

---

# VERDWIJNEN EN OPNIEUW BEGINNEN

## het verhaal van het uitsterven op de Krijt - Tertiair-grens

door J. Smit

---

Massaal uitsterven van dier- en plantensoorten is nauw verbonden met weer opnieuw beginnen van nieuwe soorten. Het massale verdwijnen van soorten, dominante soorten, is zelfs noodzakelijk voor het snelle verloop van de evolutie, omdat een dergelijke gebeurtenis de weg vrij maakt voor soorten die anders geen enkele kans zouden hebben gekregen. Het uitsterven op de Krijt - Tertiair-grens is één van die ingrijpende gebeurtenissen. Een gedetailleerde bestudering van die grens kan niet alleen licht werpen op andere perioden van uitsterven en opnieuw beginnen, maar ook op processen in het normale milieu, dat toen kennelijk catastrofaal verstoord is geweest. Sterk generaliserend kunnen we zeggen, dat twee hypothesen om uitsterven te verklaren tegenwoordig om erkenning strijden: de hypothese van de inslag van een of meer grote hemellichamen, en de hypothese van een sterke toename van vulkanisme. De eerste hypothese gaat uit van een "externe" oorzaak, iets van buiten de aarde en dus een mechanisme dat niets met normale aardse processen te maken heeft. De tweede is een "interne" oorzaak, een mechanisme dat nauw in verband staat met aardse geologische processen als vulkanisme, klimaatveranderingen, plaat-tektoniek of zeespiegel-fluctuaties. Leggen we de ondersteunende feiten van beide hypothesen naast elkaar, dan zijn daarmee geen van beide op dit moment echt te bewijzen of te verwerpen, maar met de inslag-theorie zijn wel verreweg de meeste feiten veel eenvoudiger te verklaren.

### Inleiding

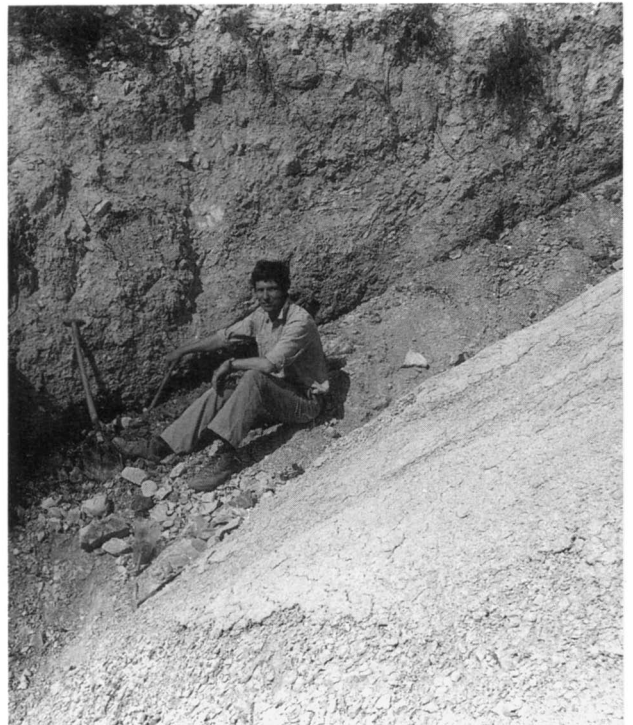
Het onderzoek naar de oorzaken van het uitsterven van onder andere de dinosauriërs, wel de bekendste slachtoffers van de ramp op de Krijt - Tertiair-grens, was tot 1979 meer een hobby van geologen die zich naast hun "serieuze" werk bezig hielden met het opwerpen van steeds wildere en exotische hypothesen om het verdwijnen van de sauriërs te verklaren. Bij gebrek aan bewijs of goed feitenmateriaal was dat ook mogelijk, want wie weet is zo'n speculatie nog waar ook, en een primeur is ook in de geologische wetenschap mooi meegenomen. In 1979 is deze situatie drastisch veranderd met de vondst van een abnormale hoeveelheid van het metaal iridium in een dun laagje klei, dat gesteenten van het Mesozoïcum en van het Cenozoïcum van elkaar scheidt. Voor het eerst was er een "tastbaar" en in ieder geval meetbaar feit gevonden, dat zou kunnen bijdragen tot de oplossing van het raadsel van het verdwijnen van de sauriërs en andere levensvormen, zoals de ammonieten. De vondst van iridium was aanleiding voor het opstellen van de asteroïde-inslaghypothese (Alvarez et al., 1980; Smit en Hertogen, 1980). Naar aanleiding van deze hypothesen zijn zeer gedetailleerde onderzoeken gestart, die veel en goed feitenmateriaal hebben aangedragen. De hoeveelheid literatuur over de Krijt - Tertiair-grens is na 1979 dan ook meer dan vertienvoudigd.

Beide hypothesen, inslag of vulkanisme, hebben consequenties en leiden tot voorspellingen die getoetst kunnen worden. Voor die

toetsing zijn een aantal geologische feiten relevant, al is niet iedereen het er over eens welk feit wel en welk niet belangrijk is in deze discussie (Officer en Drake, 1985). Hieronder zal ik een aantal punten die ikzelf essentieel acht voor de discussie doorlichten, en argumenteren waarom ze wel of niet van belang zijn.

### Extinctie

De manier waarop soorten verdwijnen zou een eerste aanwijzing moeten geven voor de oorzaken van het uitsterven, al kan je aan een fossiel moeilijk nagaan waarom hij is doodgegaan. Er is nog geen enkel fossiel bekend, dat zo misvormd is dat het aanwijzing geeft voor de manier van uitsterven, zoals seniliteit of ziekte. De bekende perioden van uitsterven (Laat-Devoon, Perm - Trias-grens, Laat-Trias, Cenomaan - Turoon-grens, Krijt - Tertiair-grens, eind Eoceen) lijken in verloop, omvang, de ecologische selectie van de uitgestorven soorten, weinig op elkaar. Dit maakt het opstellen van een universele "extinctie-theorie" moeilijk. Het is dus waarschijnlijk, dat er geen universele theorie is. Een ander



Afb. 1. De Krijt - Tertiair-grens in de Barranco del Gredero, nabij Caravaca in de provincie Murcia in Zuid-Spanje. De voormalige zee was op deze plaats ongeveer 1000 meter diep, de zeebodem bestond toen uit diepzeeslik. De grenslaag zelf is een 10 cm dikke, donkere kleilaag die scheefgesteld is door de Alpiene plooiing van het Betische gebergte van Zuid-Spanje. Onder en boven de grenslaag is precies dezelfde soort mergel ontsloten. De pelagische dier- en plantskeletjes, die 80% van deze mergels uitmaken, zijn daarentegen totaal verschillend.

obstakel voor het vergelijken van verschillende extincties is het beschikbare geologische feitenmateriaal. Van de Krijt - Tertiair-grens bijvoorbeeld is veel meer bekend dan van de Perm - Trias-grens of van het laat-Eoceen. De Perm - Trias-grens (235 miljoen jaar geleden) is natuurlijk een stuk ouder dan de Krijt - Tertiair-grens (66,45 miljoen jaar geleden) en er is geen oceaانبodem meer van die ouderdom. Maar ook het aardse milieu is van belang. Valt een extinctie midden in een "rustige" periode of is het mondiaal onrustig? Het laat-Eoceen - Oligoceen is maar magertjes ontsloten, omdat er toen tektonisch veel gebeurd is (de plooiingsfase van de alpiene gebergten). In de Betische Cordilleren (Spanje) is de Krijt - Tertiair-grens op tientallen plaatsen ontsloten, alhoewel niet altijd compleet, maar vaak is de faciës onder en boven de Krijt - Tertiair-grens dezelfde. Afb. 1. Een beetje fatsoenlijke Eoceen - Oligoceen-grens daarentegen is er nergens in Spanje, er is altijd een groot hiaat, of een scherpe faciës-overgang. De veel gehoorde opmerking dat het geologisch onrustig zou zijn geweest in het laatste Krijt is dan ook onjuist.

Tot de slachtoffers van de Krijt - Tertiair-grens behoren natuurlijk de dinosauriërs. Maar op het vasteland zijn er meer slachtoffers. Onder de zoogdieren verdwijnen grote groepen buideldieren uit Noord-Amerika. Van de vogels is weinig bekend, maar spectaculaire veranderingen in de soorten van grote vogels die aan de oevers van rivieren leven schijnen er niet te zijn. Over insecten weten we niets. Dieren die leven in en rond stromend water daarentegen schijnen niet of nauwelijks getroffen te zijn. Vergelijkbare soorten van onder andere steuren, zoetwater-haaien, zoetwatergeep, krokodillen, schildpadden, slangen, komen vlak onder en boven de KT-grens voor.

Ook de landplanten veranderen, maar hoe spectaculair dat is hangt af van de schaal waarop men de veranderingen bekijkt. In het groot, op een schaal van enkele miljoenen jaren, verschillen de flora's van Boven-Krijt en Paleoceen (Onder-Tertiair) maar heel weinig van elkaar; in essentie zijn ze gelijk. De grootste veranderingen waren al in het Onder-Krijt gebeurd, met de opkomst van de angiospermen (bedektzadigen). Op een schaal van honderden jaren echter verandert er heel veel, vooral ecologisch, maar bijna gelijke flora's herstellen zich ook weer snel. Als men niet op de centimeter nauwkeurig de stratigrafie van de Krijt - Tertiair-grens bekijkt, dan is die verandering niet te zien. In een paar honderd jaar na de KT-grens zelf verdwijnen tijdelijk de meeste angiospermen; ze worden vervangen door varens, soms van maar een enkele soort. Een klein aantal soorten angiospermen, alleen bekend van stuifmeel, verdwijnt en komt ook niet meer terug.

Het feitenmateriaal van de veranderingen op het land is niet al te nauwkeurig en daardoor zeer vatbaar voor verschillen in interpretatie. De fluviatiele sedimenten (rivierafzettingen) waarin de vertebraten bewaard zijn gebleven zitten vol met niet in te schatten hiaten. Zo zijn Bill Clemens en David Archibald (1982) ervan overtuigd, dat alle dinosauriërs enige tien- tot honderdduizenden jaren vóór de KT-grens verdwenen zijn, omdat het hoogste en jongste dinosaurus-skelet of bot een meter of drie onder de KT-grens zou voorkomen. J. Keith Rigby Jr en Bob Sloan (1987) daarentegen menen stellig, dat dezelfde dinosauriërs nog enige tijd na de KT-grens doorgaan. En dan is het ook nog de vraag of het aantal dinosauriërsoorten plotseling of reeds lang voor de KT-grens is afgenomen en dat hun laatste verscheiden slechts de genadeslag is geweest. Deze laatste interpretatie wordt door vele paleontologen onderschreven, maar met name Dale Russell (1982) heeft dat altijd bestreden.

De voorstanders van uitsterven vóór of uitsterven ná de KT-grens zijn gebonden aan het type vindplaats;

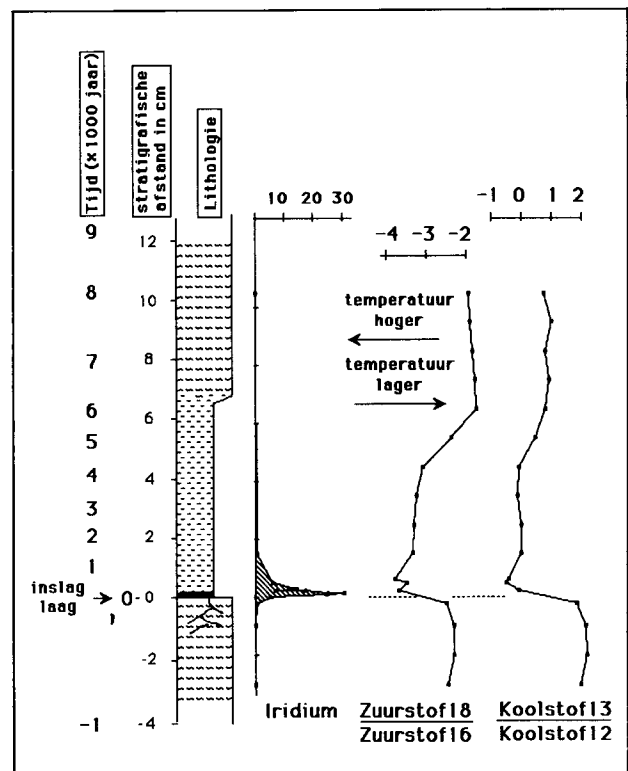
a) grote, vaak nauwelijks getransporteerde fossielen worden gevonden in sedimenten, afgezet in uiterwaarden, en dergelijke botten verdwijnen schijnbaar een drietal meters onder de KT-grens. Door intensief speurwerk is inmiddels het "hoogste, grote bot" niet drie meter, maar tot op een 30 cm de KT-grens genaderd (Bohr et al., 1986);

b) kleinere, uitgespoelde botresten en tanden uit de bodem van riviergeulen en meanders komen ook boven de KT-grens voor, zij het dat deze riviergeulen in Krijt-sedimenten insnijden. De dinosauriër-fossilresten in de laatste soort vindplaats kunnen natuur-

lijk door erosie uit Krijt-sediment gespoeld zijn.

Het is moeilijk hard te maken, dat er dinosaurus-soorten al enige miljoenen jaren voor de KT-grens verdwijnen. Volgens Dale Russell (1982) is dat een consequentie van het verzamelen: als er meer fossielen worden gevonden, dan komen daar ook meer soorten uit tevoorschijn, omdat in kleine collecties de zeldzame soorten niet voorkomen. Er zijn veel meer fossielen bekend uit de Red Deer river formatie en de Judith river formatie van Campanien - Onder-Maastrichtien-ouderdom, dan van de Boven-Maastrichtien-formaties van Hell Creek en Lance Creek. Die grotere soortenrijkdom komt bovendien voort uit de diversificatie van maar één familie van de dinosauriërs in het Campanien: de hadrosauriërs. Bizarre adaptaties van o.a. de schedel (*Parasaurolophus*!) lenen zich gemakkelijk voor het taxonomisch opsplitsen van soorten, die zonder die kenmerken alle in één geslacht zouden zijn ingedeeld. In het Boven-Maastrichtien is van die groep nog maar een enkele soort bekend: de *Anatosaurus*.

In zee zijn de slachtoffers vooral dieren met een kalkskelet: het plankton, koralen, bryozoën, ammonieten, belemnieten, rudisten en Inoceramus (oesterachtigen), mosasauriërs. Het kalkig nanno- en zoö-plankton is goed onderzocht, en ook van de ammonieten is veel bekend. Het plankton is bovendien in grote aantallen te bestuderen in continu afgezette sedimenten in diepzeekernen. Over de wijze van uitsterven van planktonische foraminiferen bestaan verschillen van mening. Gerta Keller denkt, dat de planktonische foraminiferen in stappen uitsterven. Volgens Keller verdwijnen maar een 25 % van de soorten precies op het kleilaagje met veel iridium. Een aantal zou kort daarvoor verdwenen zijn, en het grootste deel zou geleidelijk verdwijnen tot enkele honderdduizenden jaren na de meteorietinslag. Als dat waar zou zijn, dan zou zo'n "stapsgewijs" uitsterven misschien beter te verklaren zijn door een langdurige episode van hevig vulkanisme dan



Afb. 2. De concentraties van iridium, de zuurstofisotopen 16 en 18 en de koolstofisotopen 12 en 13 nabij de Krijt - Tertiair-grens, Agost, Spanje. De iridiumconcentraties zijn aangegeven in nanogram ( $10^9$  gram) iridium per gram sediment. De isotopenverhoudingen zijn aangegeven in permille verschil vergeleken met een standaard die internationaal veel wordt gebruikt: een grote hoeveelheid vermalen belemnieten uit de Pee Dee Formatie in de Verenigde Staten (PDB).

door de gevolgen van een plotselinge meteorietinslag. Maar het simpele vergelijken van soorten aantallen doet geen recht aan de ecologische verandering op de KT-grens zelf. Het is veel zinvoller te kijken naar de produktie van foraminiferen door de tijd en over de KT-grens heen, en die te vergelijken met bijvoorbeeld de aantallen benthonische foraminiferen, die de omstandigheden op de bodem aangeven, of de isotopen-verhoudingen van zuurstof-16 en -18 en koolstof-12 en -13 in het oceaanoewater (afb. 2). De produktie van foraminiferen-skeletjes per jaar verandert niet noemenswaard tot aan de iridium-laag, en vermindert dan plotseling heel sterk. Ook de verhouding tussen plankton en benthos verandert niet tot aan de iridium-laag, en dan schiet deze verhouding naar veel lagere waarden, in een enkele ontsluiting in Tunesië zelfs tijdelijk tot nul. Aangenomen dat de aantallen benthonische foraminiferen op de KT-grens niet veel veranderen, betekent dat een plotselinge grote afname van produktie van planktonische foraminiferen. Ook de temperatuur van het oceaanoewater en de activiteit van fotosynthetische organismen aan de oceaanooppervlakte, zoals gemeten met behulp van de zuurstof- en koolstof-isotopen in kalkskeletjes, veranderen niet vóór de KT-grens. Als er al soorten in een bepaalde sedimentaire opeenvolging eerder verdwijnen is dat waarschijnlijk een lokaal effect, dat te maken kan hebben met een zeespiegel daling aan het einde van het Maastrichtien. In de diepzee is van een soorten-reductie niets te bespeuren.

Over foraminiferensoorten die na de meteorietinslag zouden uitsterven is weinig met zekerheid te zeggen. De meeste skeletjes kunnen geërodeerd zijn uit oudere Krijt-sedimenten, en een aantal kan nog een tijdje hebben doorgeleefd. Maar ook van deze soorten is het aantal individuen precies op het iridium-laagje drastisch teruggelopen. De argumenten voor een plotselinge verandering blijven sterker dan die voor een geleidelijke verandering.

Als gevolg van het plotseling massaal uitsterven moet er veel ecologische ruimte zijn vrijgekomen. Het opnieuw benutten van deze ruimten kan gebeuren door de oude soorten die zich weer

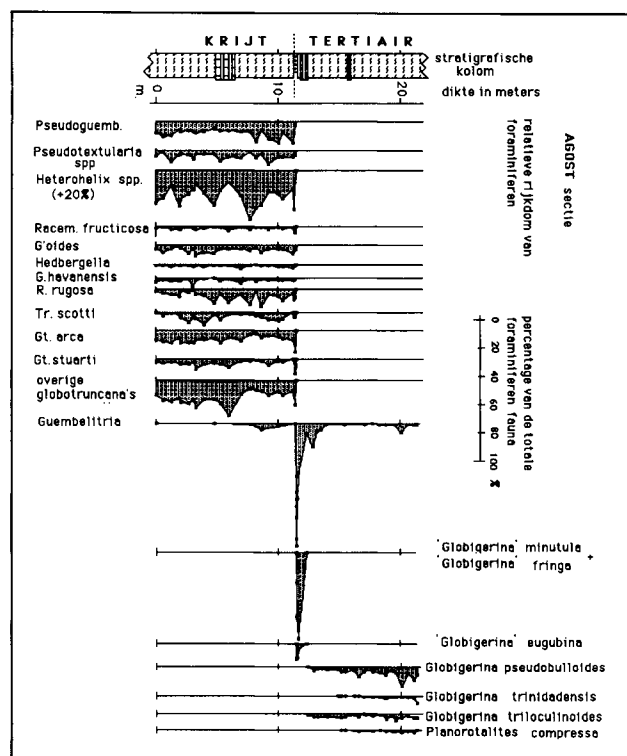
herstellen, zoals we zien met de landplanten, of door overlevende, vroeger ondergeschikte soorten die nu een kans krijgen om zich te ontwikkelen, zoals de zoogdieren. Ook kunnen nieuwe soorten ontstaan, die in de lege ecologische ruimte alle gelegenheid krijgen om te evolueren en zich te handhaven, door het ontbreken van natuurlijke vijanden of voedselconcurrenten. Dit laatste gebeurt met de bryozoën en de planktonische foraminiferen. Praktisch alle oude soorten plankton sterven uit. In de eerste periode van herstel verschijnen vele nieuwe, kleine soorten. Deze bereiken een bloeiperiode, maar worden door andere nieuwe soorten snel weer verdreven (afb. 3). Een dergelijke episode van uitsterven, gevolgd door een periode van pioniers, is eigenlijk alleen maar goed te verklaren door een plotseling, catastrofaal leeg maken van ecologische ruimte. Juist dat plotselinge is moeilijk te verklaren met een langere periode van vulkanische activiteit. Er is vaak een punt gemaakt van het geleidelijk verdwijnen van de ammonieten en rudisten ruim vóór de KT-grens. De diversiteit van de ammonieten loopt al 40 miljoen jaar lang, vanaf het Albien, terug en dat hoeft niet noodzakelijk verband te houden met de plotselinge gebeurtenissen aan het eind van het Krijt. Ook is het beeld ontstaan, dat er een acceleratie van het verdwijnen van ammonietensoorten is, kort voor de KT-grens, doordat in een opeenvolging met diepzeesedimenten nabij Zumaya in Noord-Spanje geen ammonieten in de laatste meters sediment van het Krijt zouden voorkomen. Nieuwe onderzoeken ter plaatse hebben echter wel degelijk ammonieten opgeleverd tot aan de KT-grens, vooral door bestudering van vergelijkbare overgangen in de omgeving. De rudisten verdwijnen echter wel grotendeels ergens in het Maastrichtien, al komen ze in Zuid-Limburg tot vlak onder de KT-grens voor. Rudisten zijn echter rifbewoners, en grote riffen zijn in het laatste Krijt erg zeldzaam geworden door een zeespiegel daling, die de bestaande riffen vernietigd heeft.

## Iridium

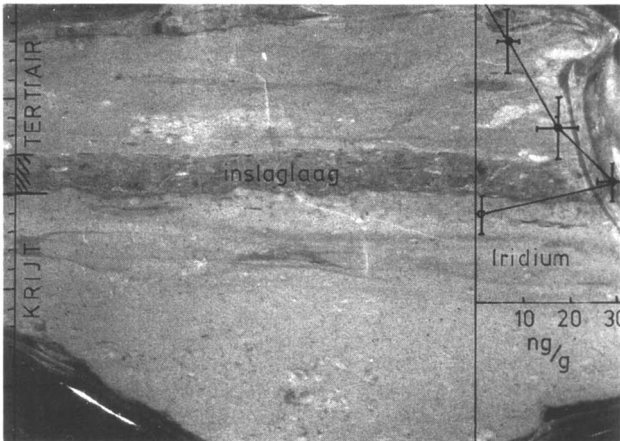
De ontdekking van hoge iridium-concentraties op de KT-grens was de aanzet tot het opstellen van de meteorietinslag-hypothese. Sindsdien is vaak geprobeerd de herkomst van het iridium anders te verklaren en de verdeling van het iridium in het sediment rond de KT-grens anders te interpreteren (Officer en Drake, 1985). Hoge concentraties iridium (en de andere platinagroep-metalen als platina, osmium, palladium, die echter veel moeilijker zijn aan te tonen) zijn eenvoudig te verklaren als "ruimtepuijn", aangezien alle soorten meteorieten en kometen in verhouding tot de aardkorst rijk zijn aan deze metalen. De aarde als geheel heeft deze platinametalen ook wel, maar ze zitten veilig opgeborgen in de metallische nikkel-ijzerkern van de aarde, en het is (via "modelberekeningen") een geweldige klus om ze daarvandaan te krijgen naar de aardkorst.

Nu ligt het misschien in de aard van geologen om toch een aardse verklaring voor de herkomst van het iridium op de KT-grens te zoeken. Zoller meldde in 1983 een verhoogde concentratie iridium in filters, die geplaatst waren in de hete fumarolen die vrijkwamen bij een uitbarsting van de Kilauea-vulkaan op Hawaïi. Het iridium was niet direct kwantitatief te meten, maar werd vergeleken met de hoeveelheid andere opgevangen elementen in het filter, zoals aluminium. Later werd duidelijk, dat het Kilauea-iridium in een hexa-fluoride zit ( $\text{IrF}_6$ ), een reactieve verbinding.  $\text{IrF}_6$  is dan ook alleen aangetoond in zeer hete fumarolen ( $> 600^\circ\text{C}$ ), die vrijwel direct uit het magma komen. In koudere fumarolen, die in langere spleten zijn afgekoeld, is geen iridium meer aangetoond. Kennelijk reageert  $\text{IrF}_6$  snel met de wanden van de spleten waar de fumarolen uitkomen. De wanden van de spleten waarop  $\text{IrF}_6$  neerslaat vertonen echter geen verhoogde concentratie iridium, zodat in absolute zin de hoeveelheid uitgestoten iridium maar heel miniem moet zijn. Maar toch, een dergelijke vulkanische bron is niet geheel uit te sluiten voor de herkomst van het KT-iridium.

Er zijn nog twee argumenten die van belang zijn voor de herkomst van het iridium. Het eerste is de verdeling van het iridium in de sedimenten rond de KT-grens en het tweede is de verhouding van alle platinametalen onderling in het KT-grenslaagje (afb. 4). Stof en ander puin (met iridium), afkomstig van een meteorietinslag, zal in hooguit een jaar weer op aarde zijn neergeslagen,



Afb. 3. Uitsterven van de oude en evolutie van nieuwe planktonische foraminiferen. Opvallend is, dat na het plotseling verdwijnen van alle oude soorten een tijdlang vrijwel geen soorten plankton bestaan, en dat daarna opportunistische soorten hun kans voor korte tijd grijpen.



Afb. 4. Gedetailleerde opname van de grenslaag en het inslaglaagje, dat ontsloten is even ten noorden van het dorpje Agost, 25 km van Alicante in Spanje. De schaalverdeling links is in millimeters. Rechts is de concentratie van iridium in de verschillende lagen aangegeven. Deze is een maat voor de hoeveelheid kosmisch materiaal dat door het diepzeeslik gemengd is. De inslaglaag is het rijkste aan iridium, maar ook in de donkere klei op de inslaglaag is de iridiumconcentratie nog aanzienlijk.

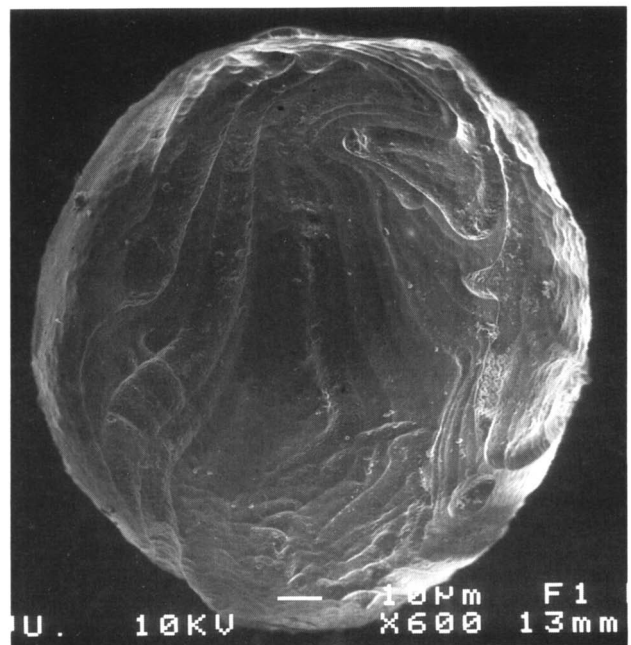
en dat zal maar een heel dun laagje kunnen vormen, niet te onderscheiden van bijvoorbeeld een dunne vulkanische aslaag. Als de aanvoer van iridium verspreid is over een langere periode, dan zullen de verhoogde concentraties iridium in dickere lagen te vinden zijn, die meer tijd vertegenwoordigen. Officer en Drake beweren nu, dat dit op de meeste KT-grenzen ook het geval is. De soms brede piek van hoge iridium-concentraties zou wel meer dan 100.000 jaar kunnen vertegenwoordigen. Nu is verspreiding van iridium in dickere lagen ook via andere sedimentaire processen als bioturbatie (het omwoelen van de oceaانبodem door gravende organismen) en erosie te verklaren. De iridiumverspreiding die daarvan het gevolg is, is dan moeilijk te onderscheiden van een brede piek die ontstaan is door iridium-aanvoer gedurende wat langere tijd. Het iridium dat in eerste instantie op het land terecht komt wordt veelal door de regen weggespoeld, en kan dan met vertraging uiteindelijk in de diepzee terecht komen. Hierdoor kunnen we geruime tijd na de afzetting van het eerste "fall-out"-iridium nog hoge iridium-concentraties meten in diepzee-sedimenten, die dicht bij land zijn afgezet (afb. 4). Maar nu beweren Officer en Drake (1985), dat een dergelijke verticale verspreiding van iridium niet meer zou kunnen zijn dan ongeveer 11 cm, wat de dikte is van de door wormen en echiniden omgewoelde laag van de sedimentoppervlakte van de oceaانبodem. Deze redenering is aantoonbaar fout, want de werkelijke verticale verspreiding van een door bioturbatie omgewoelde iridiumrijke laag moet veel dikker zijn. Dit is empirisch eenvoudig na te gaan door de verticale verspreiding van asdeeltjes uit heel dunne aslaagjes in diepzee-sediment te bepalen. Als het bodemleven niet door de hoeveelheid as te gronde gegaan is, dan zullen de asdeeltjes telkens omhoog gewerkt worden. Gemiddeld worden asdeeltjes tot meer dan 80 cm boven de eigenlijke aslaag gevonden. Een dergelijke verticale verspreiding is dus ook te verwachten voor een dun iridiumrijk laagje op de KT-grens, als dat door bioturbierende organismen naar beneden en naar boven wordt gewerkt. Dit blijkt heel mooi te kloppen met de verspreiding van KT-iridium in diepzee-sedimenten van Zuid-Spanje, Tunesië en Israël. Waar veel bioturbatie is in het KT-grenssediment is de verticale verspreiding van iridium ook groter: 15 cm in Tunesië en tot meer dan een meter in Israël. Op verschillende plaatsen in Zuid-Spanje daarentegen, is het bodemleven op de KT-grens tijdelijk vrijwel geheel verdwenen en is de iridiumrijke "fall-out"laag nauwelijks verstoord. De verticale verspreiding is daar dan ook niet meer dan een halve centimeter. De kleine, snel afnemende "staart" van iridium, die in Spanje nog een paar centimeter boven de KT-grens zit, is te

verklaren met de aanvoer van iridium, dat geleidelijk geërodeerd is vanaf het toenmalige Spaanse vasteland.

Een brede iridium-"piek" op de KT-grens is dus evengoed door latere sedimentaire processen als door langdurige aanvoer te verklaren. De scherpe piek in Zuid-Spanje is echter moeilijk te verklaren met een langdurig proces.

Er zijn iets verhoogde concentraties iridium gevonden tot een meter onder en tot twee meter boven de KT-grens in Denemarken, Italië en Caravaca in Spanje. In normaal diepzeesediment ligt de gemiddelde concentratie van iridium in de buurt van 0,01 ng/g, of is niet aantoonbaar. De verhoogde concentratie iridium onder en boven de KT-grens is ongeveer 0,05 ng/g, wat niet ongewoon is in vele andere typen sediment. In vergelijking met de hoge iridium-concentratie op de KT-grens zelf, die wel 100 tot 700 keer hoger is, is dit helemaal niet veel, maar het is opvallend, dat deze iets hogere concentraties juist in de buurt van de KT-grens zijn gevonden. De verklaringen worden nu gezocht òf in een langere episode van vulkanisme, die zou culminerend in een enorm verhoogde aanvoer op de KT-grens, of in oplossing en her-distributie door circulerend grondwater, of in chemische diffusie, of in een gedurende langere tijd aanhoudende hoge aanvoer van kosmisch stof, culminerend in een grote inslag op de KT-grens zelf. Geen van deze mogelijkheden is nog voldoende uitgezocht.

Iridium komt samen met de andere platina-metalen van groep VIII van het periodiek systeem: osmium, platina, ruthenium, rhodium en palladium, in vrijwel alle kosmische materialen in dezelfde onderlinge verhouding voor. Men spreekt dan ook van een kosmische verhouding. In de korst en de mantel van de aarde komen de platina-metalen echter zelden in die kosmische verhouding voor. Doordat de platina-metalen verschillen in fysische en chemische eigenschappen, zijn die oorspronkelijke onderlinge verhoudingen in de vele magmatische en metamorfe processen die ze ondergaan hebben veranderd. Het is dan ook te verwachten, dat de platina-metalen uit vulkanische uitbarstingen sterk gefractioneerd zijn, dat wil zeggen dat zij zijn gaan afwijken van de oorspronkelijke kosmische verhoudingen. We weten niets van de platina-metalen in de Kilauea-vulkaan, omdat behalve iridium geen van de andere platina-metalen gemeten zijn, maar er zijn wel gegevens van de Hawaiï-bazalten zelf. Op de KT-grens komen de platina-metalen ongeveer in kosmische verhoudingen voor. De verschillen onderling zijn veel kleiner dan in diverse aardse gesteenten. De palladium/iridium-verhouding (Pd/Ir)



Afb. 5. Elektronenmicroscop-foto van een microtektiet uit een boorkern van de Indische Oceaan. Deze microtektiet maakt deel uit van het Australaziatische strooiveld en is 700.000 jaar oud. Schaal 10 micron.

bijvoorbeeld op de KT-grens in Caravaca (Spanje) is 1,8 tegen ~1,0 in C 1-chondrieten (een primitieve, in samenstelling op een komeet lijkende meteoriet). Daarentegen is Pd/Ir in vulkanische gesteenten als plateau-bazalten, zoals de Deccan-traps, 60 en in mid-oceanische bazalten 12. In platina-ertsen zit Pd/Ir tussen de 8 en de 28.

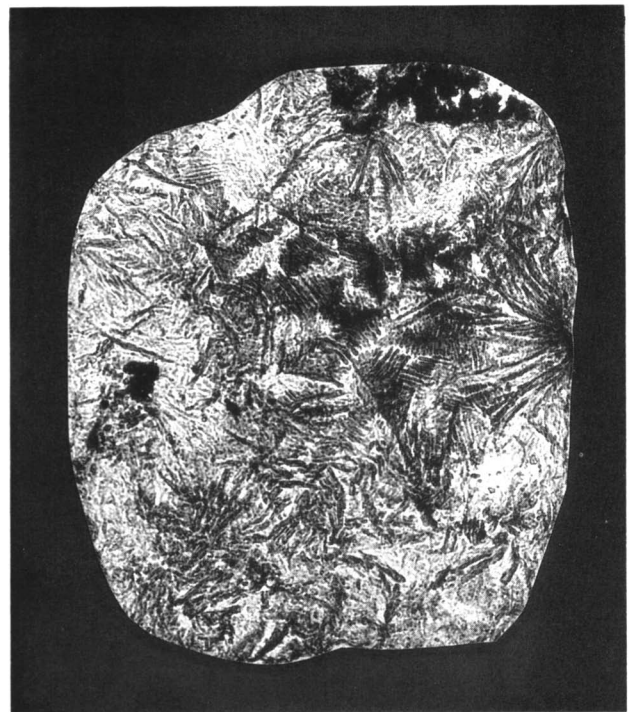
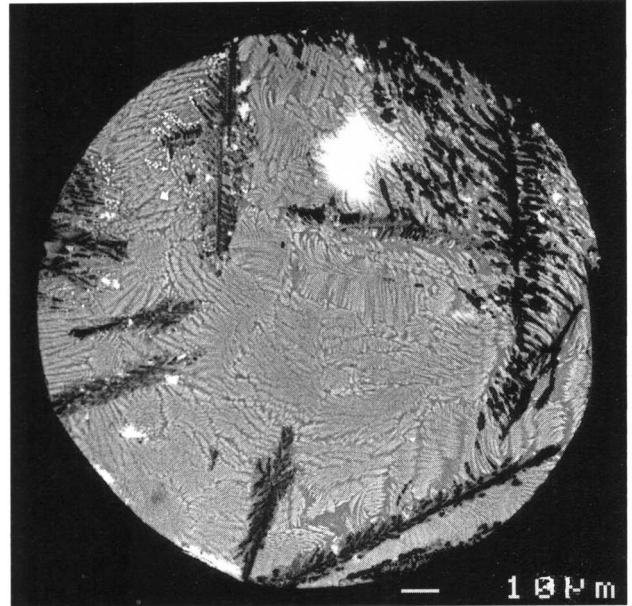
## Tektieten

Tektieten zijn stukken felsisch (= SiO<sub>2</sub>-rijk) glas die, naar algemeen wordt aangenomen, ontstaan zijn door de grote hitte van een grote meteorietinslag. Tektieten bestaan uit materiaal van de plaats van inslag, en bevatten geen restanten, of heel weinig, van de meteoriet zelf. Tektieten worden gevonden in zogenaamde strooivelden, die over grote gebieden van de aarde verspreid zijn, soms over wel een kwart van de aardoppervlakte. Tektieten onderscheiden zich van vulkanisch glas door hun enorme verspreiding, door hun samenstelling en vorm. Tektiet-glas bevat vrijwel geen water of andere vluchtige bestanddelen.

Het meeste materiaal van een strooiveld wordt aangetroffen als microtektieten: sub-mm grote glasbolletjes (afb. 5). Deze microtektieten komen in grote aantallen, wel 200 - 500 per cm<sup>2</sup>, voor en zijn uitsluitend gevonden in diepzeesedimenten, omdat ze van het land gemakkelijk afspoelen. Een belangrijk verschil met vulkanisch glas is de bolvorm van microtektieten. Vulkanische deeltjes zijn altijd hoekig en scherp. Bekende tektieten zijn de australieten en billitonieten van het austral-asiatische strooiveld. Deze tektieten zijn 700.000 jaar oud en de microtektieten die tot dit strooiveld horen worden in de gehele Indische Oceaan teruggevonden.

Afb. 5. Er zijn nog meer bekende tektiettypen, zoals Ivoorkusttektieten en moldaviëten. De oudst bekende, uit het late Eoceen (34 miljoen jaar oud), worden gevonden in Texas en Georgia en voor de oost-kust van Noord-Amerika. Ze worden toegeschreven aan de inslag die de onlangs ontdekte, meer dan 35 km grote inslagkrater Montagnais voor de kust van Nova Scotia heeft uitgegraven. Microtektieten van dit strooiveld komen overal in de Caraïbische Zee en de oostelijke Stille Oceaan voor.

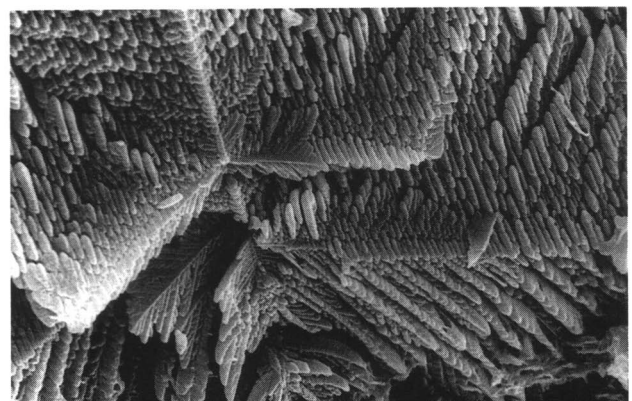
Iets oudere microtektietachtige bolletjes, van een heel andere, bazaltische samenstelling, komen in diepzeekernen in de hele centrale Stille Oceaan en de oostelijke Indische Oceaan voor. Ze bevatten minder SiO<sub>2</sub> en veel meer calcium en magnesium dan andere tektiettypen, en moeten afkomstig zijn van een grote inslag in de bazaltische oceaانبodem. De plaats van inslag is echter nog niet bekend. In tegenstelling tot gewone tektieten bestaan deze magnesium-rijke microtektieten niet geheel uit glas, maar in het glas zitten ook heel fijne dendritische kristallen van spinel en clinopyroxen ingesloten (afb. 6 A). Daarom worden ze ook wel micro-krystieten genoemd. Zulke fijne kristallen zijn ook bekend van de randen van onderzeese bazaltische kussenlava's, die in contact met zeewater wel heel snel tot glas afkoelen, maar



Afb. 6 A. Elektronenmicroscop- (SEM-) foto van doorsnede van een microkrystiet van laat-Eocene ouderdom uit de Caraïbische zee. Kenmerkend voor deze microkrystieten zijn de minuscule dendritische kristalletjes van clinopyroxen (lichtgrijze "veertjes") en spinel (kleine, fel oplichtende puntjes en sterretjes) die in het glas gegroeid zijn. De zwarte "visgraten" zijn gaten, ontstaan door oplossing van pyroxen in zeewater. Schaal 10 micron.

Afb. 6 B. Dunne doorsnede van een omgezette microkrystiet van de KT-grens van Caravaca. Alle dendrieten hebben nog de oorspronkelijke pyroxenvorm, maar zijn geheel omgezet in een soort adulaar, een kalium-veldspaat. Doorsnede microkrystiet ongeveer 300 micron.

Afb. 6 C. Detail van een microkrystiet van de Krijt - Tertiair-grens van de Shatsky Rise, een onderzees plateau in het westen van de Stille Oceaan. Dit zijn de enige pyroxenkristallen die bewaard zijn gebleven van deze KT-microkrystieten; overal elders zijn ze omgezet. Het glas dat oorspronkelijk tussen de kristallen zat is door het zeewater weggeëst. Schaal 2,49 micron onderin de foto.



waarin dankzij de hoge vloeibaarheid en speciale chemische samenstelling toch nog snel heel fijne kristallen kunnen groeien. Ook op de KT-grens zijn microtektietachtige bolletjes (eigenlijk microkrystieten) gevonden, vrijwel over de gehele wereld (afb. 6 B). In tegenstelling tot alle bekende microtektieten zijn ze echter geheel door diagenese omgezet (zoals bijvoorbeeld fossiel hout wordt omgezet in kiezel). Daarom zijn ze vaak vervormd en worden ze niet als zodanig herkend. Nu komen bolvormen in de natuur veelvuldig voor. Foraminiferen, radiolariën, kalkalgen, pyrietconcreties, insecteneieren, zandkorrels en steenkernen van vele kleine fos-sielen zijn alle bolvormig en kunnen oppervlakkig met de KT-microtektieten verward worden. De meeste KT-microtektieten hebben echter de structuur van de oorspronkelijke kristallen bewaard (door pseudomorfose), al is de chemische samenstelling nu totaal anders. Deze oude structuur lijkt als twee druppels water op de spinel en clinopyroxeen-kristallen van de Eocene micro-krystieten. In de meeste KT-lokaties zijn tenslotte ook vele van de oorspronkelijke spinel-kristallen - en op één plaats in de Stille Oceaan zelfs de oorspronkelijke clinopyroxeen-kristallen (afb. 6 C) - gevonden in de microtektietachtige bolletjes. Het oorspronkelijke glas van de microtektieten is echter nergens bewaard gebleven, zodat we naar de oorspronkelijke samenstelling slechts kunnen gissen. Nu komt de samenstelling van de fijne clinopyroxeen-kristallen in kussenlava's en de Eocene microkrystieten aardig overeen met de samenstelling van de oorspronkelijke glassmelt. Ook de clinopyroxenen in de KT-microtektieten zullen daar wel op lijken en die wijzen op een bazaltische samenstelling. Dat duidt erop, dat de KT-bolletjes van de oceaانبodem afkomstig zijn en dat de inslag (of een van de inslagen) op de KT-grens op de oceaانبodem heeft plaatsgevonden. Dan is het ook niet zo verwonderlijk, dat de inslagkrater nog niet is gevonden.

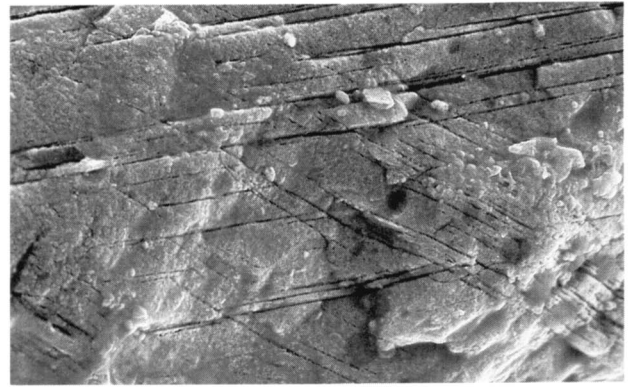
Inmiddels is op de KT-grens voornamelijk in Noord-Amerika een ander type totaal omgezette microtektieten gevonden. Deze vertonen geen kristallijne structuur en zullen oorspronkelijk geheel van glas zijn geweest, wat wijst op een andere, meer continentale samenstelling (hoog SiO<sub>2</sub>-gehalte). Dat ondersteunt de huidige opvatting, dat de 66 miljoen jaar oude Manson-krater in de staat Iowa, die een diameter van meer dan 30 km heeft, één van de KT-inslagkraters is.

De verticale stratigrafische verdeling van de microtektieten op de KT-grens is identiek aan de iridium-verdeling. Door bioturbatie zijn ze soms naar boven en naar beneden gewerkt, en vaak zijn ze goed bewaard in individuele boorgangen in het allerbovenste Maastrichtien.

Vulkanisme kan de KT-microtektieten niet verklaren. Ten eerste is de verspreiding te groot voor zelfs de krachtigste vulkanen, en zoals eerder gezegd, produceren dergelijke krachtige vulkanen slechts hoekige glasfragmenten. Andere verklaringen die onlangs geopperd zijn, zoals opvulling van prasinofyten (kogelvormige) algen, kan de spinel en clinopyroxeen niet verklaren, die slechts bij hoge temperaturen gevormd kunnen zijn.

### Stishoviet en geschokte mineralen

Op de Krijt - Tertiair-grens zijn losse minerale korrels gevonden, vooral kwarts, veldspaat en zelfs kwartsiet, die verschijnselen van intense schok (> 90 kbar) vertonen (afb. 7). Van de bodem van bekende meteoriet-inslagkraters, zoals de Ries-krater in Beieren, die de moldaviëten heeft geproduceerd, zijn deze schokverschijnselen goed bekend. De schokverschijnselen zien er in dunne doorsneden en onder de elektronenmicroscop uit als groepen lamellen, die elkaar snijden onder verschillende hoeken. Bij nauwkeurige beschouwing blijken die lamellen kleine barstjes te zijn, waar het kristalrooster door de intense drukken, maar tamelijk lage temperatuur, iets verplaatst is. In extreme gevallen, bij iets hogere temperaturen, bestaan de lamellen uit zogenaamd diaplectisch glas, wat wil zeggen dat door de intense schok de kristalmoleculen uit hun roosterordering geslagen zijn en dat levert glas op dat wel dezelfde chemische samenstelling heeft als het oorspronkelijke kristal, maar dat amorf is. Uit vulkanische gesteenten zijn mineralen met een dergelijke verzameling lamellen niet bekend.



Afb. 7. SEM-opname van een kwarskristal dat schoklamellen bevat. De lamellen zijn uitgeët met fluorwaterstof. Van de Krijt - Tertiair-grens van Brownie Butte, Garfield county, Montana, USA. Schaal 10 micron.

Bij nog hogere druk en lagere temperatuur gaat kwarts over in de hogedruk-modificatie stishoviet, dat een twee keer zo hoge dichtheid heeft als kwarts, maar niet stabiel is bij lage druk. Na een geringe verwarming bij lage druk, zoals heerst bij vulkaan-erupties, verandert de stishoviet prompt weer terug naar kwarts. Na het vermalen en concentreren van vele kilo's materiaal van de KT-grens is McHone erin geslaagd om stishoviet aan te tonen in de KT-kleilaag met hoog iridium-gehalte.

### Conclusies

Extincties op de KT-grens zijn nauw geassocieerd met een plotselinge stijging van het platinametaal-gehalte in sedimenten, microtektietachtige bolletjes, geschokte kwarts en stishoviet. Deze zijn eenvoudig te verklaren met een of meer grote meteorietinslagen, maar uiterst moeilijk met andere verklaringen, waaronder een korte periode van intens vulkanisme op het moment op de voorgrond treedt. Volgens het principe van Ockhams scheermes verdient de inslagtheorie dan ook voorkeur boven de vulkanische.

Hoe die inslagen nu precies die extincties teweeggebracht hebben is nog grotendeels terrein voor speculatie.

Zonsverduisteringen door stofwolken zijn geologisch niet aan te tonen, maar de wereldwijde verspreiding van roetdeeltjes precies op de KT-grens wijzen op enorme bosbranden. De sterke veranderingen van de zuurstof- en koolstof-isotopen wijzen op een plotselinge temperatuurverhoging en een totale ineenstorting van de primaire voedselketen.

### Literatuur

- Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F. en Michel, H. (1980) Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 280, 91095-1108.
- Smit, J. en Hertogen, J. (1980) An extraterrestrial event at the Cretaceous Tertiary boundary. *Nature*, 2895, p. 198-200.
- Officer, C.B. en Drake, C.D. (1985) Terminal Cretaceous environmental events. *Science* 227, p. 1161-1167.
- Clemens, W.A. en Archibald, J.D. (1980) Evolution of terrestrial faunas during the Cretaceous Tertiary transition. *Mem. Soc. Geol. de Fr. Nouvelle Serie*, 59, p. 67-74.
- Sloan, R.E., Rigby, J. Keith jr., Van Valen, L. en Gabriel, D. (1986) Gradual dinosaur extinction and simultaneous ungulate radiation in the Hell Creek Formation. *Science* 232, p. 629-633.

wordt vervolgd naast pag. 104

---

## Over de auteurs

---

**Prof.Dr.J.L.R. Touret** is sinds 1980 hoogleraar in de Ertskunde, Petrologie en Mineralogie aan het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU. Als zodanig is hij voorzitter van de gelijknamige vakgroep. Hij is sinds 1988 gewoon lid van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW). Voor zijn aanstelling aan de Vrije Universiteit was Jacques Touret werkzaam en studierend aan de Universiteiten van Nancy en Parijs. Zijn onderzoeksterrein ligt op het gebied van vloeistof-insluitels in gesteenten. Over dit onderwerp wordt een overzicht geboden in deze Gea-uitgave.

**Dr.J. Smit** is onderzoeker (vanwege de KNAW) bij het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU. Zijn onderzoeksopdracht is om de oorzaken na te gaan van het massaal verdwijnen van soorten planten en dieren, en tevens om na te gaan welke grensvoorwaarden in het milieu in het verleden zijn overschreden waardoor onleefbare omstandigheden zijn ontstaan. Voor de huidige milieuproblematiek zijn deze grensvoorwaarden evenzeer van belang. Jan Smit studeerde in 1974 af aan de Universiteit van Amsterdam, en promoveerde aldaar in 1981 op het proefschrift "A catastrophic event at the Cretaceous Tertiary boundary". Hierna was hij twee jaar in dienst van de Stichting voor Zuiver Wetenschappelijk Onderzoek voor het doen van vervolgstudies. Van 1983 t/m 1985 verbleef hij als onderzoeker en docent op het Instituut voor Planetaire Natuurkunde van de Universiteit van California in Los Angeles.

**Drs.A.G. Dekker** is afgestudeerd in de Kwartairgeologie en laaglandgenese aan het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU. Als bijvakken tijdens zijn studie koos hij remote sensing en informatica. Van 1987 tot begin 1990 werkte Arnold Dekker op het "Remote Sensing Loosdrechtse Plassen Project", waarvan in dit Gea-nummer een beknopte weergave van de resultaten wordt gegeven. Dit project wordt gefinancierd vanuit het Nationaal Remote Sensing Programma, evenals het vervolgproject over "Integrale modellering van optische waterkwaliteitskenmerken voor toepassing in remote sensing", waarbij medefinanciering is verkregen van de zijde van Dienst Binnenwateren/Rijks Instituut voor Zuivering van Afvalwater en het Zuiveringsschap Amstel- en Gooiland. Beide projecten worden uitgevoerd in samenwerking met het Limnologisch Instituut en met het Nationaal Lucht- en Ruimtevaart Laboratorium.

**Prof.Dr.G.J. Boekschoten** is universitair hoofddocent aan het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU; als nevenfunctie is hij bijzonder hoogleraar in de Paleontologie aan de Rijksuniversiteit Groningen. Hij is lid van de Commissie voor de Geschiedenis van de Geologische Wetenschappen van de KNAW. Bert Boekschoten deed veel onderzoek aan fossielen op Cyprus, Kreta en de Balearen. De laatste 10 jaar heeft hij zich met koraalrifonderzoek beziggehouden. Hij werkte op de Antillen, nam deel aan verschillende expedities op de Atlantische Oceaan en aan de Snellius-expeditie naar Indonesië.

**Dr.P. Maaskant** is sinds 1965 verbonden aan het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU. Hij is lid van de vakgroep Ertskunde, Petrologie en Mineralogie en als zodanig verzorgt hij onderwijs in deze vakken. Piet Maaskant is belast met de elektronenmicrosonde-analyse en met de geothermobarometrie van de metamorfe terreinen waarin leden van de vakgroep werkzaam zijn.

**Dr.S.R. Troelstra** is als universitair docent sinds 1981 verbonden aan het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU. Zijn werk-

zaamheden bevinden zich op het gebied van de micropaleontologie en van de mariene geologie. Na het beëindigen van zijn studie in 1973 verbleef Simon Troelstra geruime tijd in Zuidoost-Azië, waar hij werkte als consultant. In 1979 promoveerde hij op een proefschrift over het gebruik van foraminiferen in de geologie. In zijn huidige werkkring als lid van de vakgroep Sedimentaire Geologie geeft hij onderwijs in de micropaleontologie en coördineert mede zeegaand onderzoek in de Middellandse Zee, Skagerak/Kattegat, Banda Zee en de Indische Oceaan.

**Prof.Dr.J.J. de Vries** is bijzonder hoogleraar in de hydrogeologie, in het bijzonder exploratie en evaluatie van grondwater-voorkomens. Hij is sinds 1968 verbonden aan het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU, waar hij in 1974 promoveerde op een onderzoek naar de relatie tussen systemen van oppervlaktewater en grondwater in Nederland. Sinds 1982 leidt Co de Vries een onderzoek naar de ondergrondse watervoorvorming in Botswana in het kader van een samenwerkingsverband tussen de VU en de Universiteit van Botswana. Van 1982 - 1986 was hij als docent werkzaam aan laatstgenoemde universiteit.

**Prof.Dr.H.F. Vugts** is sinds 1970 verbonden aan het Instituut voor Aardwetenschappen. In 1982 werd hij buitengewoon hoogleraar in de meteorologie, in het bijzonder de micrometeorologie. Hans Vugts voltooide in 1966 de studie experimentele natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam, alwaar hij in 1971 promoveerde op het proefschrift "Diffusion in monatomic and polyatomic gas mixtures". Met de vakgroep meteorologie van de VU, waarvan hij voorzitter is, houdt hij zich vooral bezig met energiebalans-studies aan het aardoppervlak. Een van zijn grootste hobbies is het lange-afstandslopen; naast een 30-tal marathons ruim binnen de drie uur, liep hij ook de 100 km van Winschoten en de befaamde London-Brighton race (85 km).

\* \* \*

---

*vervolg van pag. 85*

### Verdwijnen en opnieuw beginnen

Russell, D.A. (1982) A paleontological consensus on the extinction of the dinosaurs? Geol.Soc.Am. Spec. Paper, 190, p.401-406.  
Bohor, B.F., Foord, E.E., Modreski, P.J. en Triplehorn, D.M. (1984) Mineralogic evidence for an impact event at the Cretaceous Tertiary boundary. Science 224, p. 867-869.  
Bohor B.F., Triplehorn, D., Nichols, D.J. en Millard, H.T. (1987) Dinosaurs, spherules and the "magic" layer: a new K-T boundary site in Wyoming. Geology 15, p. 896-899.  
Keller G. (1988) Extinction, survivorship and evolution of planktonic foraminifera across the Cretaceous Tertiary boundary at El Kef, Tunisia. Marine Micropaleontology 13, p. 239-263.  
Zoller W.H., Parrington, J.R. en Phelan Kotra, J.M. (1983) Iridium enrichment in airborne particles from Kilauea Volcano: januari 1983. Science 222, p.1118-1121. Geological Society of America Special Paper 190 (1982). Bevat meer dan 40 artikelen over verschillende aspecten van de Krijt - Tertiair-grens. De meest gebruikte en complete referentie.  
Catastrofen (1989); red. J.H. Daams, uitg. Nijgh en van Ditmar, Amst., ISBN 90 236 6045 5.  
Verdwijnen van soorten (1989), uitg. Biologische raad van de Koninklijke Akademie van Wetenschappen.  
Gea (1980) vol. 13, nr.4. Meteorietinslag markeert overgang Krijt - Tertiair? red. naar J. Smit.