

# de dag die de Aarde voorgoed veranderde

door Johan Vellekoop, Universiteit Utrecht  
J.Vellekoop@uu.nl

Eén van de meest catastrofale gebeurtenissen in de geschiedenis van het leven vond ongeveer 66 miljoen jaar geleden plaats op de grens van Krijt en Paleogeen. Binnen relatief korte tijd stierf ongeveer de helft van alle dier- en plantensoorten uit, waaronder bekende diergroepen als de dinosauriërs, vliegende reptielen, ammonieten en belemnieten. Na decennia van onderzoek wijst een overweldigende hoeveelheid bewijzen erop dat deze massa-extinctie veroorzaakt is door de inslag van een grote asteroïde. Inmiddels begint de internationale wetenschappelijke focus langzaam te verschuiven van de vraag hoe realistisch dergelijke inslagen zijn naar vragen zoals: Wat zijn de effecten van zulke inslagen op wereldschaal? Hoe herstelt het leven op Aarde zich van een dergelijke grote crisis? Deze twee vragen staan centraal in mijn promotieonderzoek. In dit artikel zal ik eerst ingaan op de wetenschappelijke achtergrond van deze massa-extinctie en de zoektocht naar de oorzaak. Ik zal ingaan op de belangrijkste ontdekkingen van de afgelopen dertig jaar en besluiten met de meest recente inzichten en voorlopige resultaten uit mijn promotieonderzoek.

## De geschiedenis van een geologische grens

Allereerst wil ik de Krijt-Paleogeengrens plaatsen in het perspectief van de geologische tijd. De Aarde is ruim 4,5 miljard jaar oud, maar slechts de laatste 542 miljoen jaar (het Fanerozoïcum) worden gekenmerkt door de aanwezigheid van fossielen van dieren en planten. Oudere fossielen beperken zich tot eencellige organismen.

Bijna alle belangrijke evolutionaire ontwikkelingen van het leven hebben in dit eon plaatsgevonden. Het Fanerozoïcum wordt

onderverdeeld in het Paleozoïcum, het Mesozoïcum en het Cenozoïcum. Het was de Britse geoloog John Phillips (1800-1874) die in zijn werk uit 1860 *'Life on Earth: It's Origin and Succession'* deze drie era's benoemde. Phillips kwam hierin tot de conclusie dat de geschiedenis van het leven in ruwweg drie fases te verdelen is, elk gekenmerkt door andere soorten fossielen. Opmerkelijk is dat deze fases, de huidige era's, worden van elkaar gescheiden door een relatief snelle, sterke afname van de diversiteit van het leven, gevolgd door de opkomst van nieuwe levensvormen en groepen. Dit was de eerste beschrijving van wat later bekend kwam te staan als het fenomeen van de massa-extincties. De sterke afname van de diversiteit die plaatsvond op de grens tussen het Mesozoïcum en het Cenozoïcum is de massa-extinctie die ongeveer 66 miljoen jaar geleden plaatsvond op de grens tussen de geologische perioden Krijt en Paleogeen (afb. 1). Het is één van de twee belangrijkste geologische grenzen van het Phanerozoïcum. De andere belangrijke grens is die tussen het Perm en het Trias, die ook gekenmerkt wordt door een massa-extinctie.

Over de Krijt-Paleogeengrens wordt al eeuwen gepubliceerd. Zodoende zijn zowel de naam als de ouderdom door de jaren heen aan verandering onderhevig geweest. Misschien bent u beter bekend met deze grens onder zijn oude benaming, de Krijt-Tertiairgrens. Sinds de jaren '80 is een tweedeling van het Tertiair in Paleogeen en Neogeen echter steeds gebruikelijker geworden. De naam Paleogeen werd al in het midden van de 19e eeuw gebruikt, maar het was in 2003 dat de ICS (*International Commission on Stratigraphy*, de instantie die de internationale standaardisering van de geologische tijdschaal regelt) besloot het Tertiair af te schaffen. Na een aantal jaren discussie heeft men uiteindelijk besloten om officieel het gebruik van Paleogeen en Neogeen te adviseren in de plaats van Tertiair. Ik zal daarom de naam Paleogeen aanhouden.

Behalve de naam zijn ook de ideeën over de ouderdom van deze grens door de jaren veranderd. Tot 2008 werd de grens over het algemeen op 65 miljoen jaar geleden geplaatst, maar als gevolg van betere dateringen is de afgelopen jaren gebleken dat de grens beduidend ouder was. Vanaf 2008 ging men er vanuit dat dit ongeveer 65,5 miljoen jaar was, maar in 2013 is dit zelfs bijgesteld tot ongeveer 66 miljoen jaar (Renne et al., 2013).

## Slachtoffers

66 miljoen jaar geleden vond dus de laatste grote massa-extinctie plaats. Op het land stierven alle grote landdieren uit. Hieronder natuurlijk de bekende dinosauriërs en vliegende reptielen, maar daarnaast bijvoorbeeld ook alle grotere zoogdieren en amfibieën. Sterker nog, alle landdieren groter dan de gemiddelde hond stierven uit. Bijzonder genoeg gingen er wel veel planten dood, maar stierven slechts enkele groepen werkelijk uit. De meeste plantengroepen konden door middel van sporen en zaden overleven, om vervolgens na de crisis weer op te komen. In de oceanen was dat wel anders. Daar waren de gevolgen nog veel desastreuzer. Meer dan 50% van alle groepen verdwenen, waaronder ook enkele belangrijke planktongroepen. Aangezien deze de basis voor de mariene voedselketen zijn, resulteerde dit in het ineenstorten van globale ecosystemen. Onder de uiteindelijke slachtoffers waren ook bekende groepen als de ammonieten en belemnieten en grote gewervelden als de mosasauriërs. Eén van de bijzondere eigenschappen van deze

Eon	Era	Tijdperk	Tijdvak	Stage/Etage	Ouderdom (Ma)
Phanerozoïcum	Cenozoïcum	Paleogeen	Paleoceen	Thanetien	56,0-59,2
				Seelandien	59,2-61,6
				Danien	61,6-66,0
	Mesozoïcum	Krijt	Laat-Krijt	Maastrichtien	66,0-72,1
				Campanien	72,1-83,6
				Santonien	83,6-86,3
				Coniacien	86,3-89,8
				Turonien	89,8-93,9
				Cenomaniën	93,9-100,5

Afb. 1. Een gedetailleerde stratigrafie van de Krijt-Paleogeengrens. Bron: ICS.

massa-extinctie is dat deze heel abrupt plaatsvond. Over de hele wereld is de Krijt-Paleogeengrens dan ook te herkennen als een abrupte overgang in de gesteentes (afb. 2). Dit is een redelijk unieke eigenschap in de geologie, die voor de meeste geologische grenzen dus niet geldt.



Afb. 2. Een foto van de K/Pg-grens in de Bajada del Jaguël sectie, tijdens veldwerk in Argentinië in 2012. Een mooi voorbeeld van een abrupte lithologische overgang op de grens. Foto: Jan Smit, VU Amsterdam.

## Wetenschappelijke consensus

De bijzondere eigenschappen van de Krijt-Paleogeengrens trokken al vroeg de aandacht van geologen en door de eeuwen heen zijn er heel wat mogelijke verklaringen bedacht. Waar 18e-eeuwse geologen als George Cuvier extincties nog toeschreven aan Bijbelse zondvloed, werd dit beeld in de 19e eeuw steeds meer vervangen door de modernere wetenschappelijke visies van beroemde geologen als James Hutton en Charles Lyell, die allebei pleitbezorgers waren van wat men tegenwoordig het *gradualisme* of *uniformitarianisme* noemt. Deze visie gaat ervan uit dat alle belangrijke geologische processen gradueel verlopen, zoals ze dat tegenwoordig nog steeds doen. Dit idee heeft bijna tweehonderd jaar standgehouden in de geologie en is ook vandaag de dag nog grotendeels geaccepteerd.

In begin jaren '80 van de afgelopen eeuw kwamen twee geologen echter onafhankelijk van elkaar tot de conclusie dat deze gradualistische kijk niet van toepassing is op de Krijt-Paleogeengrens. Het waren de Amerikaanse geoloog Walter Alvarez en de Nederlandse geoloog Jan Smit die allebei in 1980 een artikel publiceerden waarin zij aantoonde dat de massa-extinctie op de Krijt-Paleogeengrens waarschijnlijk door de inslag van een grote komeet of meteoriet werd veroorzaakt (Alvarez et al., 1980 en Smit en Hertogen, 1980). Allebei vonden zij precies op de grens hoge concentraties van zeldzame elementen die afkomstig van een buitenaardse bron moesten zijn, aangezien deze elementen zeer zeldzaam zijn in de aardkorst. Het belangrijkste en bekendste van deze elementen is iridium, dat op de Krijt-Paleogeengrens voorkomt met tot meer dan 100 keer de normale concentratie.

In de beginjaren na deze ontdekking was er nog redelijk veel weerstand tegen deze catastrofistische hypothese en werden er alternatieve, meer gradualistische oorzaken voor de massa-extinctie geopperd, waaronder bijvoorbeeld de aanwezigheid van een grote vulkanische provincie in het huidige India, de Deccan Traps. Al gauw werden er echter meer en meer bewijzen gevonden voor een grote inslag op de K/Pg-grens, zoals een wereldwijd laagje met daarin materiaal dat bij de inslag is gevormd. In dit laagje zitten behalve iridium ook kleine bolletjes, zogenaamde microkrystieten, en geschokte kwartskorrels; zowel de microkrystieten als de geschokte kwartskorrels zijn

tijdens de inslag gevormd (Smit, 1999). Uiteindelijk vond men in 1991 als laatste troef ook een grote inslagkrater op Yucatan, Mexico (Hildebrand et al., 1991). Deze krater heeft een diameter van meer dan 200 kilometer en behoort daarmee tot de grootste inslagkraters op Aarde. Dit alles heeft ertoe geleid dat het tegenwoordig de wetenschappelijke consensus is dat de massa-extinctie op de Krijt-Paleogeengrens werd veroorzaakt door deze inslag (Schulte et al., 2010). Deze consensus is zo breed dat de inslag zelf inmiddels zelfs is opgenomen in de definitie van de Krijt-Paleogeengrens. De grens *zelf* wordt tegenwoordig gedefinieerd als het moment van de inslag.

## Gevolgen van de inslag

Na dertig jaar onderzoek beginnen we langzamerhand een beeld te krijgen van deze catastrofale gebeurtenis. Op basis van de grootte van de inslagkrater en de hoeveelheid meteorietstof die destijds over de Aarde is verspreid wordt ingeschat dat de diameter van de asteroïde die op de Krijt-Paleogeengrens op Aarde insloeg ruwweg 10 kilometer moet zijn geweest. Deze inslag moet een waar armageddon hebben veroorzaakt, met een opeenvolging van regionale en globale catastrofes (afb. 3). De nasleep van de inslag wordt vaak beschreven in drie delen: de 'vuurbal-fase' in de eerste uren na de inslag, de 'inslagwinter-fase' in de decennia na de inslag en uiteindelijk de 'broeikas-fase' de eerste paar duizend jaar daarna (Kring, 2007).



Afb. 3. Een artist-impression van de inslag op de K/Pg-grens. Bron: Carsten Egestal Thuersen (GEUS).

Aangezien de 'vuurbal-fase' zo kort duurde, kunnen we tot op heden alleen speculeren wat er precies in deze eerste fase plaatsvond. We weten dat bij de inslag van een 10 km grote asteroïde ongelooflijk veel energie vrij moet zijn gekomen. Deze energie zal de atmosfeer hebben opgewarmd, waarschijnlijk zo veel dat dit resulteerde in wereldwijde bosbranden. Vandaar de term 'vuurbal-fase'. Tegelijkertijd werden de kusten van de Golf van Mexico en de Atlantische Oceaan getroffen door ongekend krachtige tsunami's, die een golf van verwoesting achterlieten in deze regio's. Op veel plekken vinden we dus ook karakteristieke tsunami-afzettingen.

Bij de inslag kwam waarschijnlijk een grote hoeveelheid stof en aerosolen vrij en modelsimulaties doen vermoeden dat, zodra de 'vuurbal-fase' voorbij was, de Aarde in een koude en donkere periode terechtkwam die tussen een jaar en een eeuw moet hebben geduurd: een zogenaamde 'inslagwinter'. Het idee is dat de vrijgekomen stofdeeltjes, roetdeeltjes en aerosolen in de atmosfeer bleven hangen waardoor het zonlicht tijdelijk werd geblokkeerd, zodat het donker werd op Aarde en het aardoppervlak snel afkoelde. Deze duisternis maakte fotosynthese onmogelijk, waardoor planten en algen stierven en mariene en terrestrische ecosystemen als gevolg daarvan ineens stortten. Deze decennia aanhoudende inslagwinter is waarschijnlijk één van de belangrijkste oorzaken geweest van het massaal uitsterven van planten en dieren. Nadat het stof en de aerosolen uit de atmosfeer waren geregend, kon het zonlicht het aardoppervlak weer bereiken en warmde de Aarde weer op. Tot nu toe was het

idee van een dergelijke inslagwinter alleen gebaseerd op modelstudies en indirecte bewijzen, maar inmiddels heb ik tijdens mijn promotieonderzoek de eerste harde bewijzen voor deze fase gevonden. Hiermee wil ik dit artikel afsluiten.

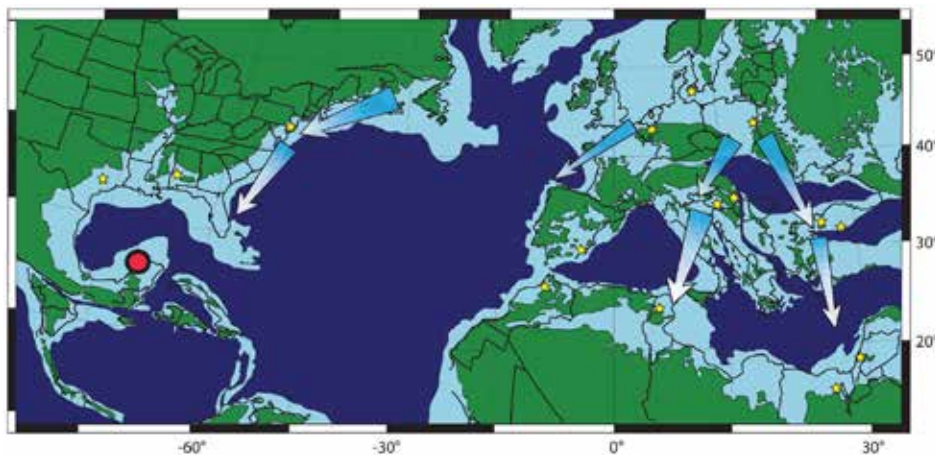
### Bewijzen voor een inslagwinter

In mijn onderzoek maak ik gebruik van een combinatie van biologische, geologische en chemische methodes. Deze combinatie van verschillende methodes moet inzicht verschaffen in de klimatologische en biologische gevolgen van de meteorietinslag op de K/Pg-grens. Mijn onderzoek richt zich hoofdzakelijk op het gebruik van twee verschillende methodes: palynologie en organische geochemie. Palynologie is de studie van organische resten die in sedimenten terug zijn te vinden, zoals pollen en sporen, maar ook resten van bepaalde planktongroepen.



Afb. 4. *Manumiella seelandica*, een voorbeeld van een organische dinoflagellaten-cyst. Foto: Johan Vellekoop, Universiteit Utrecht.

Eén van de weinige planktongroepen die de K/Pg-grens heeft overleefd, zijn de dinoflagellaten. Een deel van deze dinoflagellaten vormen cysten met een organische wand, zogenaamde dinocysten, die in sedimenten terug te vinden zijn (afb. 4). Diverse studies hebben aangetoond dat een kwantitatieve analyse van dinocysten kan worden toegepast bij de reconstructie van veranderingen van het milieu, zoals klimaatverandering en veranderende oceaanstromingen. Op verschillende locaties vinden wij bewijzen voor migraties van koudwater-dinoflagellaten, wat aannemelijk maakt dat het oppervlaktewater na de inslag afkoelde (afb. 5).



Afb. 5. Palaeogeografie van Europa, Noord-Afrika en Noord-Amerika rond de K/Pg-grens, met migratiepatronen van dinoflagellaten direct na de inslag. Bron: Vellekoop et al., ongepubliceerd.

Hoewel de analyse van dinocysten gebruikt kan worden om milieuveranderingen te onderscheiden, is de kwantificatie van deze veranderingen niet mogelijk met alleen palynologie. In het afgelopen decennium zijn er nieuwe technieken ontwikkeld om absolute temperaturen van zeewater en atmosfeer te reconstrueren op basis van de distributies van organische biomarkers. Eén van die technieken is de TEX<sub>86</sub> proxy, waarmee de temperatuur van het oppervlak van het zeewater bepaald kan worden. Deze techniek maakt gebruik van vetten uit het celmembraan (membraanlipiden) van de Thaumarchaeota, een specifieke groep mariene microben. Deze Thaumarchaeota passen de aanmaak van membraanlipiden aan aan de zeewatertemperatuur. Deze lipiden blijven bewaard in sedimenten en sedimentaire gesteentes. Door de distributie van deze lipiden in gesteenten te bestuderen, kunnen wij de temperatuur van het zeewater reconstrueren. Deze methode is al met succes toegepast voor verschillende tijdsintervallen in het Krijt, Paleogeen en Neogeen, maar tot nu toe nog niet op de K/Pg-grens.

Tijdens mijn promotieonderzoek probeer ik voor de eerste keer een reconstructie te maken van de temperatuurveranderingen over de K/Pg-grens heen door middel van de TEX<sub>86</sub> temperatuur-proxy. Een van de locaties waar ik de TEX<sub>86</sub> proxy heb toegepast is de Brazos River-sectie in Texas, waar de K/Pg-grens wordt gekenmerkt door een tsunami-afzetting. Hier zien wij dat direct na de inslag het zeewater meer dan 7 graden afkoelde. Inmiddels hebben wij een dergelijke afkoeling op meerdere plekken kunnen constateren.

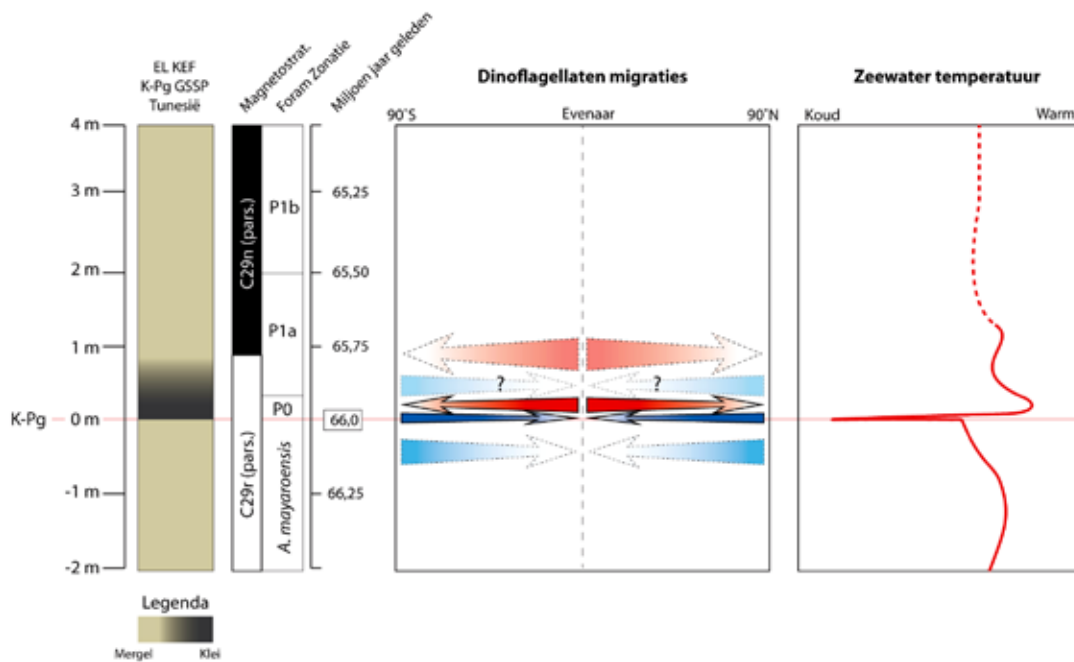
Onze reconstructies van de temperatuur van het zeewater en de migratiepatronen van dinoflagellaten vormen de eerste directe bewijzen voor de globale gevolgen van de stofdeeltjes die door de inslag de atmosfeer in werden geschoten en het zonlicht lange tijd blokkeerden (afb. 6). Ook hebben we aanwijzingen gevonden voor buitengewoon sterke stormen tijdens deze 'inslagwinter-fase'. Onze huidige hypothese is dat door een relatief snelle afkoeling van land en atmosfeer er grote verschillen in temperatuur ontstonden tussen enerzijds land en atmosfeer en anderzijds de oceanen. Wij denken dat dit in tot een soort super-orkanen heeft geleid.

De inslagwinter werd uiteindelijk gevolgd door een periode van versterkte broeikascondities, één van de langetermijneffecten van de verstoring van de koolstofcyclus, onder andere door het massale uitsterven van de planten en door koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) dat was vrijgekomen door de verbranding van kalksteen bij de inslag.

Dit was de eerdergenoemde 'broeikasfase'. Het duurde vervolgens weer vele duizenden jaren voordat deze extra vrijgekomen broeikasgassen weer waren vastgelegd en het klimaat op Aarde zich weer kon herstellen.

### Tot slot

Al met al beginnen wij een steeds beter beeld te krijgen van de gevolgen van de inslag op de Krijt-Paleogeen-grens. Het moet een catastrofale gebeurtenis geweest zijn, met zeer grote gevolgen voor het leven op Aarde, zowel op de korte termijn als lange termijn. We kunnen stellen dat het leven op Aarde op deze ene fatale dag voorgoed veranderde.



Afb. 6. Een reconstructie van migraties van dinoflagellaten en temperatuurveranderingen over de K/Pg-grens. Bron: Vel-lekoop et al., ongepubliceerd.

## Referenties

- Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H.V., 1980. Extra-terrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science* 208: 1095-1108.
- Hildebrand, A. R., et al., 1991. Chicxulub crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology* 19 (9), 867-871.
- Kring, D.A., 2007. The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 255 (1-2), 4-21.
- Phillips, J., 1860. *Life on the Earth: its Origin and Succession*, Cambridge and London, Macmillan and Company, 224 p.
- Renne, P.R., et al., 2013. Time Scales of Critical Events Around the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science* 339: 684-687.
- Schulte, P., et al., 2010. The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science* 327: 1214-1218
- Smit, J. Hertogen, J., 1980. An extraterrestrial event at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature* 285, 198.
- Smit, J., 1999. The Global Stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary Boundary Impact Ejecta. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 27, 75-113.