

gewone biotiet, maar in vergelijking daarmee te weinig kalium bevat. Dit gebrek aan kalium wordt gecompenseerd door de aanwezigheid van ammonium (NH₄).

Stop 7: Chloritoidfyllieten van Libramont

Neem in Libramont de N89 naar St. Hubert. Volg deze onder het spoor door, voorbij de afslag Libramont 3, en voorbij de haakse zijweg. Bij kilometerpaal 36.2 is een parkeerplaats. Op de helling hierboven bevinden zich grijze fyllieten. Behalve chloritoid komen chloriet, kwarts en muscoviet voor, alsmede grafiet en opake mineralen.

Stop 8: Magnetietschisten van Serpont

Volg weg N826 vanuit Libramont naar het noordoosten, richting Freux en Moiricy. Neem in Moiricy de weg naar Remagne. Na ruim één kilometer staat een kleine witte kapel, de Chapelle de Notre Dame de Lourette. Neem het paadje naar de kapel, en ga vervolgens naar de hoger gelegen rotspunt schuin naar rechts. Hier zijn gemetamorfoseerde arkoses (= veldspathhoudende zandstenen) van de Formatie van Oignies ontsloten, die kwarts, albit, phengiet en chloriet bevatten, alsmede kleine hoeveelheden rutiel, zirkoon en een opaak mineraal. Ondanks de metamorfose bewaren zij nog steeds een scheve gelaagdheid. Als inschakelingen komen groene schisten voor met enige millimetergrote, kubusvormige blasten van magnetiet. Behalve de blasten van magnetiet treden kwarts, chloriet en muscoviet op, begeleid door kleine hoeveelheden toermalijn en zirkoon.

Stop 9: Chloritoidfyllieten van het Massief van Givonne

Volg de N89 vanuit Bouillon naar het zuiden, en passeer de Belgisch-Franse grens. Neem vlak na de grens de afslag naar Givonne en vervolgens de D4 naar Villers-Cernay. Volg in Villers-Cernay de D4 naar Francheval en vandaar de D17 naar Pouru-aux-Bois. Neem aldaar de *route forestière* naar het noorden, langs het riviertje. Na ongeveer 1½ km is een oude groeve aan de westzijde van de weg.

Hier worden zwarte, pyriethoudende kwartsieten afgewisseld met micarieke fyllieten, waarin blasten van chloritoid voorkomen.

Stop 10: Margariet-muscovietschisten van Muno

Keer vanaf stop 8 terug naar Pouru-aux-Bois. Volg de D17 naar Escombres en Messincourt. Neem in die plaats de D19 naar Muno in België. Neem in Muno de afslag naar de Roche à l'Appel, en rijd onder het spoor door (dus volg de weg naar de Roche à l'Appel niet). Direct na de spoorlijn is een kruispunt. In de helling

van de weg naar het noorden, parallel aan de spoorlijn, bevinden zich diverse kleine ontsluitingen.

In deze ontsluitingen zijn micaschisten ontsloten, waarin margariet voorkomt, vaak samen met chloriet, die microscopisch vaak vergroeid is met margariet. De matrix bestaat voornamelijk uit kwarts, met kleine hoeveelheden apatiet, hematiet, muscoviet en rutiel.

Stop 11: Fossielenhoudende corneite met biotiet en clinozoïetblasten van Muno

Neem dezelfde weg terug en volg nu wel de weg naar de Roche à l'Appel. Parkeer de auto op de aangegeven parkeerplaats en volg het aangegeven bospad tot voorbij de Roche à l'Appel, het conglomeraat aan uw rechterhand.

Hier is de massieve z.g. *corneite* ontsloten, waarin zich blasten bevinden van biotiet en clinozoïet, in een matrix die verder chloriet, muscoviet en kwarts bevat. Ondanks de metamorfose zijn verschillende fossielen bewaard gebleven, waaronder de brachiopoda *Proschizophoria torifera* en *Delthyris dumontianus*, met een ouderdom van Onder-Gedinnien (Onder-Devoon).

Literatuur

- [1] Miyashiro, A., 1994. Metamorphic petrology. University College London Press, Londen, 404 pp.
- [2] Fransolet, A.M. en Kramm, U., 1983. Mineralogie und Petrologie Mn-reicher Metapelite des Venn-Stavelot Massivs, Ardennen, und die varistische Metamorphose im nordwestlichen Rheinischen Schild. Fortschritte der Mineralogie, v. 61, Beiheft 2, p. 31-69.
- [3] Fransolet, A.M., Kramm, U. en Schreyer, W., 1977. Metamorphose und Magmatismus im Venn-Stavelot-Massiv, Ardennen. Fortschritte der Mineralogie, v. 55, Beiheft 2, p. 75-103.
- [4] Beugnies, A., 1985. Excursion du 3 mai 1985: Structure et métamorphisme de l'aire anticlinale de l'Ardenne. Annales de la Société géologique du Nord, v. 105, p. 145-151.
- [5] Robaszynski, F. & Dupuis, C., 1983. Guides géologiques régionaux. Belgique. Masson, Paris, 204 pp.
- [6] Burke, E.A.J., 1990. Ertswinning in België: een rijk verleden. Gea, v. 23, p. 35-41.
- [7] Lohest, M., 1909. De l'origine des veines et des géodes des terrains primaires de Belgique. Annales de la Société géologique de Belgique, v. 36, p. B275-282.
- [8] Jongmans, D. en Cosgrove, J.W., 1993. Observations structurales dans la région de Bastogne. Annales de la Société géologique de Belgique, v. 116, p. 129-136.

Schokeffecten in mineralen ontsluierd

door Dr. J. van Diggelen

Het begon in Arizona

In Centraal-Arizona, in het Cayon Diablo gebied in het zuidelijk gedeelte van het Colorado Plateau, ligt een merkwaardige inzinking, die "Meteor Crater" wordt genoemd. De krater is 180 m diep en heeft een diameter van 1200 m. Afb. 1. De krater is wel rond van vorm, maar enigszins in vierkante zin vervormd, evenwijdig aan breukrichtingen in de omgeving. De wal verheft zich 30 tot 60 m boven de vlakte. De buitenhelling is 13° en bestaat uit materiaal dat uit de kuil afkomstig is, variërend van fijn, poedervormig kwarts tot brokstukken zandsteen zo groot

als een woonhuis. In het droge woestijnklimaat van Arizona is de krater voor sterke verwerking bewaard gebleven in de 25 000 jaar dat hij bestaat.

Toen in 1870 de eerste kolonisten zich in de omgeving van deze krater in Arizona vestigden heette het object "Coon Butte". De krater was uitermate moeilijk bereikbaar door het gebrek aan water in deze streek. Het vlakke, woestijnachtige land rondom de krater was bezaaid met onregelmatige en grillig gevormde, roestige stukjes ijzer. Pas in 1891 werd een monster van dit ijzer onderzocht en toen bleek dat het van meteoritische oorsprong was. Een eerste expeditie slaagde er zonder moeite in 137 brokken meteorietijzer te verzamelen met een gewicht variërend van



Afb. 1. Een luchtopname van de bekendste aardse inslagkrater, de "Meteor Crater" in Arizona in de U.S.A. Een ijzermeteoriet trof hier 25000 jaar geleden de Aarde en in het hier heersende droge klimaat is de krater aardig gespaard gebleven.

enkele grammen tot 2,5 kg. Het merendeel werd in een klein gebiedje aan de voet van de kraterwal gevonden. Later werd er op uitgebreide schaal verzameld en in allerlei verzamelingen zijn duizenden fragmenten bewaard gebleven, waarvan het grootste 630 kg zwaar is.

In 1902 kwam de mijnningénieur D.M. Barringer op de hoogte van het bestaan van de krater. Hij onderzocht het terrein en publiceerde in 1905 een verhandeling, waarin hij o.m. beweerde dat de hoofdmassa van de meteoriet nog ergens diep in de krater moest zitten. Het gevolg was dat er een maatschappij werd opgericht, die diverse boringen liet verrichten. Maar hoewel er sporen van nikkel van meteoritische oorsprong in de ondergrond bleken voor te komen en er ook water werd aangeboord, werd de meteoriet niet aangetroffen.

Omdat de meteoriet niet in de krater was aangetroffen begonnen sommige vakmensen in de jaren 1920-1940 ernstig te twifelen aan de externe oorsprong van de krater. Dat was hoofdzakelijk een gevolg van het feit, dat men niet begreep wat voor processen zulke kraters doen ontstaan. Pas na 1940 was ieder overtuigd van de enorme explosieve krachten die bij inslagen uit het heelal optreden. G.K. Gilbert had echter reeds voor 1900 de juistheid van de meteoritische oorsprong van de Arizona krater aangetoond.

Het vervolg was een Maan-probleem

Reeds honderden jaren geleden waren er maankenners, die het denkbare opperden dat de kraters, waarmee het maanoppervlak bezaaid is, door kosmische inslagen ontstaan moesten zijn. Hun theorieën weken echter sterk af van de moderne versie en er waren zoveel bezwaren tegen in te brengen, dat de meeste geleerden dan ook weigerden ze te accepteren. F.P. Gruithuisen formuleerde als eerste zo'n gedachte, maar G. K. Gilbert maakte de in die tijd algemeen voorkomende fout aan te nemen dat de krater het gevolg is van de inslag zelf.

Zijn tegenstanders kwamen dan ook direct aanzetten met het gewichtige bezwaar, dat er bijna alleen maar cirkelvormige kraters voorkomen. Inslagen zouden immers vanuit allerlei richtingen moeten plaatsvinden, zodat er zeer veel ovale of elliptische kraters moesten zijn. Dit argument heeft lang opgang gemaakt ten gevolge van onvolledige en gebrekkige kennis van de processen die plaatsvinden, wanneer een object met een zeer hoge snelheid vanuit het heelal een ander hemellichaam treft.

Vooraf het werk van R.C. Baldwin in het midden van de twintigste eeuw heeft de aandacht gevestigd op de werkelijke gang van zaken bij kosmische inslagen. Niet de inslag zelf veroorzaakt de krater, maar de door het inslaan veroorzaakte gigantische kosmische explosie, waarvan de vrijkomende energie alleen vergelijkbaar is met die van kernexplosies. Een proefexplosie van 500 ton TNT veroorzaakte een 61 m grote krater en voor de Arizona krater moet een explosie van 720 000 megaton TNT verantwoordelijk zijn. Zo'n explosie wordt veroorzaakt door het inslaan uit het

heelal van een ijzermeteoriet van 3300 m diameter. De gang van zaken bij kosmische inslagen is uitgebreid onderzocht door Eugene M. Shoemaker. Zijn werk viel samen met de voorbereiding van de maanlandingen. De astronauten moesten voorbereid worden op het werken in een voor ons volkomen vreemde omgeving: een door inslagen geteisterde bodem vol grote en kleine kraters, die in de loop der miljoenen jaren niet door verwerking door water, vorst en lucht zijn aangetast. Op Aarde zijn soortgelijke gebieden onbekend. Hoogstens kunnen in vulkanische streken, zoals op IJsland, enigszins bruikbare alternatieven gevonden worden. Bij het zoeken daarnaar viel de aandacht van Shoemaker ook op de Ries-krater in Duitsland, die hij dan ook bezocht. Het onderzoek van het Ries-gesteente versterkte zijn opvattingen over de processen die bij reusachtige inslagen optreden.

Kosmische inslagen en hun gevolgen

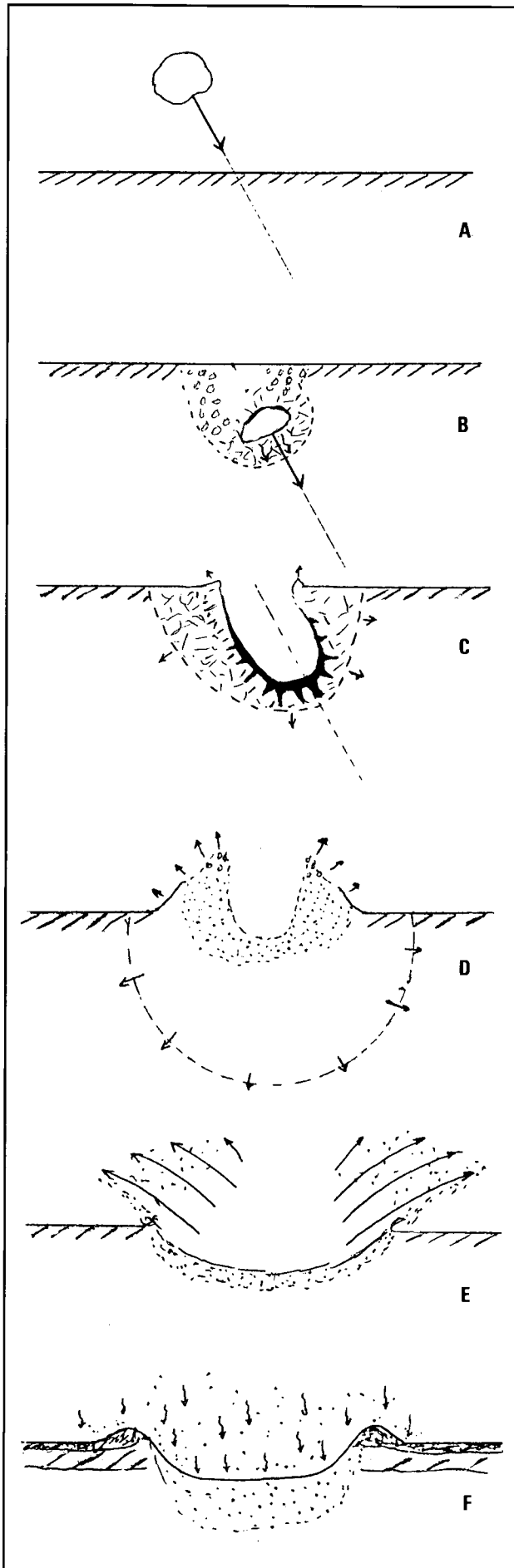
Inslagen van objecten uit de wereldruimte, die leiden tot krater-vorming en explosieve vormveranderingen van vast gesteente, behoren tot het studieterrain van de rheologie. Als een komeet of meteoriet met voldoende grote snelheid op de Aarde (of op een ander hemellichaam) inslaat, vindt er een reeks opeenvolgende gebeurtenissen plaats, die echter gedeeltelijk in elkaar overlappen of samenvloeien. Zie afb. 2.

Het inslaan en de daarbij optredende explosie veroorzaakt schok-effecten en de druk kan zelfs duizenden MN/m² bedragen (1 MN/m² is een miljoen N/m² = 10 bar). De druk in het schokfront hangt af van de totale energie bij de explosie. Het aardoppervlak wordt door het schokfront opgelicht, zodat de bodem boven de zich bij de inslag uitbreidende holte wordt weggeslingerd. Tegelijkertijd wordt de onderkant uitgediept tot een bolvormige lens van breccies.

Vanuit het punt van inslag beweegt zich de drukstoot radiëel met supersonische snelheid door het gesteente. Gesteenten die aan deze schokgolf worden blootgesteld worden daardoor in zeer korte tijd enorm samengeperst, dikwijls tot ver boven het punt waarbij ze zich door hun elasticiteit weer in hun oude vorm kunnen herstellen. Zo kan het gesteente plastisch vervormd worden, geplooid of versplinterd. Er vormen zich inslagbreccies, die bij inslagkraters op de Aarde **suevieten** genoemd worden.

Door de enorme druk bij het passeren van het schokfront wordt zelfs de interne structuur van de mineralen aangetast. Er ontstaat een enorm grote compressie van zeer korte duur, gevolgd door een decompressie, waarbij de amplitudo van zo'n golf in de mineralen zich manifesteert door lijnvormige patronen. Bij de laagste drukken die bij zulke inslagen optreden (van de orde van 200 kbar) ondergaan kwarts en plagioklaas een plastische deformatie. De sporen daarvan zijn te zien in slijpplaatjes als series evenwijdige lamellen. Afb. 3.

Er treden in veel gevallen nog grotere veranderingen op in het gesteente en in de gesteentevormende mineralen, waarbij hun structuur vaak volkomen verandert. Van bepaalde mineralen vormen zich hogedruk-modificaties, zoals bijv. coesiet (dit is een vorm van kwarts die zich al bij een druk van meer dan 20 kbar vormt) en stishoviet, een andere vorm van kwarts, die in de aardkorst ontstaat bij een druk, die heerst op 400 tot 500 km diepte. Zo worden sommige mineralen in een andere fase getransformeerd, waardoor ze in slijpplaatjes niet meer in hun vroegere toestand zijn te herkennen. In de maanbreccies en in het maanstof vertonen de plagioklaaskorreltjes bijv. vaak een kalkachtig uiterlijk; ze zijn zeer breekbaar. In slijpplaatjes vertonen zulke korrels niet meer de karakteristieke dubbelbreking van plagioklaas, maar sommige zijn volledig isotroop geworden. Isotrope "plagioklaas" is voor de eerste keer gezien in slijpplaatjes van de Shergotty



Afb. 2. De gang van zaken bij een inslag van een kosmische impactor.

- A. Een impactor nadert het aardoppervlak.
- B. De situatie ca 1 sec na de inslag; de stippellijn geeft het schokfront aan. De impactor is diep doorgedrongen en afgeplat.
- C. Ongeveer 3 sec na de inslag is er een holte ontstaan; de impactor is versmolten met het bodemmateriaal, terwijl het gesteente eromheen vervormt en het schokfront voortijlt.
- D. De materie in de ontstane holte begint zich als een exploderende gasbol te gedragen, omdat de meteoriet al zijn bewegingsenergie heeft overgedragen aan de bodem.
- E. De materie wordt weggeslingerd en valt deels terug in de kuil, zodat er zich een krater vormt.
- F. Weggeslagen brokken hopen zich op tot de kraterwal, terwijl tenslotte het lichtere stof langzaam naar beneden dwarrelt.

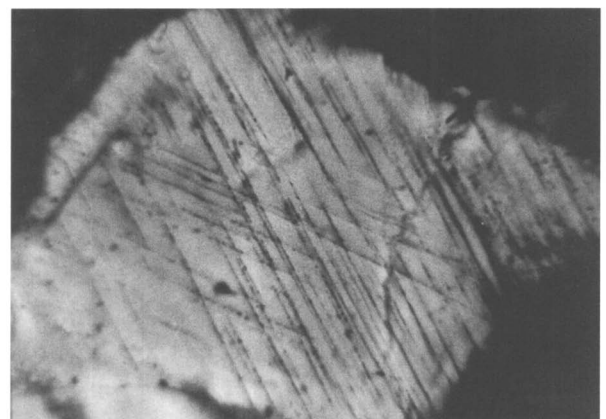
meteoriet. Deze polymorfe vorm van plagioklaas is maskelyniet genoemd. We weten nu dat het ontstaat uit gewone plagioklaas door een hevige schok. Maskelyniet is dan ook gevonden in gesteenten van aardse meteorietkraters en ook in gesteenten die waren blootgesteld aan kernexplosies.

Bij een druk van meer dan 600 kbar smelten alle gesteentevormende mineralen en gaan ze over in min of meer homogene glazen, terwijl bij een schokdruk boven de 1000 kbar alle gesteenten verdampen. Uit de ontstane dampen vormen zich dan glasbolletjes. De mineralen worden veranderd in een glasachtig materiaal, doordat de moleculen op slag en stoot worden doorengemengd of door werkelijk smelten. Zulk door schokeffecten gevormd glas heet **diaplectisch** of hetomorfisch glas. Het heeft een grotere dichtheid dan door verwarming en smelting geproduceerd normaal glas.

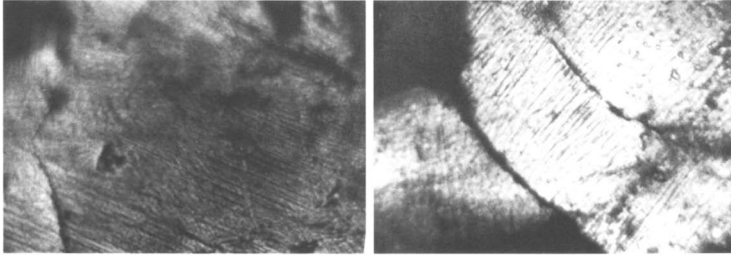
Deze dingen zijn o.m. bestudeerd door Von Engelhardt en zijn medewerkers van de Universiteit van Tübingen. Fragmenten van mineralen, gesteenten en glas en regelmatig gevormde glaslichaampjes in het maanregolith laten allerlei voorbeelden zien van de verschillende stadia van schokmetamorfose, die bekend waren door het onderzoek van E.C.T. Chao in de Ries-krater in Duitsland.

In aardse meteorietkraters vinden we allerlei aanwijzingen voor het optreden van deze schokmetamorfose: breuken, vorming van breccies, aanwezigheid van glas en schokkegels, terwijl er onder de mineralen hogedruk-modificaties van kwarts voorkomen: coesiet en stishoviet.

Doordat de materie expandeert neemt de schokdruk snel af met de afstand tot het explosiecentrum (met de derde macht van de afstand). Op grotere afstand plant de schok zich als een soort zware aardbeving in het vaste gesteente voort, waarbij dit aanvankelijk wordt gebroken tot een breccieachtige ondergrond,



Afb. 3. Kwarts met planaire deformatiestructuren van gneis uit sueviet van Zipplinger Ries; 0,21 x 0,14 mm.



Afb. 4. Evenwijdige lamellen in kwartskristallen t.g.v. schokfronten van 100 kbar of meer, ontstaan bij inslagen (links) en lamellen in kwarts t.g.v. tektonische processen (rechts).

Afb. 5. (Onder) Een minder dan 0,1 mm grote kwartskorrel, gevonden bij een diepzeeeonderzoek in een boorkern van de K/T-grens in het zuiden van de Grote Oceaan laat de invloed van het schokfront zien.

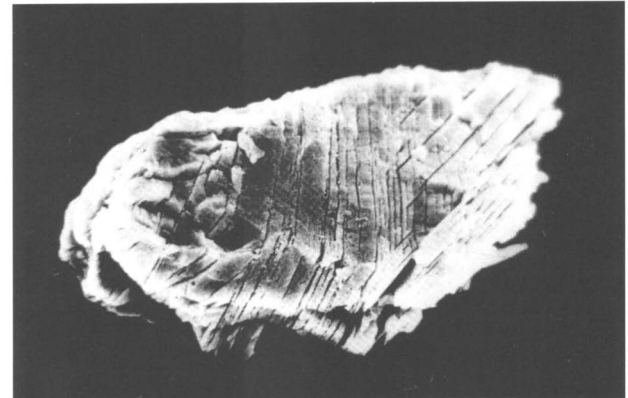
maar nog verder weg van het centrum wordt dat geleidelijk minder. Voordat coesiet en stishoviet ontdekt waren in meteorietkraters waren ze alleen bekend uit laboratoriumproeven. De ontdekking van deze beide mineralen was van groot belang, omdat dat er onduidelijk op wees, dat er extreem hoge drukken waren opgetreden. In de natuur treden zulke hoge drukken normaliter slechts op grote diepte in Aarde of Maan op. De enige verschijnselen waarbij hoge drukken optreden met tegelijk zeer tijdelijk een hoge temperatuur zijn schokgolven met zeer hoge energie. Aardbevingen en andere tektonische effecten werken langzaam en zonder schok. De grootste drukwaarden die daarbij zijn geconstateerd waren 563 bar bij de Asa en 300 bar in Kamchatka bij de uitbarsting van de Bezymiany in 1956, waar bij de explosie van de Bezymiany slechts 300 bar druk optrad en een energie van 9520 ton TNT vrijkwam.

Vulkanische erupties vinden onderin de aardse atmosfeer plaats en blazen de materie hoogstens tot in de hoge stratosfeer. Bolletjes van basalt en kwartskorrels worden daarbij snel vertraagd door de luchtweerstand en vallen na vrij korte tijd op de grond. Explosief vulkanisme kan echter wel lichte deformaties in kwartskristallen teweegbrengen. Er zijn daarom deskundigen die menen dat wij nog onvoldoende weten over de effecten die bij tektonische processen kunnen optreden. De tijd van modern onderzoek is immers nog zo kort in vergelijking met de grote ouderdom van de Aarde dat het geenszins ondenkbaar is dat er in het verleden ook bij dit soort processen grote schokeffecten zijn opgetreden, want tektonische effecten blijken immers toch ook lamellenachtige structuren in enkele mineralen te kunnen veroorzaken, die echter vaak moeilijk van de door schokeffecten veroorzaakte patronen zijn te onderscheiden. Afb. 4. Daardoor was het tot voor kort onmogelijk definitief te beslissen of de structuren in sommige mineralen inderdaad een gevolg van inslag moesten zijn.

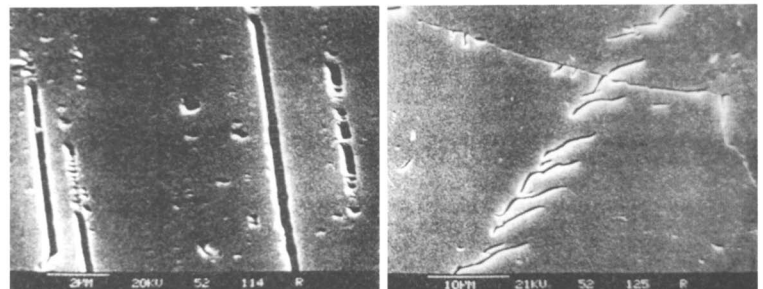
Bevestiging van de inslag aan Krijt-Tertiairgrens

In de afgelopen jaren zijn wij menigmaal geconfronteerd met de problemen van de K/T-grens, de overgang van Krijt naar Tertiair. We weten zo langzamerhand allemaal dat het uitsterven van de dinosauriërs en de vele veranderingen die aan het eind van de Krijtperiode plaatsvonden door velen worden toegeschreven aan een reusachtige kosmische inslag van een wellicht meer dan 20 km grote impactor, die bijna 400 miljoen Mton energie produceerde. Er zijn echter ook geleerden, die aan de inslaghypothese twifelen. Zij menen dat tektonische processen, reusachtige vulkanische erupties of wellicht het samentreffen daarvan met een inslag geheel of deels voor de effecten die we aan de K/T-grens waarnemen verantwoordelijk zijn.

B.F. Bohor van de U.S. Geological Survey uit Denver en D.M. Triplehorn van de Universiteit van Alaska ontdekten in de K/T-grenslagen geschokte kwartskorrels. Zelfs in diepzeesedimenten van de K/T-grens zijn ze gevonden. Afb. 5. Ze vertonen planaire lamellen, zoals optreden na hevige schokgolven bij inslagen en kernexplosies, maar het was tot voor kort onmogelijk definitief te beslissen, of deze lamellen inderdaad aanwijzingen van inslag waren of toch een gevolg van een schok door gigantische tektonische effecten. Met een techniek die kathode-luminescentie genoemd wordt brachten verschillende onderzoekers de kwartskorrels van de K/T-grens tot gloeien. De kleuren die ze dan produceren wijzen



op kwarts, ontstaan bij inslag uit gewone sedimentaire zandsteen. Bruce F. Bohor en zijn medewerkers hebben nu kort geleden de planaire deformaties in kwarts met een SEM (Scanning Electron Microscope) onderzocht; na etsen met fluorwaterstof is het mogelijk onderscheid te maken tussen lamellaire deformaties door schokmetamorfose na een inslag en die door tektonische deformatie. Afb. 6. Met een gewone microscoop zijn die niet te onderscheiden. De inslaglamellen zijn gewoonlijk scherper en dunner (< 100 nm), meer planair en in het algemeen continu en gevuld met glas. De tektonische lamellen zijn volgens J.S. Alexopoulos en zijn medewerkers gewoonlijk iets gebogen (wat golvend) en vaak discontinu en zonder glas. Door etsen worden de glaslamellen in de SEM beter zichtbaar. De zogenaamde schoklamellen in de lagen onder en boven de K/T-grens zijn tektonisch. Die in de kwartskorrels op de K/T-grens zijn schokmetamorf. Dit onderzoek bewijst opnieuw, naast vele andere aanwijzingen, dat er inderdaad een enorme inslag aan de K/T-overgang plaatsvond.



Afb. 6. Links zijn door schok teweeggebrachte planaire deformatie-structuren afgebeeld (PDF's) van de Haughton inslagkrater uit Canada, rechts zijn lamellaire deformaties weergegeven, die door tektonische deformatie ontstonden in kwartsiet uit Kansas. Beide opnamen, met de SEM gemaakt en geëts met fluorwaterstof, tonen nu duidelijke verschillen. Het golvende patroon in de tektonische deformaties is opvallend. (Naar B.F. Bohor en zijn medewerkers in LPSC, 26, 146, 1995).