Australië. De meeste van de tot nog toe bekende SNC's zijn in de Sahara en Arabië gevonden (zie Tabel II).

Welke mineralen vinden we in meteorieten

In meteorieten zijn ongeveer 275 mineralen aangetroffen. Slechts enkele als *hoofdbestanddeel*, verreweg de meeste zijn *accessorisch*. Sommige accessorische mineralen kunnen in een bepaalde meteoriet het hoofdbestanddeel zijn, zoals *fassaïet* in angriet (een achondriet) en *anorthiet* in eucriet (een achondriet).
De meest voorkomende mineralen zijn:

Olivijn: hoofdbestanddeel in chondrieten, pallasieten en sommige achondrieten.
De meeste olivijnen zijn Mg-rijk (*forsteriet*).
Fayaliet is de ijzerrijke olivijnvariant, meestal niet meer dan fa=30. Het fa-gehalte is diagnostisch voor de petrografische indeling van gewone chondrieten.

Pyroxeen: hoofdbestanddeel in de meeste meteorieten.
Orthopyroxeen: de Mg-rijke variant – *enstatiet* – is een belangrijk mineraal in alle gewone en de koolstofrijke chondrieten; bovendien is het het hoofdbestanddeel in *enstatietchondrieten*, *achondrieten* en *basaltische achondrieten*.
Hyperstheen is Fe-rijker en vormt een belangrijk bestanddeel in diogeniet (een achondriet) en L-chondrieten.
Clinopyroxeen: de Mg-rijke variant – *clino-enstatiet* – komt vooral voor in gewone chondrieten.
Diopsied, Ca-Mg-rijk, wordt aangetroffen in enstatiet-chondriet, aubriet (een achondriet) en mesosideriet (een steenijzer).
Augiet, Ca-rijk, is accessorisch in eucriet (een achondriet) en nakhliet (een SNC) en is een belangrijk mineraal in shergottiet (een SNC).
Fassaïet, eveneens Ca-rijk, is meestal accessorisch. Er is één meteoriet bekend, een angriet (een achondriet), die voor meer dan 93% uit dit mineraal bestaat.
Pigeoniet, Ca-arm, is belangrijk in eucriet (een achondriet) en shergottiet (een SNC).

Veldspaten
Plagioklaas wordt regelmatig aangetroffen.
Albiet is zeldzaam in SNC-meteorieten. Oligoklaas is soms aanwezig in gewone (H-, L- en LL-) chondrieten.
Anorthiet is meestal accessorisch in chondrieten en achondrieten, maar is een belangrijk bestanddeel in eucriet (een achondriet).
De alkaliveldspaat *orthoklaas* wordt maar heel zelden in meteorieten aangetroffen.

Grafiet is vooral bekend van de C-chondrieten, maar komt ook regelmatig voor in andere steenmeteorieten en ijzermeteorieten, als koolstofnodules (samen met *troïliet*) waarin soms *diamant* (*lonsdaleïet*) wordt aangetroffen.

Kamaciet, een Fe–Ni-legering met 4–7,5% Ni, en ***taeniet***, een Ni–Fe-legering met 27–65% Ni, zijn hoofdbestanddelen in de ijzermeteorieten en steen-ijzers. Ze komen meestal accessorisch voor in de overige steenmeteorieten.

Plessiet is een fijnkorrelige vergroeiing van kamaciet en taeniet.

Schreibersiet, een ijzer-nikkelfosfide, komt als mineraal alleen (accessorisch) in ijzer- en steen-ijzermeteorieten voor.

Troïliet, een ijzersulfide, wordt meestal als nodules aangetroffen in ijzermeteorieten (en dan vaak samen met grafietnodules), en voorts als druppels of korrels in vrijwel alle andere meteorieten en soms ook in chondrules. Troïliet lijkt heel sterk op het bronskleurige Aardse ***pyrrhotien***, eveneens een ijzersulfide, dat accessorisch in bepaalde chondrieten aanwezig is.

Pentlandiet, een bronskleurig Fe–Ni-sulfide, komt accessorisch voor in de meeste chondrieten.

Ilmeniet komt accessorisch voor in achondrieten en basalten afkomstig van de maan (lunaïeten) en Mars (SNC).

Magnetiet is accessorisch in vele chondrieten en achondrieten. Typisch aanwezig in de smeltkorst van steenmeteorieten.

Spinel, een Mg-Al-oxide, en ***chromiet,*** een Fe-Cr-oxide met spinelstructuur, zijn herkenbaar als kleine zwarte (sub)idiomorfe kristallen. Ze zijn accessorisch aanwezig in meteorieten en ook in chondrules.

Diamant wordt heel zelden accessorisch (en samen met grafiet) aangetroffen in ijzermeteoriet en ureïliet (een achondriet). Het is dan een product van *schokmetamorfose*, veroorzaakt door heel hoge druk bij botsingen in de ruimte of bij de inslag op Aarde of een andere planeet. *Lonsdaleïet* is een hexagonale polymorf van het kubische diamant.

Calciet is zeldzaam in meteorieten en komt dan meestal voor in adertjes in bepaalde chondrieten.

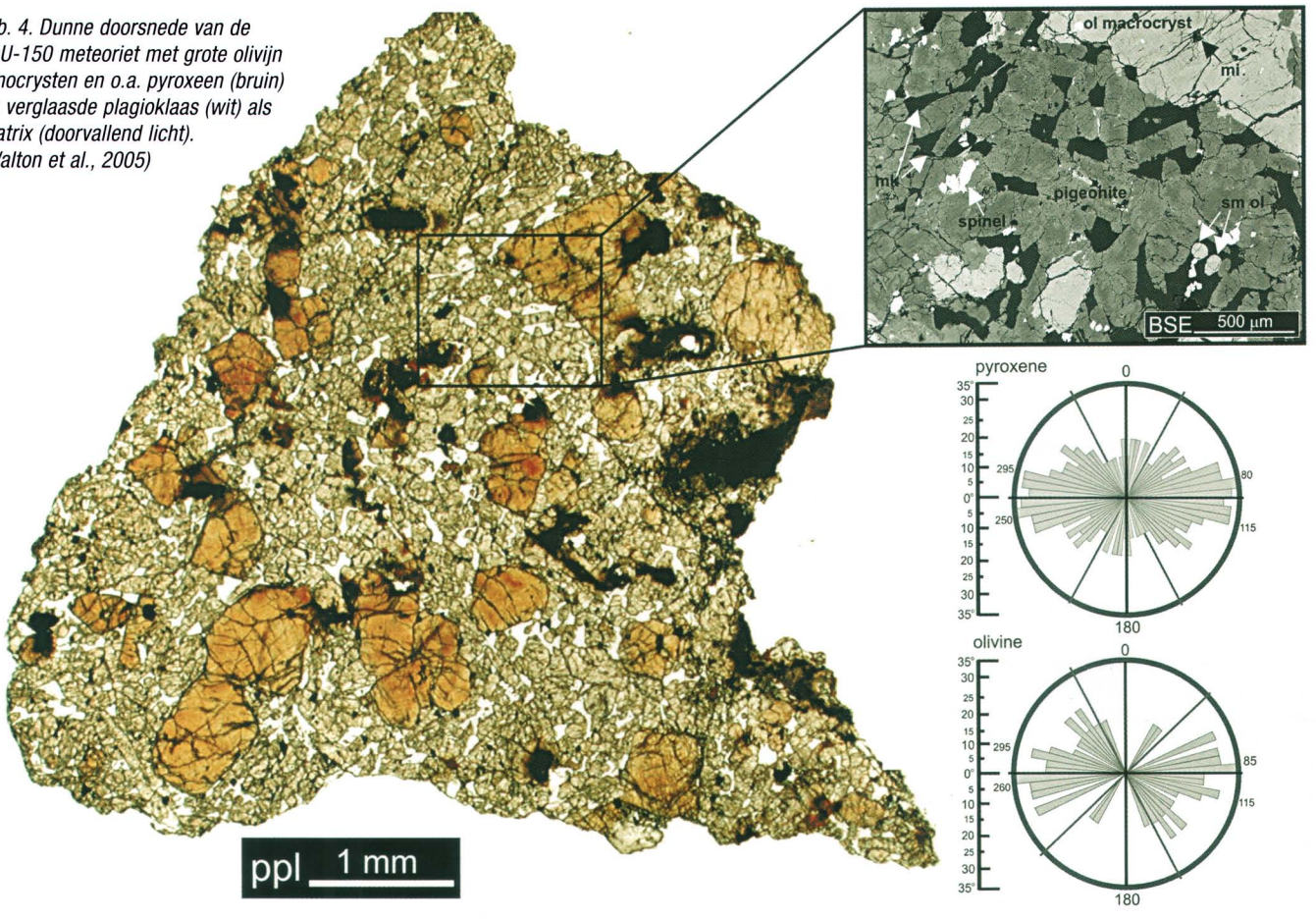
Coesiet en ***stishoviet***, beide zeer-hoge-druk polymorfen van kwarts, zijn typische producten die ontstaan bij de inslag van een grote meteoriet in kwartshoudende gesteenten (Aarde, e.a.).

Maskelyniet is een *glasproduct* met de samenstelling van Ca-rijke plagioklaas, dat is ontstaan door *schokmetamorfose* bij botsingen in de ruimte of bij inslag. Het is typisch voor sommige chondrieten en (plagioklaashoudende) shergottieten (zie afb. 4).

Meteorieten van Mars

Meteorieten van Mars worden aangeduid als *SNC-meteorieten*, waarbij de S staat voor *shergottiet*, de N voor *nakhliet* en de C voor *chassigniet*, de namen van de oudst-bekende SNC's (zie Tabel II).
De SNC's werden al heel lang 'gewantrouwd' want ze zagen er heel anders uit dan 'gewone' meteorieten. Omdat ze veel meer leken op bepaalde Aardse mafische of basaltische gesteenten werd er al langer gedacht aan de mogelijkheid dat het gesteentebrokken waren van een andere planeet of van de Maan.

Shergottieten vormen de grootste groep *asteroïdische achondrieten*. Het zijn stollingsgesteenten (diepte- en vulkanische gesteenten) die veel lijken op overeenkomstige Aardse gesteenten. De meeste shergottieten hebben een ouderdom van ca. 150 tot 200 miljoen jaar.
Deze stenen zijn sterk beïnvloed door schokmetamorfose veroorzaakt door de inslag van de asteroïde die ze heeft



Afb. 4. Dunne doorsnede van de SaU-150 meteoriet met grote olivijn fenocrysten en o.a. pyroxeen (bruin) en verglaasde plagioklaas (wit) als matrix (doorvallend licht). (Walton et al., 2005)

weggeslagen van Mars. Dat is vooral goed te zien aan de aanwezigheid van (interstitiële) 'maskelyniet', in glas veranderde plagioklaas, en aan een sterke unduleuze of mozaïekachtige uitdoving van pyroxeen en plagioklaas in het slijpplaatje.
Shergottieten bevatten soms aanwijzingen dat het gesteente op Mars heeft gereageerd met water, wat heeft geleid tot kristallisatie van waterhoudende silicaten, carbonaten (afb. 5) en sulfaten.

Afb. 5. Secundaire oranjekleurige carbonaatkorrels, diameter ca. 200 micron. (foto NASA/JPL)

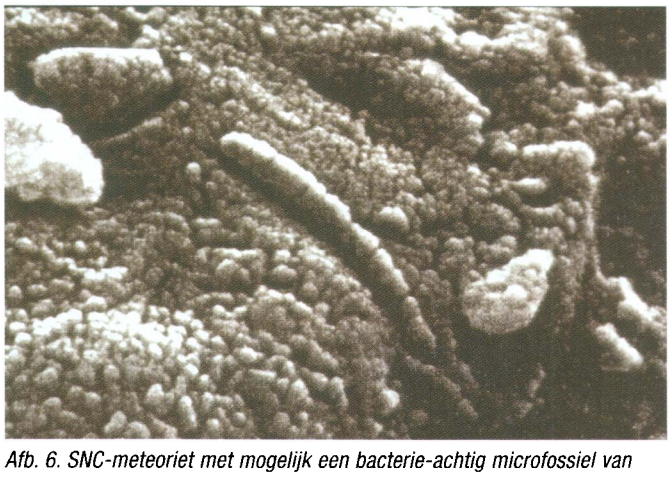
Omdat deze secundaire mineralisaties zijn 'afgeschermd' door de, bij de doortocht door Aardse dampkring ontstane smeltkorst, is het duidelijk dat het hier om 'pre-terrestrische' processen gaat en niet om veel latere Aardse omzettingen.
Er worden twee subgroepen onderscheiden: *basaltische shergottiet* en *lherzolitische shergottiet.*
De basaltische shergottiet bestaat uit de hoofdbestanddelen pigeoniet en augiet met, in mindere mate, verglaasde plagioklaas (maskelyniet). Accessorische bestanddelen zijn olivijn, orthopyroxeen, magnetiet, ilmeniet, pyrrhotien en kwarts.
Lherzolitische shergottieten lijken veel op de Aardse ultramafische gesteenten lherzoliet en harzburgiet.
Zij bestaan voornamelijk uit olivijn en orthopyroxeen en, in mindere mate, clinopyroxeen, maskelyniet en chromiet.
Deze gesteenten zijn te beschouwen als cumulaten in een restsmelt van een mafische magmakamer. Omdat deze gesteenten mineralogisch en chemisch veel overeenkomst vertonen met de basaltische shergottieten, zijn deze laatsten mogelijk op te vatten als de vulkanische producten van een zelfde soort magmahaard. Er zijn ook shergottieten aangetroffen die te beschouwen zijn als overgangstypen.

Nakhlieten, heel zeldzame SNC's, zijn in feite *clinopyroxenieten* die hoofdzakelijk bestaan uit augiet en een weinig olivijn. Hierdoor ziet het gesteente (breukvlak) er groenig uit. Accessorisch zijn plagioklaas, pigeoniet, alkaliveldspaat (heel zeldzaam in meteorieten), ilmeniet, sulfiden en fosfaten aangetroffen. Ook in deze gesteenten zijn sporen van *pre-terrestrische* secundaire mineralisaties (in een waterig milieu) bekend, waaronder amfibool, carbonaat, sulfaat en het kleimineraal iddingsiet. Ook wordt gesuggereerd dat sporen van fossiel bacterieel leven is aangetroffen. Nakhlieten zijn gedateerd op 1,3 tot 1,5 miljard jaar, de secundaire mineralisaties op ca. 700 miljoen jaar.

De type-meteoriet ***chassigniet***, heel lang de enige chassigniet, is een *duniet* die bestaat uit Fe-rijke olivijn (90%), 5% orthopyroxeen, 2% plagioklaas (grotendeels verglaasd), 2% chromiet en overige accessorische bestanddelen, waaronder de amfibool *kaersutiet* als insluitsel in olivijn en secun-

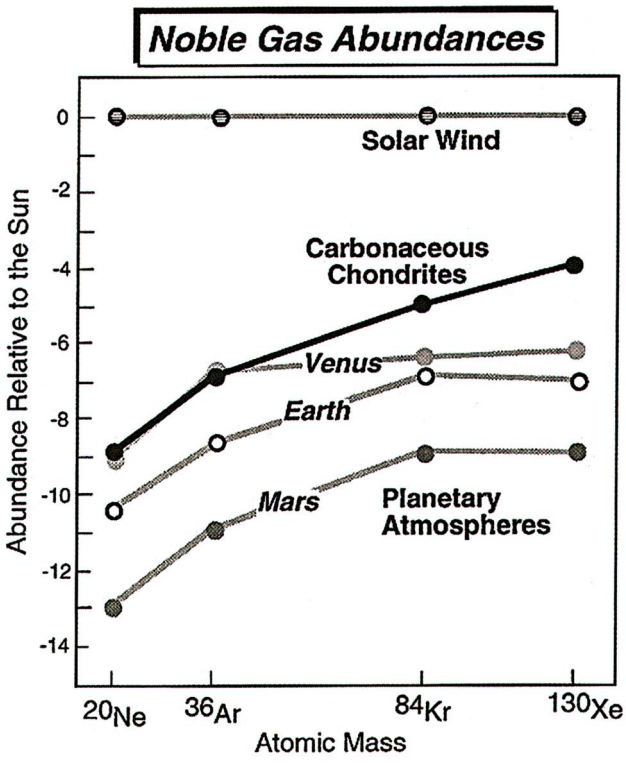
daire carbonaat en sulfaat als barstopvulling.
De 'val' van deze meteoriet is waargenomen in 1815 en deze meteoriet is één van de eerste die werd herkend als *een gesteente uit de ruimte*. De ouderdom van deze meteoriet is bepaald op 1,36 miljard jaar. Sinds 2004 is een tweede chassigniet bekend. Vermoed wordt dat de chassignieten en naklieten misschien afkomstig zijn uit een zelfde *'parent magma'*.

De meest besproken SNC-meteoriet is de in 1984 op Antarctica gevonden Allan Hills 84001. Deze meteoriet heeft, na een eerste onderzoek, lange tijd als *diogeniet*, een andere pyroxeenrijke achrondriet-variëteit, in een kluis gelegen, maar bij hernieuwd onderzoek in 1993 bleek dat het om een geheel nieuwe SNC-variant ging, een ***orthopyroxeniet shergottiet***.
Het gesteente bestaat voor 97% uit Mg-rijke orthopyroxeen en verder accessorisch iets plagioklaas (verglaasd), chromiet en carbonaat . De kristallisatie-ouderdom is ca 4,4 miljard jaar en daarmee is het de oudste Marsmeteoriet. Hij vertegenwoordigt hiermee waarschijnlijk de oudste korst van deze planeet.
Dit gesteente is in een latere fase in aanraking geweest met CO_2-rijke waterige oplossingen, wat heeft geleid tot neerslag van oranjekleurige carbonaatbolletjes (diameter ca 200 micron; afb. 5) in gesteentebarstjes met een waarschijnlijke ouderdom van 3,9 miljard jaar.
Voorts vermoeden wetenschappers in kleine holtes in de oranje bolletjes sporen van biomineralen en een bacterieachtige fossielsoort te hebben aangetroffen (afb. 6) waarover in 1996 in Science (vol. 273, p. 924) is gepubliceerd, maar het laatste woord is daarover nog niet gezegd.

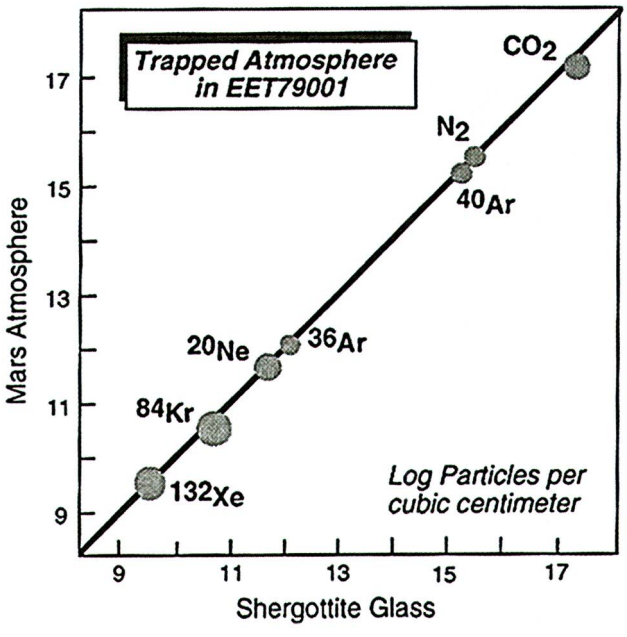


Afb. 6. SNC-meteoriet met mogelijk een bacterie-achtig microfossiel van extraterrestrische oorsprong. (SEM-opname; lengte 110 nm). (NASA/Johnson Space Centre)

Al sinds het midden van de jaren '70 bestaat het vermoeden dat SNC-meteorieten afkomstig zouden kunnen zijn van de planeet Mars. De bewijzen daarvoor kwamen pas na 1983, toen er informatie beschikbaar kwam over het oppervlak (de samenstelling van de atmosfeer) van de planeet Mars via de *Viking Marslanders* (die in 1976 op de planeet landden) en nu ook via de meest recente bezoeken van NASA en ESA aan deze planeet. Die gegevens konden toen worden vergeleken met metingen van gasinsluitsels in interstitieel glas en in glas-'enclaves' in SNC-meteorieten. Aangetoond werden de edelgassen Ne, Ar, Kr en Xe, CO_2, N_2, deuterium (zie ook afb. 7a en 7b), een samenstelling die overeenkomt met de atmosfeer van Mars.



Afb. 7a. Gehalte aan edelgassen in planetaire atmosferen. (H.Y.McSween, 1999)



Afb .7b. De samenstelling van de atmosfeer van Mars, gemeten met behulp van een Viking-Marslander, vergeleken met gassen ingesloten in gasinsluitsels in impact-glas van de shergottiet EET79001, gevonden op Antarctica. (H.Y. McSween, 1999)

Hoeveel meteorieten afkomstig van Mars zijn er?

Tot begin 2006 zijn 100 meteorieten en meteorietfragmenten afkomstig van Mars geregistreerd. Het gaat om 37 inslagen, waarvan vier als *'val'* bekend zijn.
Soms kan bij één meteorietval meer dan één steen op de aardkorst terecht komen. De Sayh al Uhaymir meteorietval, bijvoorbeeld, in het woestijngebied Oman, leverde, heel recent, een serie SNC-vondsten met waarschijnlijk meer

dan 17 gesteentefragmenten (Tabel II). De oorspronkelijke 'asteroïde'(in dit geval een steen van Mars) is bij binnenkomst in de atmosfeer door de enorme wrijving bij het passeren van de dampkring geëxplodeerd. Als één enkelvoudige val resulteert in een groot aantal stenen, die min of meer gelijktijdig inslaan, dan spreken we van een *meteorietenregen*. Deze stenen vallen dan binnen een beperkt gebied, dat *strooiveld* wordt genoemd.
De afmeting van het strooiveld van de Sayh al Uhaymir wordt geschat op twee bij vier km.
Onlangs verscheen in Meteoritics & Planetary Science een publicatie over het elfde fragment (met een volledige smeltkorst, zie ook afb. 3) van de Sayh al Uhaymir meteorietregen. Deze SaU-150 is een olivijn-phyrische basalt, bestaande uit olivijn-fenocrysten (afb. 4) in een grondmassa van pyroxeen en interstitiële *maskelyniet* (verglaasde plagioklaas).
Bij de bestudering van nieuwe meteorietvondsten wordt tegenwoordig met succes rekening gehouden met de mogelijkheid dat de gevonden nieuwe steen deel uitmaakt van een grotere groep ('*pairing*').

Meteorieten van Mars genieten tegenwoordig veel aandacht en er is inmiddels zo veel gepubliceerd over Mars-meteorieten dat het NASA/Johnson Space Centre in 2004 een *Mars Meteoritic Compendium* heeft uitgegeven (auteur C. Meyer) met meer dan 1800 referenties over de SNC-meteorieten.

Hoe oud zijn de Marsmeteorieten

Van meteorieten is bekend dat ze een gemiddelde ouderdom hebben van 4,6 tot 4,4 miljard jaar. De ouderdommen van de meeste SNC's daarentegen, zijn veel lager. Dit is begrijpelijk omdat SNC-meteorieten gesteenten zijn die van de 'Marskorst' zijn weggeslagen, toen Mars, net als de Aarde, een veel gecompliceerdere (meer gedifferentieerde) planetaire ontwikkeling achter de rug had. Meteorieten van Mars hebben, op een aantal uitzonderingen na, een ouderdom van ca 1,3 miljard jaar. Dit geldt voor de SNC's die maar weinig of geen *schokmetamorfose* hebben ondergaan, zoals de chassigniet uit Frankrijk, alle gemeten nakhlieten en de ALH84001.
De ouderdom van de shergottieten is moeilijker te bepalen omdat de meesten in ernstige mate zijn beïnvloed door schokmetamorfose. Hierdoor is het isotoop-geologisch systeem van de getroffen gesteenten sterk verstoord en heeft een *resetting* van de *'isotopische klok'* plaatsgevonden. De gemeten ouderdommen variëren van 1,3 miljard jaar tot 200 miljoen jaar.

Geraadpleegde literatuur

Arps, C.E.S., 2000. Beter één meteoriet in de hand dan tien in de lucht, Grondboor & Hamer, 54(2/3), 55-63.
Grady, M.M., 2000. Catalogue of Meteorites, 5th edition.
McSween, H.Y., 1999. Meteorites and their Parent Planets, 2nd edition.
Moorer, W.R., 2003. Meteorieten en chondrules: Oudste deeltjes van ons zonnestelsel in beeld, Gea, 36 (juni 2003), 33-40.
Norton, O.R., 2002. The Cambridge Encyclopedia of Meteorites.
Walton, E.L., Spray J.G. en Bartoschewitz, R., 2005. A Martian meteorite from Oman: Mineralogy, petrology and shock metamorphism of olivine-phyric basaltic shergottite Sayh al Uhaymir150, Meteoritics & Planetary Science, vol. 40(8), 1195-1214.

Via het internet: Natural History Museum, London; NASA/Jet Propulsion Laboratory; NASA/Johnson Space Centre.

Aanvulling

In het artikel "Mars vanuit een aards perspectief" van Anne Fortuin en Jan Smit in het maart nummer van Gea, wordt op pagina 17 verwezen naar foto 18. Dit moet zijn foto 18a.

De tekst bij deze foto is als volgt:
Op de curieuze afbeelding 18a is nog meer te zien. De kraterrand en vulkaanhelling zijn namelijk doorbroken door een flink dal. Er moet dus ooit water uit de vulkaankrater gestroomd zijn. Misschien is er ijs gesmolten door de nabije inslag en is dit water vanuit de caldera in de elliptische inslagkrater gestroomd. Deze krater is in elk geval duidelijk gevuld met sediment dat uit de veel hogere vulkaan afkomstig is. Een andere verklaring is dat latere vulkanische activiteiten gesmolten ijs in water heeft omgezet, dat vervolgens uit het kratermeer gestroomd is in de inslagkrater. Door het rustige, bijna meanderende, karakter van het dal is het laatste waarschijnlijker.

Afb. 18a. Grote vulkaankegel met kratermeer dat leeggestroomd is in de ellipsvormige inslagkrater rechts van de vulkaan.