

Mitt. bad. Landesver. Naturkunde u. Naturschutz	N.F. 17	4	853 – 873	2001	Freiburg im Breisgau 12. Juli 2001
--	---------	---	-----------	------	---------------------------------------

Die Kreide/Tertiär Wende – neue Erkenntnisse zur Ursache von Florenveränderungen

von

David K. Ferguson, Wien*

Summary: The proposal that a bolide impacted the Earth at the Cretaceous/Tertiary (K/T) boundary has seriously undermined the concept of uniformitarianism and radically altered our perception of evolution and extinction in the organic world. In the present article the bolide scenario is presented and a number of arguments, which have been mustered in its support, expounded. This evidence is then subjected to a critical appraisal. Some of the testimony for a world-wide catastrophe is found to be either poorly founded or open to alternative explanations. As the palaeobotanical record is often cited in support of the bolide scenario, the changes in the terrestrial vegetation across the K/T boundary in various parts of the world are scrutinized. It is shown that, with the exception of the western United States, the changes which occurred were by no means catastrophic and more consistent with a climatic explanation. Even in North America many Cretaceous plants persisted into the Tertiary. The fact that the continent was soon recolonized by vegetation argues against a world-wide catastrophe.

Einleitung

Wenn man den größten Teil der Literatur über die Kreide/Tertiär (K/T) Wende der letzten Jahre liest, kann man den Eindruck bekommen, dass die Entwicklung, welche die Angiospermen im Laufe der Kreide durchgemacht haben, umsonst war. Nach Meinung vieler Wissenschaftler wurde die Erde vor ca. 65 Millionen Jahren von einem großen Boliden (Asteroid bzw. Komet) von 10 ± 4 km Durchmesser getroffen. Glaubt man diesem Szenario, so hat die bei dem Einschlag entstandene riesige Partikelwolke zusammen mit der Asche der weltweiten Brände (VENKATESAN & DAHL 1989), die durch die Hitze niederfallender Gesteinsschmelze ausgelöst worden waren, die Erde für einige Monate verdunkelt (POPE et al. 1994, ALVAREZ 1997). Als Folge der Dunkelheit fand ein Temperatursturz und ein starkes Absinken der Photosyntheseleistung statt; es herrschte ein Szenario, wie es auch für einen Nuklearwinter angenommen wird. Ohne Pflanzen jedoch gab es keine Überlebenschancen für Herbivoren, und auch die Karnivoren wären, nach einer Übergangsperiode als Aasfresser, verhungert (ALVAREZ 1997).

* Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. D. K. FERGUSON, Institut für Paläontologie/Geozentrum, Universität Wien, Althanstr. 14, A-1090 Wien

Lediglich Detritusfresser (z.B. Insekten, Schnecken oder Würmer) und Insektivoren (z.B. Säugetiere) konnten unter diesen Umständen überleben. Danach ist die Temperatur – als Folge der hohen Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, hervorgerufen durch Sublimation der Kalksteine im Krater, Brände und mikrobiellen Abbau der toten Organismen – wieder angestiegen. Dieser Treibhauseffekt dauerte wahrscheinlich 1.000 bis 100.000 Jahre (HOLLANDER et al. 1993, ALVAREZ 1997).

Der Beweis für einen Boliden

In Gubbio, N-Italien, sind Kreide- und Tertiärschichten durch einen 1 cm dicken Grenzton getrennt. Da die Faunen auf beiden Seiten dieser Grenzschicht sehr unterschiedlich sind, war der erste Gedanke, dass dieser Grenzton eine kondensierte Sedimentation repräsentiert. Aber, wie lange hat seine Ablagerung gedauert? Um diese Frage zu beantworten, wollten LUIS ALVAREZ, sein Sohn und einige Kollegen eine „außerirdische Uhr“ in der Form von Iridium verwenden. Iridium ist ein Element der Platin-Gruppe, das z.B. im kosmischen Staub vorkommt. Dadurch, dass sie die in der Grenzschicht gemessene Menge an Iridium durch die Iridiumkonzentration im kosmischen Staub dividierten, wollten sie die absolute Sedimentationsdauer berechnen. Sie fanden aber eine Ir-Anreicherung, die 30 mal höher war als der Nulleffekt. Das bedeutete, dass die Ablagerung des Grenztones fast 0,5 Millionen Jahre benötigte hätte (ALVAREZ et al. 1990). Da die Ablagerung der 5-6 m mächtigen Kalksteinschicht, die in dieser Zone gefunden wird, ebenso lange brauchte (OFFICER 1992), war die Möglichkeit einer Bildung der Grenzschicht durch „normale Ablagerungsprozesse“ ausgeschlossen. Eine Erklärung dieser Befunde schien der Einschlag von einem oder mehreren Boliden, d.h. Meteoriten bzw. Kometen, zu sein. Aber wenn ein solcher Einschlag wirklich stattgefunden hat, müssten die Folgen auch in anderen Teilen der Erde nachweisbar sein. Dies bestätigte sich, da Proben des Grenztones aus Neuseeland und Dänemark auch einen Ir-Peak an der K/T Grenze von 20 bzw. 160 mal dem Nulleffekt zeigen (ALVAREZ et al. 1980). Seitdem hat man Ir-Anreicherungen um das 30 bis 300fache (ALVAREZ et al. 1990) in mehr als 100 terrestrischen und marinen Lokalitäten von der Seymour-Insel (62°S) bis zur Police-Insel, N.W.T., Kanada (ca. 65° N) entdeckt, was die Boliden-Hypothese zu bestätigen scheint.

Das Vorkommen einer – auf der Erde zwar seltenen aber von Steinmeteoriten bekannten – Aminosäure in den Sedimenten direkt an der K/T Grenze, spricht auch für einen außerirdischen Ursprung. Da Aminosäuren in Kometen fehlen, und das Vorhandensein von Iridium fraglich ist (OFFICER & PAGE 1996), macht dieser Befund eher den Einschlag eines Asteroiden bzw. Meteoriten wahrscheinlich.

Der 10 km große Asteroid, der vermutlich auf der Erde mit einer Geschwindigkeit von 20-30 km/s einschlug, löste eine riesige Schockwelle aus, was ein Erdbeben von vermutlich 10,1-12,4 auf der Richterskala zur Folge hatte. Nach der Druckentlastung wurde sehr viel Wärme freigesetzt. Da Gesteine nur schlechte Wärmeleiter sind, hat sich diese Hitze in der Umgebung des Einschlagkreises konzentriert. Bei Temperaturen von bis zu 10.000°C wurden sowohl der Asteroid als auch das Umgebungsgestein aufgeschmolzen und z. T. sublimiert. Kleine geschmolzene Glaskügelchen, sogenannte Mikrotektite (0,01-1 mm) bzw. Tektite (1-10 mm) (BOHOR 1990, LEROUX et al. 1995), wurden aus dem Krater hinausgeschleudert. Durch Hydrolyse ist das Glas der Mikrotektite im Laufe der Zeit größtenteils zu Tonmineralien (Goyazit, Palagonit, Smektit etc.) umgewandelt worden. Manchmal

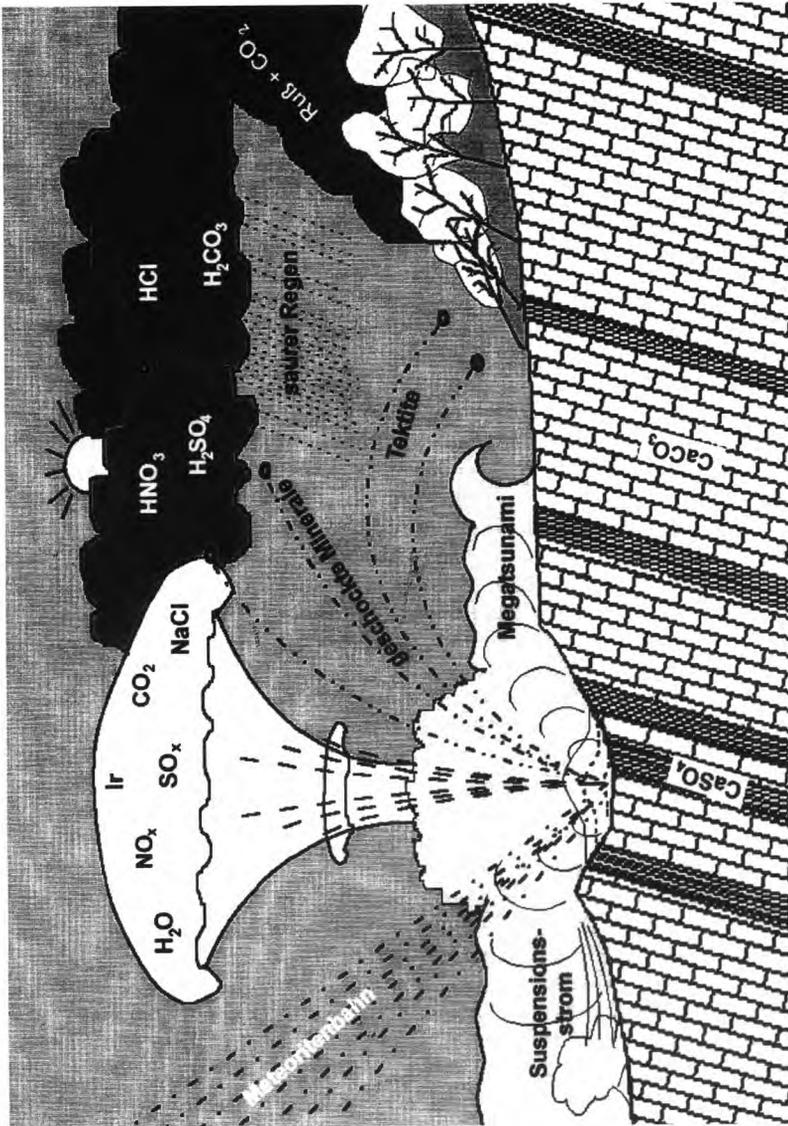


Abb. 1: Das Bolidszenario als mögliche Erklärung für die K/T Ereignisse.

bleibt aber ein Glaskern übrig, an dem die chemische Zusammensetzung untersucht werden kann. Die weltweite Verbreitung dieser Mikrosphären wird als Beleg für die Wucht des Einschlages angesehen.

Der Druck, mit dem der Asteroid auf die Erdkruste aufprallte, erschütterte das Umgebungsgestein sehr stark. Die Kristallstruktur der individuellen Minerale wurde dabei grundlegend verändert. So zeigen die Quarzkristalle bis zu fünfzehn verschiedene Bruchflächen, einen abnormal niedrigen Brechungsindex, der durch das

Vorhandensein von diaplektischem Glas verursacht wird, sowie Asterismus, bei dem das Beugungsgitter bei der Röntgenanalyse gestreift erscheint (BOHOR 1990). Solche stark „geschockten Minerale“ sind nur von Meteoritenkratern und Atombombenversuchsgeländen bekannt (BOHOR 1990). Die Tatsache, dass „geschockte Minerale“ (meistens Quarz, aber auch Feldspat, Chromit und Zirkon) an der K/T Grenze in vielen Ländern (Dänemark, Österreich, Spanien, Italien, Turkmenien, Neuseeland, Kanada und USA) gefunden worden sind (BOHOR 1990), weist auf die enorme Kraft des Einschlages oder mehrerer Einschläge hin. Im N-Pazifik, in W-Nordamerika und auf Haiti sind „geschockte Minerale“ besonders häufig (25-47-70) % der Quarzkörner, dagegen weniger als 0,2 % in Europa und Neuseeland) und auch größer als in anderen Gebieten der Welt (OFFICER & DRAKE 1985, BOHOR 1990). Ihre maximale Größe nimmt in N-Amerika in nördlicher Richtung ab, was auf eine Herkunft aus dem Süden deutet.

Obwohl diese Ergebnisse einen deutlichen Hinweis auf einen Einschlag geben, konnte man lange Zeit keinen Krater der entsprechenden Größe und des richtigen Alters finden. Für das Fehlen eines solchen Kraters sind allerhand Erklärungen gefunden worden, wie z.B. dass der Krater unter der Binneneisdecke der Antarktis verborgen liegen würde, dass der Bolide im wenig erforschten Südpazifik eingeschlagen sei, oder dass der Krater durch tektonische Bewegungen subduziert worden sei. Erst vor einigen Jahren entdeckte man bei Chicxulub auf der Halbinsel Yucatán in Mexiko eine kreisförmige Struktur, die man als Krater interpretieren konnte. Dieser Krater, der eine mehrfache Ringstruktur besitzt, hat abhängig von den gewählten Begrenzungen, einen Durchmesser von 170-300 km (HILDEBRAND et al. 1995, POPE et al. 1991, ALVAREZ 1997, POPE 1997). Da der Kraterboden unter 1000-1200 m mächtigen Sedimenten begraben liegt, konnte er fast nur mit Hilfe von geophysikalischen Vermessungen erkannt werden. Bei Bohrungen stieß man auf eine 500-800 m dicke Schicht aus Brekzien mit „geschockten Mineralen“ und geschmolzenen Gesteinen. Vier $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Datierungen an Glas, das aus fast 500 m Tiefe in den Brekzien stammte, lieferte eine Altersbestimmung von $64,94 \pm 0,11 - 65,2 \pm 0,4$ Millionen Jahren (SHARPTON et al. 1992). Da der Asteroid vermutlich in seichtem Wasser von weniger als 50 m Tiefe aufprallte, in dem sich Kalksteine (CaCO_3) und Anhydrit (CaSO_4) während der Kreidezeit abgelagert hatten, wurden beim Aufprall grosse Mengen an Wasserdampf, Kohlendioxid (CO_2) und Schwefeldioxid (SO_2) freigesetzt.

Kohlendioxid ist teilweise für den Treibhauseffekt und für die verstärkte Verwitterung verantwortlich. Das Schwefeldioxid reagierte mit Sauerstoff und Wasserdampf zu Schwefelsäure (H_2SO_4) (POPE et al. 1994, KRING et al. 1996). Durch die Rückstrahlung der Sonnenenergie verursachte die Schwefelsäure trotz des erhöhten Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre einen Temperaturrückgang von einigen Grad Celsius. Diese Phase dauerte vermutlich zwei bis drei Jahre. Da der Wasserdampf salzhaltig war, bildete sich in der Stratosphäre auch Salzsäure.

Durch Reaktion der Schwefelsäure mit Natriumchlorid entsteht Natriumsulfat, welches die Ozonschicht zerstört. Hierdurch wurden die Organismen einer erhöhten UV-Strahlung ausgesetzt. Als dann schließlich die Säuren abregneten, begann eine Periode mit saurem Regen, und ein Waldsterben begann. Die Säuren verstärkten ihrerseits die chemische Verwitterung und lösten z.B. Kalkstein auf, wodurch noch mehr Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangte.

Der saure Regen brachte außerdem schwer lösliche Metalle ins Grundwasser. Ein Teil dieser Elemente, wie Al, Be, Hg, Tl, sind höchst giftig für Pflanzen und Tiere. Durch die dauerhafte hohe Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre folgte auf

den „Nuklearwinter“ eine Erwärmungsphase um 2 bis 10°C. Wie um den Kreis des Untergangs zu schließen, konnten Kohlendioxid und Wasserdampf miteinander zu Kohlensäure reagieren und so den Effekt des sauren Regens noch verstärken.

Neben diesen „Langzeiteffekten“ hatte der Einschlag eines solch großen Asteroiden selbstverständlich auch unmittelbare Auswirkungen. Wie bei einem gewaltigen Seebeben, musste der Aufprall des Boliden Rutschungen von unverfestigten Sedimenten (Suspensionsströme) und eine Megatsunami im Golf von Mexiko ausgelöst haben (ALVAREZ 1997). Die Kraft dieser Flutwelle hatte enorme Felsblöcke losreißen können und die gesamten Biozönosen im Gezeitensaum zerstört. Beim Rückfluss wurden grobe Klastika aus dem Küstenbereich in die Tiefe abtransportiert. Falls dieses Szenario stimmt, sollte man erwarten, dass die feinkörnigen Sedimente gerade an der K/T Grenze durch eine grobkörnige Schicht unterbrochen sind. Eine solche 0,02-11 m dicke Schicht gibt es aber tatsächlich im Gebiet rund um den Golf von Mexiko und entlang der Atlantikküste bis nach New York (SMIT et al. 1992, OLSSON et al. 1997). Ganz unten in der Schichtenfolge befindet sich meistens ein Horizont mit Mikrotektoniten und geschockten Quarzen, der als ein durch einen Suspensionsstrom umgelagerter Auswurf interpretiert wird. Darauf folgt eine Sandsteinlage, die teilweise eine gradierte Schichtung aufweist. Möglicherweise repräsentiert diese Schicht den Rückfluß, der durch die Megatsunami ausgelöst wurde. Im obersten Kalksandstein bzw. Siltstein schließlich wurden unter eher ruhigen Bedingungen Oszillationsrippeln und kletternde Rippln ausgebildet. Direkt daran anschließend findet sich in einer Tonschicht die erwähnte Ir-Anreicherung. Das Vorhandensein der Ir-Anreicherung oberhalb der Grobklastika wird dadurch erklärt, dass die feinen Ir-Partikel unmöglich in turbulentem Wasser absinken konnten, sondern erst nach Beruhigung des Wassers langsam sedimentierten.

Die Attraktivität des Boliden-Szenario beruht auf der einfachen Weise, mit der verschiedene Ereignisse durch eine und dieselbe Ursache erklärt werden können. Es bleibt jedoch eine Hypothese, da es mit den heutigen Methoden der Altersbestimmung nicht möglich ist, die Gleichzeitigkeit dieser Ereignisse definitiv zu belegen. Es gibt auch andere, alternative Interpretationen, die einen großen Teil der oben erwähnten Fakten plausibel erklären können.

Einige Einwände

Nach dem man zehn Jahre lang ohne Erfolg nach einem Krater gesucht hatte, waren viele Geologen erleichtert, als sie den Chicxulub-Krater entdeckten. Die wissenschaftliche Diskussion drehte sich sofort um die Größe des Einschlagkraters und die Folgen auf die Umgebung. Nur wenige Fragen wurden über den eigentlichen Ursprung des Kraters gestellt. Lediglich bei einigen Wissenschaftlern blieb ein Gefühl des Zweifels: War Chicxulub wirklich ein Asteroidenkrater, und ist die Altersbestimmung richtig?

Neben den vier radiometrischen Datierungen aus der gleichen Schicht, die auf ein K/T Alter hindeuten, gibt es neun Messungen zwischen $65,6 \pm 0,7$ und $58,2 \pm 0,6$ Millionen Jahren (SHARPTON et al. 1992). Diese abweichenden Resultate werden häufig der Erhitzung zugeschrieben, bei der die „radioaktive Uhr“ neu eingestellt wurde. Dieses Argument kann aber nicht die Altersbestimmungen erklären, die zu einem Alter von mehr als 65 Millionen Jahren führen. Falls diese Datierungen richtig sind, muss man annehmen, dass Chicxulub über eine Zeitspanne von einigen Millionen Jahre gebildet wurde, d.h. ein Bolide könnte nicht für den Krater verantwortlich sein.

Was konnte den Krater ansonsten verursacht haben? ARTHUR MEYERHOFF und Mitarbeiter veröffentlichten 1994 einen Artikel, in dem sie erklärten, dass nach ihrer Ansicht die 500-800 m dicke Schichtenfolge vulkanischen Ursprungs sei. Diese Hypothese erklärt die Wechsellagerung von Andesit, bentonitischen Brekzien, Kalkstein und Anhydrit. Außerdem sind nach ihrer Interpretation die geschockten Quarze aus den Brekzien vom vulkanisch-tektonischen Typ, d.h. die Bruchflächen sind gebogen und manchmal gespalten. Auch die unregelmäßige Verteilung von Iridium in Chicxulub (SHARPTON et al. 1992, SCHURAYTZ et al. 1996) spricht eher für einen vulkanischen Ursprung; dass Reste eines Asteroiden nach solch einem gewaltigen Aufprall noch erhalten geblieben sind, ist wenig wahrscheinlich (OFFICER 1992).

Aufgrund der ähnlichen chemischen Zusammensetzung werden die Mikrotektite von Haiti und NE-Mexiko in Zusammenhang mit dem Ausbruch von Chicxulub gebracht. Auch die sogenannten Tsunamite wurden erneut untersucht, und mit Hilfe von Spurenfossilien konnte man zeigen, dass die Sedimentation der Grobklastika mehrmals zum Stillstand gekommen ist und die Ablagerungen durch Infaunen besiedelt wurden (KELLER et al. 1997). Dies bedeutet aber, dass die Schichtenfolge nicht innerhalb von Tagen abgelagert wurde. Infolgedessen scheint es gesichert, dass die Ir-Schicht oberhalb dieser Schichtenfolge jüngerem Datums sein muß (LEROUX et al. 1995). Die Entdeckung von Foraminiferen aus dem späten Maastricht, in einer 5-10 cm dicken Mergelschicht oberhalb der Rippelhorizontes in drei Lokalitäten NE-Mexikos scheint dies zu bestätigen (KELLER et al. 1997).

In Zentralamerika scheinen demnach innerhalb kurzer Zeit zwei Ereignisse stattgefunden zu haben: eines im Spät-Maastricht ca. 150.000 Jahre vor der K/T Grenze und ein anderes an der K/T Grenze selbst (KELLER et al. 1997). Sind beide durch Boliden ausgelöst worden? – und wenn ja, wo befindet sich der zweite Krater? Falls zwei Boliden im Spiel sind, warum gibt es nur ein Massenaussterben unter dem Zooplankton?

Ebenfalls gegen einen Bolideneinschlag spricht, dass die Mikrosphären an der Basis der klastischen Schichtenfolge, die oft als Mikrotektite interpretiert werden, keine Tektite im eigentlichen Sinne sind (SIGURDSSON et al. 1991). Sie haben z.B. keine Lechatelierit-Einschlüsse (fast reines Glas, das durch Aufschmelzung von Quarzkristallen unter hohem Druck von 35 und mehr Gigapascal entsteht). Während Tektite einen SiO₂-Gehalt von 65-85 % aufweisen und resistent gegen Entglasung sind (OFFICER 1992), haben die Mikrosphären nur 44-67 % SiO₂ und wandeln sich leicht in Tonmineralien um. Außerdem weist der im Ca-reichen gelben Glas gefundene Schwefel auf eine maximale Bildungstemperatur von 1300°C hin (SIGURDSSON et al. 1991, OFFICER 1992), was nicht den hohen Temperaturen entspricht, die bei einem Bolideneinschlag zu erwarten sind. Ein vulkanischer Ursprung ist nicht auszuschließen, da die Mikrosphären im Gegensatz zu Mikrotektiten oft hohl sind, was für einen vulkanischen Ursprung spricht. Zusätzlich sind Goyazit, Palagonit und Smeektit charakteristische Umwandlungsprodukte von Vulkanglas (OFFICER 1992, OFFICER & PAGE 1996). Laut der Boliden-Hypothese repräsentiert die Tonschicht, die manchmal an der K/T Grenze vorkommt, die Ablagerung der Staubwolke, die durch den Aufschlag entstand. Diese Meinung stimmt nicht mit den folgenden Tatsachen überein (RAMPINO & REYNOLDS 1983, HALLAM 1987, ELLIOTT 1993):

1. K/Ar-Datierungen von bis zu 329 Millionen Jahren zeigen, dass der größte Teil der Tonmineralien klastischen Ursprungs ist.
2. Die Zusammenstellung der Tonmineralien an der K/T Grenze unterscheidet sich kaum von der Zusammensetzung unterhalb und oberhalb der K/T Grenze. Es gibt auch Übergangszonen sowohl mit den liegenden wie mit den hangenden Schichten.
3. Regionale Unterschiede in der Beschaffenheit der Tone stimmen nicht mit einer homogenen Zusammensetzung überein, die von einer weltumkreisenden Staubwolke zu erwarten wäre.
4. Die Tonschichten repräsentieren mehrere Ablagerungsphasen.

Außerdem gibt es im Fischton von Dänemark (Dan, unterstes Tertiär) eine Anreicherung verschiedener Elemente (Ag, As, Cd, Mo, Re, Sb, Se, Zn), die nicht von einem Asteroid stammen können (SCHMITZ et al. 1988). Eine starke Schwefelfraktionierung lässt hierbei vermuten, dass Mikroorganismen dafür verantwortlich waren. Durch Experimente konnte gezeigt werden, dass Cyanobakterien und Eisenbakterien imstande sind Iridium zu konzentrieren. Das Vorhandensein von Lebewesen könnte also die mehrfachen Ir-Peaks und die unterschiedlichen Anreicherungs-niveaus in den K/T Grenztonen erklären. Im Fischton und Caracaton (Spanien) ist zudem ca. 50 % des Iridiums in Kerogen, welches wahrscheinlich von Phytoplankton stammt, vorhanden (SCHMITZ et al. 1988). Andererseits könnte auch eine kondensierte Sedimentation eine gewisse Rolle bei den Anreicherungsprozessen gespielt haben.

Da Iridium in Meteoriten vorkommt, wird häufig angenommen, dass die Ir-Anreicherung(en) an der K/T Grenze einen außerirdischen Ursprung haben. Elemente der Platin-Gruppe wie z.B. Iridium werden aber auch in tieferen Schichten der Erde konzentriert. Tief in der Asthenosphäre begründeter Vulkanismus (sog. „hot spots“) könnte folglich auch für eine gewisse Ir-Anreicherung in der Atmosphäre verantwortlich sein. So wurden Iridiumpartikel auch in den Eruptionswolken des Kilauea (Hawaii) gemessen, der ein „hot spot“-Vulkan ist. Außerdem wurden ähnliche Iridiumwerte wie an der K/T Grenze auch in den Sublimaten aus vulkanischen Gasen von einem anderen „hot spot“, auf der Insel La Réunion, entdeckt. Da Vulkanismus durch Entgasung z.B. auch einen Treibhauseffekt bzw. sauren Regen verursachen kann, sind die Folgen nur schwer von denjenigen eines Meteoriteneinschlages zu unterscheiden. Allerdings kann mit Vulkanismus nur das „Plateau“, aber nicht der kurze Ir-Peak an der K/T Grenze erklärt werden. Andererseits ist Vulkanismus dafür nicht unbedingt notwendig, da eine solche ausgedehnte Anreicherung möglicherweise durch Bioturbation, Umlagerung, oder Diffusion zu erklären ist (ALVAREZ et al. 1990). Der deutlichste Beleg dafür, dass Vulkanismus nicht für den Ir-Peak an der K/T Grenze verantwortlich war, sind die Ir-Anreicherungen in Sedimenten zwischen zwei Trappbasaltdecken (HALLAM & WIGNALL 1973). Insgesamt gab es drei deutlich getrennte Peaks, die laut BHANDARI et al. (1996) auf mehrfache Einschläge hinweisen.

Ob einer dieser Einschläge allerdings für einen „Weltenbrand“ verantwortlich war, ist fragwürdig. Obwohl Holzkohle ein großes Fossilisationspotential hat, ist davon nur wenig in den K/T Grenzschichten vorhanden (SPICER 1989a). Von einem dutzend Fundorten (WOLBACH et al. 1988) stammt nur einer aus dem terrestrischen Bereich. Aber, auch wenn der Kohlenstoff in den marinen Ablagerungen tatsächlich von Bränden stammt, bedeutet das noch lange nicht, dass alle Brände durch Boliden ausgelöst wurden. Blitzschlag als Ursache ist wahrscheinlicher, was sich daran zeigt, dass Gewitter heutzutage in den USA jährlich 10.000 Waldbrände verursachen.

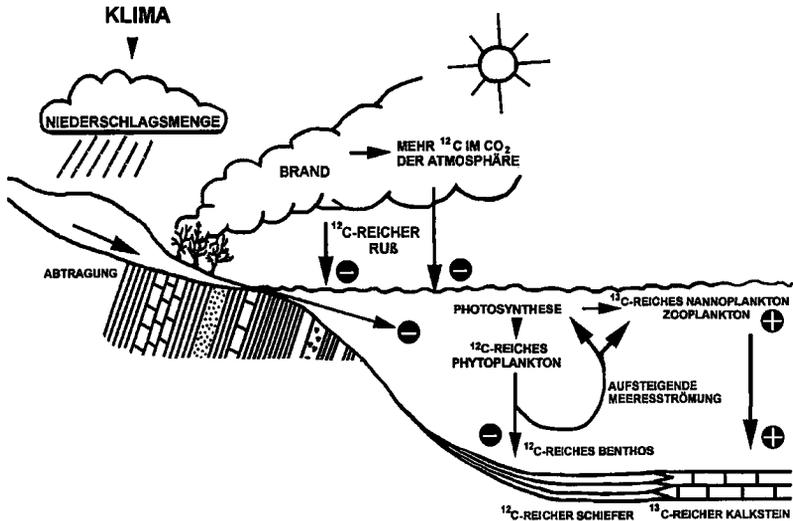


Abb. 2: Einige Umweltfaktoren, welche die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte positiv (+) bzw. negativ (-) beeinflussen können.

Box 1: Die Interpretation von $\delta^{13}\text{C}$ an der K/T Grenze

Es gibt mehrere Faktoren, die zur Abnahme bei $\delta^{13}\text{C}$ -Werten führen können:

1. Eine starke Rückbildung des Phytoplanktons. Während der Photosynthese entzieht das Phytoplankton dem Oberflächenwasser mehr $^{12}\text{CO}_2$ als $^{13}\text{CO}_2$, dadurch zeigt der Kohlenstoff, der für die Bildung der Kalkschalen des Nannoplanktons und des Zooplanktons verwendet wird, eine ^{13}C -Anreicherung. Diese Isotopenfraktionierung ist bei niedrigen Temperaturen am stärksten. Beim Absterben des Phytoplanktons, sinkt dieses zum Meeresboden, wo es durch die Bodenfauna aufgenommen wird. Deshalb hat das Benthos normalerweise einen niedrigeren ^{13}C -Inhalt als das Zooplankton. Im Falle einer starken Dezimierung des Phytoplanktons findet keine ^{13}C -Anreicherung beim Nannoplankton und Zooplankton statt, und damit kommt es zu einer $\delta^{13}\text{C}$ -Abnahme. Diese Überlegung wird von den meisten Wissenschaftler für die Änderung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte an der K/T Grenze akzeptiert.
2. Ein Floren- bzw. Faunen-Wechsel. Da die ^{12}C -Anreicherung artspezifisch ist, könnte eine Änderung in der Zusammenstellung der Phytoplanktongemeinschaften, wie sie an der K/T Grenze nachweisbar ist, für eine Verschiebung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte gesorgt haben. Auf ähnliche Weise können benthontische Foraminiferen Kalzit einbauen, das 0,5-2,0 ‰ leichter ist als das Bodenwasser. In extremen Fällen könnten solche lokalen Unterschiede die globalen Tendenzen überprägen.
3. Die Atmung des Planktons in der Finsternis (Nuklearwinter-Szenario). Da eine solche Phase nur von kurzer Dauer sein kann, konnte es vermutlich nicht für diese eher langfristige Änderung verantwortlich sein.
4. Ein größerer terrestrischer Einfluß. Da das Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre und im Süßwasser meist ca. 7 ‰ leichter ist als das Bikarbonat im Ozean, sind Landpflanzen folglich isotopenmäßig leichter ($\delta^{13}\text{C} = -28$ bis -26 ‰) als Meeresalgen ($\delta^{13}\text{C} = -22$ bis -20 ‰). Eine verstärkte Zufuhr von Süßwasser durch große Flußsysteme, in denen viel Detritus von isotopisch leichten Landpflanzen mittransportiert wurde, könnte eine Abnahme der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte verursacht haben. Dieser Prozeß kann während einer Meeresspiegelabsenkung, oder durch erhöhte Erosion, als Folge von saurem Regen oder durch wärmeres und feuchteres Klima verursacht werden.

Laut IVANY & SALAWITCH (1993) war die Abnahme von $\delta^{13}\text{C}$ im Dan die Folge eines gewaltigen Waldbrands, der 25 % der globalen terrestrischen Biomasse verschlungen hat. Auf diese Weise wurde in einem Zug eine große Menge leichten Kohlstoffs (^{12}C) aus der terrestrischen Vegetation den Ozeanen zugeführt (Abb. 2). Da die Interpretation von Kohlenstoff-Isotopen recht kompliziert ist, gibt es mehrere Erklärungsmöglichkeiten für diese Erscheinung (siehe Box 1). Ob ein Großbrand oder eine andere Folge eines Asteroideneinschlages eine langfristige Änderung von 0,1 bis 2,0 Millionen Jahren (SCHMITZ et al. 1992) im $\delta^{13}\text{C} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ -Verhältnis auslösen konnte, ist eher unwahrscheinlich. Außerdem ist diese Abnahme in hohen Paläobreiten (ca. 60°S) nicht zu beobachten, was gegen ein globales Ereignis spricht.

Wie diese Ausführungen zeigen, sind unsere Kenntnisse über die K/T Grenze noch lange nicht vollständig. Obwohl die Boliden-Hypothese eine gewisse Klarheit gebracht hat, zeigt sich, dass die Wirklichkeit doch viel komplexer ist. Da Information über die Änderungen in der Pflanzenwelt bei der Rekonstruktion eines Szenarios helfen kann, soll im Folgenden ein Überblick über die floristische Veränderung, in den verschiedensten Regionen der Welt versucht werden.

Was Pflanzenreste uns erzählen – eine kurze Reise um die Welt

Nach Bekanntwerden einer möglichen globalen Katastrophe an der K/T Grenze durch SMIT & HERTOGEN (1980) und ALVAREZ et al. (1980) wurden umgehend Hinweise auf Auswirkungen auf die Vegetation untersucht. Die ersten detaillierten Untersuchungen stammten aus dem südwestlichen N-Amerika. Im Raton-Becken im nördlichen New Mexico fanden CHARLES ORTH und Mitarbeiter (1981) eine Ir-Anreicherung an der Basis einer Kohle. Auf dem gleichen Niveau verschwanden Pollenkörner wie z.B. *Proteacidites*† und „*Tilia*“ *wodehousei*† (Malvaceae s.l.). Obwohl die Mehrheit der Angiospermen dieses Ereignis überlebten, wurde ihre dominante Rolle bei den Sporomorphen durch Farne eingenommen. Da das Farnmaximum nur von kurzer Dauer war (einige Tausende von Jahren), redet man von einem Farnpeak. Dieser Farnpeak wird durch Anhänger der Boliden-Hypothese als die erste Pionierv egetation, welche die verwüstete Erde kolonisierte, interpretiert. Dieses Phänomen ist auch in regenreichen Gebieten bekannt, in denen die Vegetation durch einen Vulkanausbruch ausgelöscht wurde (SPICER 1989b). Anhand der im Raton-Becken gefundenen Wedel und ihrer Kutikulen hat man die K/T Farne mittlerweile als *Stenochlaena* (Polypodiaceae s.l.) bestimmt, eine Pionierpflanze, die heute in Afrika und S-Asien vorkommt (WOLFE & UPCHURCH 1987, SPICER 1989a).

Nach dem Farnpeak haben die Angiospermen nach und nach ihre dominierende Stellung wieder eingenommen. Diese relativ schnelle Wiederbesiedelung spricht gegen eine totale Vernichtung der Vegetation. Es gab möglicherweise Refugien, die als Zentren für die Neubesiedlung fungierten.

Um kontrollieren zu können, ob dieses Phänomenen von überregionaler Bedeutung war, führte BOB TSCHUDY weitere palynologischen Untersuchungen durch (TSCHUDY & TSCHUDY 1986). In der Nähe von Trinidad (Colorado), Lance Creek (Wyoming) und Hell Creek (Montana) haben sie bei dem Ir-Horizont das Verschwinden von *Proteacidites*-Arten festgestellt und den darauffolgenden Farnpeak (65-100 % der Vergesellschaftung) bestätigen können (Abb. 3).

Weitere palynologischen Untersuchungen in N-Dakota und W-Kanada haben diese Muster von lokalem Erlöschen, insbesondere unter den Angiospermen,

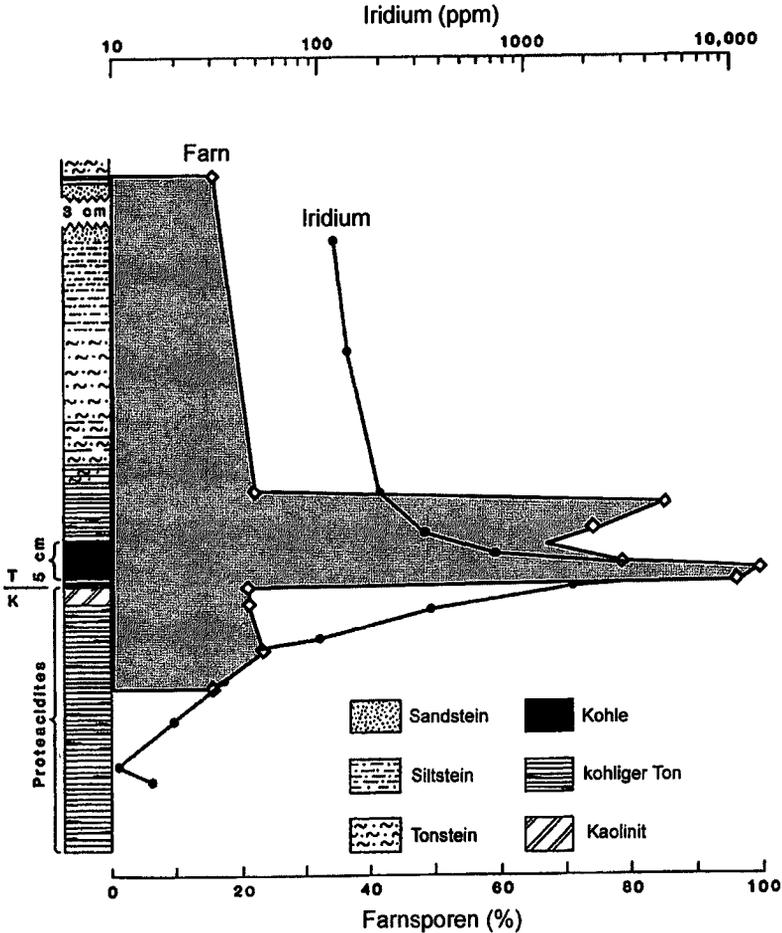


Abb. 3: Die Ir-Anreicherung und der Farnpeak an der K/T Grenze bei Starkville North, Colorado (nach TSCHUDY et al. 1984, Science 225).

bestätigt. Insgesamt scheint es sich jedoch eher um eine Reihe von kleinen „Ereignissen“ gehandelt zu haben, nicht aber um eine globale Katastrophe, da das Ausmaß des Erlöschens und die betroffenen Angiospermenarten sich lokal stark unterschieden. Wenn man bedenkt, dass die K/T Wende den zweitgrößten Arten Tod in der Erdgeschichte repräsentieren soll, sind die Einschnitte im nördlichen Teil Nordamerikas nicht sehr ausgeprägt. In jedem Fundort erlöschen nur 15-30 % (max. 46 %) der Pollentaxa (TSCHUDY & TSCHUDY 1986, JOHNSON et al. 1989, ARCHIBALD 1996), d.h. (54 %) 70-85 % der Taxa haben das K/T Ereignis überlebt. Es ist möglich, dass die besser entwickelten Überdauerungsmechanismen der Pflanzen aus den höheren Breiten sie im Falle eines „Nuklearwinters“ gut geschützt hatten. Somit könnte ein Persistieren der Angiospermen erklären, warum die Farnpeaks in Kanada oft nicht vorhanden sind (NICHOLS 1990).

Im Zusammenhang mit der Ausrottung an der K/T Grenze werden oftmals völlig andere Prozentsätze zitiert. Laut WOLFE und UPCHURCH (1986) sollten im Raton-Becken nur 25 % der Taxa die K/T Ereignisse überlebt haben. Tausend Kilometer nördlicher, in der Nähe von Marmarth (N-Dakota) waren es mit 21 % noch weniger (JOHNSON et al. 1989). Diese Ziffern basieren auf den Analysen der Blattvergesellschaftungen. Welchen von diesen sich scheinbar widersprechenden Aussagen soll man glauben, und wie kann man diese großen Unterschiede erklären? Es gibt verschiedene Erklärungsmöglichkeiten für diese scheinbaren Widersprüche (siehe Box 2).

Box 2: Einige Erklärungen für die scheinbar widersprechenden Auslöschungsraten von Blätter und Sporomorphen an der K/T Grenze

1. Schichten mit Großfossilien sind relativ selten, d.h. ihr Vorkommen ist eher lückenhaft, wodurch die Änderungen in der Vegetation scheinbar sprunghaft stattgefunden haben. Weil manche Megafossilien nur von einer bzw. einigen Fundstellen bekannt sind, ist es leicht, eine Liste von Arten, die die K/T Grenze nicht überschreiten, aufzustellen. Wenn, wie bei Marmarth (N-Dakota; JOHNSON et al. 1989), die Blattreste einer ganzen K/T Schichtenfolge durch das gleiche Team bearbeitet werden, ist diese Möglichkeit eher auszuschließen.
2. Manchmal wird kritisiert, dass Pollenkörner nicht so genau bestimmbar sind wie Megafossilien. D.h. die Einförmigkeit der Pollenkörner innerhalb bestimmter Familien bzw. Gattungen, die Konvergenz bei unterschiedlichen Familien oder das Fehlen von charakteristischen Bauplänen – so diese Kritik – lassen Unterschiede diverser Arten nicht erkennen, wodurch der wahre Umfang der Aussterberate von Pflanzenarten unterschätzt wird (TSCHUDY & TSCHUDY 1986, WOLFE & UPCHURCH 1986, ARCHIBALD 1996). Da die gleichen Argumente aber auch für Blätter gelten, besonders wenn diese nur anhand der Nervatur bestimmt werden, ist diese Erklärung eher unwahrscheinlich.
3. Der Windtransport abfallender Blätter ist nur über kurze Strecken möglich. Deswegen repräsentieren fossile Blattvergesellschaftungen meist nur die Vegetation der fluviolakustrischen Lebensräume (FERGUSON et al. 1996). Änderungen im Grundwasserspiegel als Folge von Regressionen oder Transgressionen können die Vegetation der Schwemmlandebene stark beeinflussen, ohne die Hangvegetation, von wo ein Teil der Pollenvergesellschaftungen stammen, zu ändern.
4. Das Klima der Kreide ist im allgemeinen als warm zu bezeichnen, weshalb ein Großteil der Angiospermen der Tiefebene vermutlich insektenblütig war. Einige dieser Pflanzen befinden sich in den Blattvergesellschaftungen. Da die Pollenkörner nicht nur aus der Tiefebene stammten, war der Prozentsatz der insektenblütigen Arten unterrepräsentiert. Dahingegen sind in den Pollenvergesellschaftungen die Windblüher überrepräsentiert, d.h. die Blätter und Pollen stammen z.T. von unterschiedlichen Pflanzensippen. Bei einem Temperatursturz würde die Veränderung der Vegetation eher bei den Blättern auftreten (WOLFE & UPCHURCH 1986). Laut NORMAN FREDERIKSON (1994) starben tatsächlich mehr Tierblütige als Windblütige an der K/T Grenze aus.
5. Da Pollenkörner im allgemeinen besser erhaltungsfähig sind als Blätter, überstehen sie auch Umlagerungen besser (ARCHIBALD 1996). Ein katastrophales Ereignis, welches durch Blattreste dokumentiert ist, wird anhand von Sporomorphen schwieriger festzustellen sein. Da mehrere autochthone Kohleflöze gerade um die K/T Grenze gebildet wurden, ist es aber eher unwahrscheinlich, dass viele der Pollenkörner umgelagert worden sind.

Wie schon bei den Sporomorphen gezeigt, waren auch die Veränderungen in den kanadischen Blattvergesellschaftungen weniger ausgeprägt als diejenigen von Fundorten aus den USA. In S-Alberta liegt der Prozentsatz von Blatt-Taxa, die über die K/T Grenze hinausgehen bei 76 % (WOLFE & UPCHURCH 1986). Wiederum war ein Teil der verschwundenen Taxa nur von lokaler Bedeutung. Während „*Arctocarpus lessigniana*“ und „*Cinnamomum linifolium*“ im Raton-Becken an der K/T Grenze verschwanden, waren sie noch im Frühpaläozän von South Table

Mountain bei Golden (Colorado) vorhanden (KAUFFMAN et al. 1990). Da Blattreste nicht umgelagert werden können (FERGUSON 1985), würde dieses bedeuten, dass das K/T Ereignis im südwestlichen N-Amerika noch weniger katastrophal war als man bisher angenommen hatte. Die Unterschiede der Blattphysiognomie in den liegenden und hangenden Schichten geben einige Anhaltspunkte darüber, was an der K/T Grenze passiert ist. Während die Dicotyledonenblätter aus dem Maastricht klein, ledrig und oft behaart waren, sind die Blätter oberhalb der K/T größer, besitzen Trüfelspitzen und fast keine Haare (WOLFE & UPCHURCH 1986). Diese Bauplanänderung deutet auf eine Zunahme in der Niederschlagsmenge und/oder auf einen Rückgang in der Evapotranspiration, als Folge einer Temperaturverminderung hin. Diese zunehmende Kälte sorgte für ein größeres Sterben unter den immergrünen Arten. Während 67 % der sommergrünen Dicotyledonen aus dem Maastricht des Raton-Beckens auch im Paläozän zu finden sind, waren 84 % der immergrünen Dicotyledonen für immer verschwunden. Zeichen von Frost in Form von unregelmäßig gefalteten Kutikulen sind bei den Seerosenblättern von Teapot Dome (Wyoming) zu finden. Ob diese Ereignisse die Folgen von einem Kälteeinbruch („Nuklearwinter“) sind oder von einer langfristigen Klimaänderung herrühren, kann mit den heutigen Datierungstechniken noch nicht geklärt werden.

Südamerika: Da die nördlichen Teile S-Amerikas in der Nähe des vermutlichen Kraters lagen, wäre zu erwarten, dass sich auch hier die K/T Grenze am Fossilmaterial nachweisen lässt. Derzeit liegen aber nur einige, teilweise veraltete Ergebnisse vor.

In der unmittelbaren Nähe von Georgetown (Guyana), etwa 3000 km von Chicxulub entfernt, ist es anhand der Sporomorphen kaum möglich, das Maastricht vom Dan zu unterscheiden. Die Mehrzahl der Maastricht-Taxa überschreitet die K/T Grenze (HAMMEN & WYMSTRA 1964). Lediglich *Retimonoporites cf. tequendamae* war auf das Maastricht beschränkt. Auch in Kolumbien war es THOMAS VAN DER HAMMEN nicht gelungen, das Dan vom Maastricht palynologisch zu unterscheiden. Allerdings konnte er einen Rückgang in der Mannigfaltigkeit der Sporomorphen im Laufe des Maastrichts nachweisen. Wie in Guyana war die K/T Wende durch eine regressive Phase und die Bildung von paralischen Kohlenflözen gekennzeichnet. Eine detaillierte Analyse der K/T Ereignisse in Kolumbien und Guyana wird erst möglich sein, wenn die Ir-Schicht gefunden wird.

In der Nähe von Recife (NE-Brasilien) ist die Ir-Schicht zwar nachgewiesen, es ließen sich aber kaum paläobotanische Änderungen erkennen. Interessant ist, dass nach der Meinung einiger Autoren (STINNESBECK & KELLER 1996) der Ir-Horizont tatsächlich die K/T Grenze darstellt, während andere die K/T Grenze in einer 70-75 cm tiefer gelegenen Kalksteinbrekzie (ohne Ir-Anreicherung) vermuten, die sie als Tsunamitschicht interpretieren. Es konnte jedoch keine Änderungen in der Zusammensetzung der Sporomorphen oberhalb und unterhalb der Kalksteinbrekzie festgestellt werden. Eines machen die bisherigen Ergebnisse deutlich: Weder an der Kalksteinbrekzie noch an der Ir-Schicht fand ein Zusammenbruch der Landvegetation statt. Es ließ sich lediglich zeigen, dass im Liegenden der Kalksteinbrekzie fünf Vertreter der überwiegend subtropisch/tropischen Schizaeaceae vorhanden waren, während oberhalb der Ir-Schicht nur zwei *Cyathidites*-Arten, einige Angiospermen und *Pinuspollenites*† vorkommen. Die wahrscheinlichste Erklärung hierfür ist ein Temperaturrückgang.

Nordafrika: Obwohl die Kontinente schon auseinandergedriftet waren, lag in der Zeit um die K/T Wende Afrika noch nicht sehr weit von S-Amerika entfernt. Damals befand sich der Fundort bei Recife wahrscheinlich nur 1400-1600 km von den heutigen Staaten Nigeria und Kamerun entfernt. Es ist deshalb nicht überraschend, dass die Vegetationsentwicklung an beiden Ufern des Protoatlantik eine gewisse Ähnlichkeit aufwies. Da die meisten Untersuchungen vor der Veröffentlichung der Bolidhypothese durchgeführt wurden, ist die Biostratigraphie leider nicht sehr detailliert analysiert worden. Aber sowohl bei der qualitativen wie bei der semiquantitativen Auswertung (SALAMI 1984) zeigen sich an der K/T Grenze nur geringe Unterschiede. Von den 38 Taxa (12 Farnpflanzen, 2 Gymnospermen, 24 Angiospermen), die von SALAMI (1984) beschrieben wurden, verschwindet keine einzige an der K/T Grenze. Acht der Taxa (zwei Farnpflanzen, die beiden *Ephedrepites*†, sowie vier Angiospermen) werden im Laufe des Maastrichts allmählich seltener. Die Mehrzahl (74 %) der Arten überschreiten jedoch die K/T Grenze. Etwas mehr als ein Drittel dieser „Durchläufer“ fehlen vom Mittel-Maastricht bis zum Mittel-Paläozän bzw. Eozän. Inwieweit es sich hierbei um Lazarusarten handelt, oder um ein vorgetäushtes Fehlen, welches durch die geringe Anzahl (248-288) von Palynomorphen, die BABAJIDE SALAMI untersucht hat, verursacht wurde, bleibt unklar. Auffallend ist, dass zwar Arten im Maastricht verschwunden sind, sich aber fast keine neuen Arten entwickelt haben. Die beide Taxa, die SALAMI als charakteristisch für das Paläozän angegeben hat (*Ariadnaesporites* sp., *Zlavisporis blanensis*), sind inzwischen auch aus dem Maastricht am Niger nachgewiesen (DIKOUMA et al. 1994).

Während der K/T Wende lag das Nigerdelta auf eine Breite von ca. 8°S. Eine N-S orientierte Meerenge hat den Südatlantik mit der Tethys am Nordrand von Afrika verbunden (DIKOUMA et al. 1994). Hier befand sich El Kef (NW-Tunesien) auf einer Paläobreite von ca. 22°N. Die vollmarinen (Schelf bis Schelfrand) Sedimente werden als die vollständigste K/T Schichtenfolge der ganzen Welt akzeptiert und sind dadurch als Stratotypus anerkannt. HENRIETTE MÉON (1991) hat die Sporomorphen von El Kef monographisch bearbeitet (s. Abb. 4). Im Zeitabschnitt vom Maastricht bis zum Paläozän konnte sie insgesamt 214 Taxa (157 Spermatophyten und 57 Cryptogamen) nachweisen. Allerdings sind einige Arten nur von einem einzigen Horizont bzw. nur durch ein einzigen Pollen- bzw. Sporenkorn bekannt. Während des Maastricht nahm die Mannigfaltigkeit der Sporomorphen von 14 Arten (4 Cryptogamen und 10 Spermatophyten) bis auf 75-85 Taxa zu, wovon 20-27 Cryptogamen (meist Farne) waren. Direkt nach der K/T Grenze ist die Anzahl der Cryptogamen stark zurückgegangen und schwankte bis zum Ende des Dan zwischen 2 und 5 Arten. Da Sporen von Cryptogamen in der Atmosphäre im allgemeinen leichter verbreitet werden als Pollenkörner, und der Ablagerungsraum damals nicht weit von der Küste entfernt war, scheint diese Abnahme eine Veränderung in der terrestrischen Vegetation widerzuspiegeln. Bei den Spermatophyten (es sind fast ausschließlich Angiospermen vorhanden) ist der Rückgang im Dan viel langsamer erfolgt. Dieses Phänomen spricht gegen ein katastrophales Ereignis an der K/T Grenze. Viele Arten aus dem Maastricht haben sich bis ins Mittel-Dan erhalten. Durch neue Arten im Mittel-Dan und an der Dan/Thanet Grenze ist die Anzahl der Spermatophyten im Paläozän mit 26 bis 35 ziemlich konstant geblieben. Die Abnahme in der Mannigfaltigkeit während des Dans wurde von HENRIETTE MÉON (1991) durch einen geringeren „Sporeimport“ aus Südamerika erklärt, als Afrika und S-Amerika weiter auseinandergedrifteten. Außerdem driftete Afrika immer mehr nach Norden in den Bereich der kühleren *Normapolles*-Provinz.

Europa: Eine Ir-Anreicherung hat man in den kontinentalen Sedimenten Europas bis jetzt ohne Erfolg gesucht (COLOMBO 1996). Die Grenze muß demnach anhand der Biostratigraphie bzw. durch Magnetostratigraphie identifiziert werden, und sie konnte bis heute noch nicht genau festgelegt werden. Darüberhinaus war man der Meinung, dass die obere Grenze des Maastrichts in der Typuslokalität durch eine Schichtlücke repräsentiert ist. Neuuntersuchungen durch ein multidisziplinäres Team haben – anhand von Dinoflagellaten, Foraminiferen und Sporomorphen – den Berg en Terblijt-Horizont als K/T Grenze definiert. Bereits vor der Grenze ist ein Rückgang in der Mannigfaltigkeit der Sporomorphen im besonderen bei den Cheirolepidiaceae† und *Normapolles*-Gruppe nachweisbar. Insgesamt sind 11 *Normapolles*-Gattungen nur auf das Maastricht beschränkt. Andererseits finden sich 25 der 60 *Normapolles*-Arten, die im obersten Maastricht vorkommen, auch im Dan. Da die Maastricht-Formation kalkhaltig ist, sind Sporomorphen nur sporadisch vorhanden und es ließen sich lediglich zwischen 26 und 265 Sporomorphen pro Horizont nachweisen. Die Arten, die im Maastricht häufig vertreten waren, überschreiten die K/T Grenze, wobei einige Arten (z.B. *Minorpollis hojstrupensis*) im untersten Dan weniger häufig sind, während andere Arten (*Labraferoidaepollenites bituitus*, *Minorpollis gallicus*, *Pinuspollenites spherisaccus*) in ihrer Häufigkeit zunahm. Eine Folge der geringen Sporomorphenhäufigkeit in den Sedimenten sind Probleme beim Nachweis seltener Arten. Einen Teil der neuen Taxa, wie z.B. *Pompeckioidaepollenites subhercynicus* und *Jarzenipollenites trinus*, die am Anfang des Dan mit 5 % bzw. 2-4 % relativ häufig vertreten waren, aber im Laufe der Zeit wieder abnehmen, kann man als Pionierpflanzen interpretieren. Welche Umweltveränderungen haben nun aber diese Ereignisse verursacht? Ganz bestimmt keine Katastrophe, vielleicht aber ein geringfügiger Temperaturrückgang. Ein Hinweis darauf ist das Verschwinden von Palmenpollen (*Monocolpopollenites tranquillus*) an der K/T Grenze, der im obersten Maastricht immer vorhanden war. Es dauerte einige Zeit bis diese Art im Dan erneut auftrat. Auch in anderen Teile Europas scheinen die Palmen an der K/T Grenze zu erlöschen.

Asien: Bis jetzt ist die K/T Grenze innerhalb großer Teile Asiens noch nicht genau festgelegt, da der Ir-Inhalt der Sedimente noch nicht untersucht ist bzw. keine Ir-Anreicherung gefunden wurde (GOLOVNEVA 1995). Dies hat zur Folge, dass eine detaillierte Analyse der Ereignisse, die vor 65 Ma stattgefunden haben, noch nicht möglich ist.

Wie SWEET & BRAMAN (1992) schon für Kanada festgestellt hatten, gab es die größte floristische Veränderung in NO-Russlands, z.B. im Koryak-Hochland, das damals auf einer Breite von ca. 73-77°N lag, innerhalb des Maastrichts und nicht an der K/T Grenze (GOLOVNEVA 1995, MARKEVICH 1996). Laut VALENTINE MARKEVICH, der die Sporomorphen untersucht hat, war es die größte Veränderung seit Anfang der Kreide. Auch bei den Megafossilien ließen sich Änderungen nachweisen: ca. 60 % der Arten aus dem Untermaastricht, u.a. Cycadophyten und immergrüne Koniferen, verschwanden und wurden durch sommergrüne Koniferen und Angiospermen ersetzt, welche einen arktotertiären Charakter hatten. In südlicheren Gebieten, wie z.B. bei Sachalin und in der Amur-Region, werden solche großblättrigen Arten erst im Dan gefunden. Das bedeutet nun aber, dass die floristische Änderung heterochron war und nicht durch ein katastrophales Ereignis verursacht worden sein kann. Eine klimatische Ursache, z.B. eine Abkühlung, die zuerst im Norden Auswirkungen hatte, scheint eine plausiblere Erklärung darzustellen.

Viele chinesische Paläontologen sind der Überzeugung, dass die K/T Grenze einen Übergang und keine Katastrophe repräsentiert (WANG et al. 1990, SONG & HUANG 1997), wofür auch die Präsenz unveränderter Megafloren in der Maasricht-Dan Stufe spricht. Im Nanxiong-Becken in Südchina konnten STETS et al. (1996) allerdings eine floristische Wende innerhalb der über 2500m mächtigen Flußablagerungen nachweisen. Neben einem Kieferngewächs (*Pinuspollenites ruginosa*) und eher sporadisch auftretenden Angiospermen (*Compositoipollenites*†, *Pterocaryapollenites*†) gab es in den untersten Schichten 11-15 Farnpflanzen (Cyatheaceae, Lycopodiaceae, Marsileaceae, Osmundaceae, Schizaeaceae, Selaginellaceae). Ab einer bestimmten Schicht ist die Anzahl der Farne leicht erhöht, und im Anschluss daran fand eine starke Zunahme der Koniferen (bis zu 5 Arten der Pinaceae, 1 Podocarpaceae und 1 Taxodiaceae) statt. Danach sind die Baumfarne (3-5 Cyatheaceen-Arten) verschwunden und auch die übrigen Farnpflanzen wurden stark zurückgedrängt, um schließlich zusammen mit den Torfmoosen (*Sphagnum*) endgültig zu verschwinden. Das Erlöschen von 11 der 15 Arten innerhalb von 21 m wurde von STETS et al. (1996) als Hinweis auf eine Katastrophe gedeutet, obwohl es offensichtlich ist, dass nicht alle Lebewesen gleichzeitig verschwanden. Die floristische Zusammenstellung der hangenden Schichten zeigt, dass nach dieser Florenänderung Koniferen zusammen mit Angiospermen auftraten, die auf ein eher temperates Klima hinweisen (Betulaceae, Myricaceae und Malvaceae s.l.). Hauptsächlich aufgrund der oben beschriebenen Ergebnisse hat man in China die K/T Grenze mit der floristischen Wende gleichgesetzt, was allerdings sehr zweifelhaft ist, da beispielsweise in den nach oben anschließenden 83m der Schichtenfolge Dinosauriereier vorhanden sind. Eine andere mögliche Interpretation ist, dass in China, ähnlich wie in NO-Russland, die floristische Wende vor der K/T Grenze stattgefunden hat. Um diese Hypothese zu überprüfen, fehlen jedoch absolute Datierungen von diesem Teil des Beckens.

In Japan gibt es einige Anzeichen von einem möglicherweise katastrophalen Ereignis an der K/T Grenze (SAITO et al. 1986). Eine eisenreiche Tonsteinschicht mit Holzresten in vollmarinem Siltstein in Ost-Hokkaido zeigt eine Abnahme der Sporomorphen, wobei allerdings eine kleine Zunahme (+35 %) der Farnsporen zu beobachten ist, die schon vor der Ablagerung des Tonsteins schon begonnen hat. Eine Verdreifachung der Kieferpollen in den hangenden Dan-Schichten könnte dahingehend interpretiert werden, dass die Vegetation einen offeneren Charakter als im Spät-Maastricht bekommen hatte, wodurch sich die sonnenliebende Kiefer ansiedeln konnte (SAITO et al. 1986) bzw. der Pollenferntransport erleichtert wurde (SPICER 1989a). Andererseits könnte dieses Phänomen aber auch nur eine Änderung in der Sedimentation andeuten, da Kiefernpollen bevorzugt in Gewässern mit geringer Strömung abgelagert werden. Für die Interpretation der japanischen Daten ist auch von Interesse, dass sich die floristischen Änderungen sowohl der Mega- als auch der Mikrofossilien auf den benachbarten Kurilen anscheinend in Erappen vollzogen haben (KRASSILOV 1995).

Südhemisphäre: Die Südhemisphäre war lange Zeit durch den Superkontinent Gondwanaland geprägt. Während der Kreide ist Gondwanaland zerfallen und auseinandergedriftet. Zur gleichen Zeit wurde durch die Öffnung des Südatlantiks eine Phase der Gebirgsbildung und des Vulkanismus auf der pazifischen Seite Amerikas eingeleitet, wobei sich die vulkanische Aktivität bis in die West-Antarktis fortgesetzt hat. Im Schatten dieses Vulkanbogens (Grahamland) liegt die winzige Seymour-Insel, die eine Schlüsselrolle für unsere Kenntnis über die K/T Grenze in der Südhemisphäre spielt. Die K/T Grenze, die durch eine Ir-Anreicherung und eine Dino-

flagellatenzonierung genau definiert ist, befindet sich in glauconithaltigen Schelfsedimenten (ASKIN & JACOBSON 1996), die gut erhaltene Sporomorphen liefern.

Während des späten Maastrichts war die Artenzusammensetzung besonders bei den Angiospermen sehr variabel. Zwei Vertreter der frostempfindlichen Bombacaceen (*Bombacacidites*†) kommen zum letzten Mal 59 m bzw. 43 m vor der K/T Grenze vor, während *Anacolsa*, eine Olacacee, die heute im tropischen und südlichen Afrika heimisch ist, ca. 27 m vor der Grenze erlischt. Auch die beiden *Beauprea*-Arten, eine Proteaceen-Gattung, die heutzutage in Neukaledonien vorkommt, überschreiten auf der Seymour-Insel die K/T Grenze nicht. Insbesondere in den obersten 5 m des Maastrichts findet eine starke Änderung der Artenzusammensetzung statt. Die Mannigfaltigkeit der Farne nahm hingegen geringfügig zu. In den letzten 35 m vor der K/T Grenze erscheinen nacheinander drei neue Farnarten (*Polyodiisporites speciosus*, *Dictyophyllidites concavus* und *Clavifera triplex*). Alle Farnpflanzen, die kurz vor der K/T Grenze vorhanden waren, finden sich auch im Dan, was auch für die Mehrzahl der Angiospermen gilt und gegen eine Katastrophe an der K/T Grenze spricht. Im Dan ist dieser Prozeß der Florenänderung ohne Unterbrechung weitergegangen.

Obwohl diese Ergebnisse einen Bolideinschlag nicht bestätigen, läßt sich aber ein Bolidszenario mit begrenztem Einfluß nicht ausschließen. Falls der Anprall während des nordhemisphärischen Sommers stattfand, wie JACK WOLFE (1991) meint, befanden sich die Pflanzen auf der Südhemisphäre in Folge der Finsternis gerade in ihrer Ruheperiode, und konnten so den „Nuklearwinter“ überleben. WOLFE (1991), der selbst ein Befürworter der Bolidentheorie ist, gibt aber zu, dass keine eindeutigen Anzeichen eines katastrophalen K/T Ereignisses auf der Südhemisphäre vorhanden sind.

In Australien sind alle spätkretazischen Gymnospermen bis ins Paläozän nachweisbar (MARTIN 1994). Es ist lediglich ein Rückgang in der Mannigfaltigkeit der Angiospermen im Dan feststellbar. Während ein Teil der Maastricht-Arten endgültig erlosch, verschwanden andere Arten nur für kürzere oder längere Zeit und erscheinen im Spät-Paläozän bzw. Eozän wieder. Im Laufe des Paläozäns nahm die Mannigfaltigkeit der Angiospermen wieder zu, ein Phänomen, das schon 1965 von WAYNE HARRIS beschrieben wurde. Über die Ursache dieses kurzfristigen Rückgangs kann nur spekuliert werden. In jedem Fall aber ist der floristische Umschwung nicht von katastrophalem Ausmaß, da er weniger ausgeprägt ist als die Veränderungen, die an den Apt/Alb- und Alb/Cenoman Grenzen stattgefunden haben (DOUGLAS 1994). Auch in Neuseeland sind die Florenänderungen an der K/T Grenze weniger ausgeprägt als in der Mittelkreide und an der Paläozän/Eozän Grenze. Es sind nur wenige Pflanzen ausgestorben und nur wenige Pflanzen (sämtlich Angiospermen) hinzugekommen.

Die Bedeutung der Veränderungen in der Vegetation

Wie man die oben skizzierten Veränderungen in der Vegetation interpretiert, ist in hohem Maße subjektiv. Befürworter der Bolidhypothese können auf den schnellen Umschwung der Vegetation in den Gebiete hinweisen, in denen die K/T Grenze deutlich definiert ist (Ir-Anreicherung, geschockter Quarz usw.). Die scheinbar allmählichen Veränderungen in der Pflanzenwelt in Regionen, in denen die Grenze nicht so genau lokalisiert ist, kann man auf verschiedene Weise erklären. Durch ihre unterschiedlichen Überlebensstrategien (Ruheperiode, Rhizome, Adventivsprosse, Samenbanken) sind Pflanzen möglicherweise nicht sehr gut geeignet, um katastrophale

Ereignisse von kurzer Dauer zu dokumentieren. Die Interpretation kann aber auch von der Art der Probennahme beeinflusst werden. Wenn die untersuchten Ablagerungen zeitlich weit auseinanderliegen, was manchmal bei Megafloren der Fall ist, hat man fast keine Chance ein kurzfristiges Ereignis nachzuweisen. Andererseits kann das Fehlen sprunghafter Veränderungen auch eine Folge von Bioturbation bzw. Umlagerung von den klastischen Sedimenten sein, wodurch die stratigraphische Verbreitung der Fossilien über eine längere Zeitzone vorgetäuscht wird. Wenn allerdings Kohlenproben verwendet werden (SPICER 1989a) oder Blattvergesellschaftungen untersucht werden, sind Umlagerung und Bioturbation fast zu vernachlässigen.

Für viele Paläontologen sind die dramatischen Ereignisse in SW-Nordamerika nur von lokaler Bedeutung. In anderen Gebieten hat angeblich eine eher „sanfte Revolution“ an der K/T Grenze stattgefunden. Die meist graduelle Veränderung der Floren und der Mangel an zuverlässigen Leitfossilien (die meisten sind nur lokal verwendbar) scheinen dies zu bestätigen. Die wenigen Ausnahmen, wie z.B. der schnelle floristische Wechsel im südchinesischen Nanxiong-Becken, können durch eine Schichtlücke erklärt werden. Falls diese Interpretation durch sedimentologische Untersuchungen ausgeschlossen werden sollte, müsste man annehmen, dass nicht nur ein sondern zwei katastrophale Ereignisse stattfanden: zunächst eine Veränderung in der Vegetation und dann ca. 207.500 Jahre später ein Aussterben der Dinosaurier. Man ist demnach gezwungen, den Einschlag von zwei Boliden zu fordern (WOLFE 1991). Dies ist selbstverständlich möglich, aber hierdurch verliert die alles umfassende „Ein-Bolidhypothese“ einen Teil ihres Reizes.

Wie oben erwähnt, ist das heterochrone Auftreten der arktotertiären Sippen in NO-Russland ebenfalls nicht mit der Bolidhypothese in Einklang zu bringen. Dieses Ereignis lässt sich viel einfacher durch eine Temperaturverringerung erklären. Dafür sprechen auch Hinweise, dass insbesondere in den Polgebieten das Klima um die K/T Wende etwas kühler wurde. Im Koryak-Hochland beispielsweise, wurden im späten Maastricht die immergrünen Koniferen (*Cryptomerites*†, *Elatocladus*†, *Sequoia*, *Taxites*†) und Cycadophyten (*Encephalartopsis*†, *Nilsonia*†) durch sommergrüne, arktotertiäre Elemente ersetzt. Auf ähnliche Weise hat ein allmähliches Aussterben frostepfindlicher Arten, z.B. Bombacaceen, Olacaceen und Proteaceen, kurz vor der K/T Grenze auf der Seymour-Insel stattgefunden. Die Jahresringe in den Hölzern aus dem Obermaastricht bis ins Unterdan von der Seymour-Insel sind zudem viel schmaler als in den Perioden vor und danach. Obwohl die Jahresringe schmaler sind, zeigen sie eine große Einförmigkeit, und falsche Jahresringe fehlen fast völlig, was nahelegt, dass die schmalen Jahrringe nicht durch Trockenheit sondern durch Kälte verursacht wurden (FRANCIS 1991). Die Abkühlung und eine Hebung der Kontinente am Ende der Kreide hatte zur Folge, dass die epikontinentalen Meere kleiner wurden. Es wird heute angenommen, dass der Meeresspiegel im Maastricht um 100 bis 250 m gesunken war (OFFICER & PAGE 1996). Dies hatte nicht nur katastrophale Folgen für die direkt betroffenen Schelfmeerbewohner, sondern infolge des Wegfallens der Tiefseeströmung, die durch das absinkende Salzwasser aus den warmen Schelfmeeren hervorgerufen wird, auch einen negativen Einfluß auf das Plankton, das von den aufsteigenden Nährstoffen abhängig ist (HALLAM & WIGNALL 1997). Allerdings sind als Folge der Meeresregression große Landflächen trocken gefallen, wodurch eine Kolonisierung durch terrestrische Vegetation möglich wurde. Dies ist eine Erklärungsmöglichkeit für den Aufschwung von Pionierpflanzen und die dicken Kohlenflöze, die um die K/T Grenze auftreten. Durch die Meeresregression nahm die Anzahl von Landbrücken zu, wodurch die Wanderung von Pflanzen und Landtieren erleichtert wurde. Eine Folge hiervon ist die Entstehung einer deutlich „kosmopolitischeren“ Vegetation um die K/T Wende.

Danksagung: Die Abbildungen sind mit Hilfe von Kai Uwe HOCHHAUSER und KHUM PAUDAYAL zustande gekommen. PD Dr. CH.-CH. HOFMANN und PD Dr. TH. SPECK danke ich für die Mühe, die sie sich mit meinem ursprünglichen Text gemacht haben.

Literatur

- ALVAREZ, L.W., ALVAREZ W., ASARO, F. & MICHEL, H.V. (1980): Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. - *Science* 208, 1095-1108.
- ALVAREZ, W. (1997): *T. rex* and the crater of doom. - Princeton University Press (Princeton).
- ALVAREZ, W., ASARO, F. & MONTANARI, A. (1990): Iridium profile for 10 million years across the Cretaceous-Tertiary boundary at Gubbio (Italy). - *Science* 250, 1700-1702.
- ARCHIBALD, J.D. (1996): Dinosaur extinction and the end of an era. What the fossils say. - Columbia University Press (New York).
- ASKIN, R.A. & JACOBSON, S.R. (1996): Palynological change across the Cretaceous-Tertiary boundary on Seymour Island, Antarctica: environmental and depositional factors. - In: N.MACLEOD & G.KELLER (eds.), Cretaceous-Tertiary mass extinctions: biotic and environmental changes, 7-25. W.W. Norton & Company (New York-London).
- BHANDARI, N., SHUKLA, P.N., SHUKLA, A.D. & GHEVARIYA, Z.G. (1996): Multiple Ir-rich layers in the Anjar K/T section. - *Meteoritics* 31, A13.
- BOHOR, B.F. (1990): Shock-induced microdeformations in quartz and other mineralogical indications of an impact event at the Cretaceous-Tertiary boundary. - *Tectonophysics* 171, 359-372.
- COLOMBO, F. (1996): Stratigraphic and sedimentologic characteristics of the Cretaceous-Tertiary boundary in the Ager Basin, Lleida Province, northeastern Spain. - In: N.MACLEOD & G.KELLER (eds.), Cretaceous-Tertiary mass extinctions: biotic and environmental changes, 399-413. W.W. Norton & Company (New York-London).
- DIKOUMA, M., LANG, J., LAURIN, B., PASCAL, A. & SALARD-CHEBOLDAEFF, M. (1994): Biostratigraphy of some Maastrichtian and Paleocene formations in the Iullemedden Basin (southern Niger). - *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen* 193, 55-79.
- DOUGLAS, J.G. (1994): Cretaceous vegetation: the macrofossil record. - In: R.S. HILL (ed.), *History of the Australian vegetation: Cretaceous to Recent*, 171-188. Cambridge University Press (Cambridge).
- ELLIOTT, W.C. (1993): Origin of the Mg-smectite at the Cretaceous/Tertiary (K/T) boundary at Stevns Klint, Denmark. - *Clays and Clay Minerals* 41, 442-452.
- FERGUSON, D.K. (1985): The origin of leaf-assemblages - new light on an old problem. - *Review of Palaeobotany and Palynology* 46, 117-188.
- FERGUSON, D.K., BURGH, J. v.D., CLAUSING, A., COLLINSON, M.E., FIELD, M.H., GEE, C.T., GOSSMANN, R., HOFMANN, C.C., JONES, T.P., KERP, H., SANDER, M. & TAYLOR, T.N. (1996): Actupalaeobotany - a taphonomic peep-show? - Summary of workshop discussions. - *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen* 202, 149-158.
- FRANCIS, J.E. (1991): Palaeoclimatic significance of Cretaceous-early Tertiary fossil forests of the Antarctic Peninsula. - In: M.R.A. THOMSON, J.A. CRAME & J.W. THOMSON (eds.), *Geological evolution of Antarctica*, 623-627. Cambridge University Press (Cambridge).
- FREDERIKSEN, N.O. (1994): Paleocene floral diversities and turnover events in eastern North America and their relation to diversity models. - *Review of Palaeobotany and Palynology* 82, 225-238.
- GOLOVNEVA, L.B. (1995): Environmental changes and patterns of floral evolution during the Cretaceous-Tertiary transition in northeastern Asia. - *Paleontological Journal* 29, 36-49.
- HALLAM, A. (1987): End-Cretaceous mass extinction event: argument for terrestrial causation. - *Science* 238, 1237-1242.
- HALLAM, A. & WIGNALL, P.B. (1997): *Mass extinctions and their aftermath*. Oxford University Press (Oxford).
- HAMMEN, T. v.D. & WYMSTRA, T.A. (1964): A palynological study on the Tertiary and Upper Cretaceous of British Guiana. - *Leidse Geologische Mededelingen* 30, 183-241.
- HARRIS, W.K. (1965): Basal Tertiary microfloras from the Princetown area, Victoria, Australia. - *Palaeontographica Abt. B*, 115, 75-106.
- HILDEBRAND, A.R., PILKINGTON, M., CONNORS, M., ORTIZ-ALEMAN, C. & CHAVEZ, R.E. (1995): Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes. - *Nature* 376, 415-417.

- HOLLANDER, D.J., MCKENZIE, J.A. & HSÜ, K.J. (1993): Carbon isotope evidence for unusual plankton blooms and fluctuations of surface water CO₂ in „Strangelove Ocean“ after terminal Cretaceous event. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 104, 229-237.
- IVANY, L.C. & SALAWITCH, R.J. (1993): Carbon isotopic evidence for biomass burning at the K-T boundary. – *Geology* 21, 487-490.
- JOHNSON, K.R., NICHOLS, D.J., ATTREP, M. & ORTH, C.J. (1989): High-resolution leaf-fossil record spanning the Cretaceous/Tertiary boundary. – *Nature* 340, 708-711.
- KAUFFMAN, E.G., UPCHURCH, G.R. & NICHOLS, D.J. (1990): The Cretaceous-Tertiary boundary interval at South Table Mountain, near Golden, Colorado. – In: E.G. KAUFFMAN & O.H. WALLISER (eds.), *Extinction events in Earth history*, 365-392. Springer-Verlag (Berlin).
- KELLER, G., LOPEZ-OLIVA, J.G., STINNESBECK, W. & ADATTE, T. (1997): Age, stratigraphy, and deposition of near-K/T siliciclastic deposits in Mexico: relation to bolide impact? – *Geological Society of America Bulletin* 109, 410-428.
- KRASSILOV, V.A. (1995): Models of plant and plant community evolution: Cretaceous-Paleocene transition examples. – *Paleontological Journal* 29, 1-21.
- KRING, D.A., MELOSH, H.J. & HUNTEN, D.M. (1996): Impact-induced perturbations of atmospheric sulphur. – *Earth and Planetary Science Letters* 140, 201-212.
- LEROUX, H., ROCCHIA, R., FROGET, L., ORUE-ETXEBARRIA, X., DOUKHAN, J.-C. & ROBIN, E. (1995): The K/T boundary at Beloc (Haiti): compared stratigraphic distributions of the boundary markers. – *Earth and Planetary Science Letters* 131, 255-268.
- MARKEVICH, V.S. (1996): Evolution rates and palynological boundary. – *Acta Palaeontologica Sinica* 35, 248-258.
- MARTIN, H.A. (1994): Australian Tertiary phytogeography: evidence from palynology. – In: R.S. HILL (ed.), *History of the Australian vegetation: Cretaceous to Recent*, 104-142. Cambridge University Press (Cambridge).
- MÉON, H. (1991): Études sporopolliniques à la limite Crétacé-Tertiaire: la coupe du Kef (Tunisie nord-occidentale); Étude systématique, stratigraphie, paléogéographie et évolution climatique. – *Palaeontographica Abt. B*, 223, 107-168.
- MEYERHOFF, A.A., LYONS, J.B. & OFFICER, C.B. (1994): Chicxulub structure: a volcanic sequence of Late Cretaceous age. – *Geology* 22, 3-4.
- NICHOLS, D.J. (1990): Geologic and biostratigraphic framework of the non-marine Cretaceous-Tertiary boundary interval in western North America. – *Review of Palaeobotany and Palynology* 65, 75-84.
- OFFICER, C.B. (1992): The relevance of iridium and microscopic dynamic deformation features toward understanding the Cretaceous/Tertiary transition. – *Terra Nova* 4, 394-404.
- OFFICER, C.B. & DRAKE, C.L. (1985): Terminal Cretaceous environmental events. – *Science* 227, 1161-1167.
- OFFICER, C. & PAGE, J. (1996): *The great dinosaur extinction controversy*. – Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (Reading, Mass.).
- OLSSON, R.K., MILLER, K.G., BROWNING, J.V., HABIB, D. & SUGARMAN, P.J. (1997): Ejecta layer at the Cretaceous-Tertiary boundary, Bass River, New Jersey (Ocean Drilling Program Leg 174AX). – *Geology* 25, 759-762.
- ORTH, C.J., GILMORE, J.S., KNIGHT, J.D., PILLMORE, C.L., TSCHUDY, R.H. & FASSETT, J.E. (1981): An iridium abundance anomaly at the palynological Cretaceous-Tertiary boundary in northern New Mexico. – *Science* 214, 1341-1343.
- POPE, K.O. (1997): Surface expression of the Chicxulub crater: reply. – *Geology* 25, 568.
- POPE, K.O., BAINES, K.H., OCAMPO, A.C. & IVANOV, B.A. (1994): Impact winter and the Cretaceous/Tertiary extinctions: results of a Chicxulub asteroid impact model. – *Earth and Planetary Science Letters* 128, 719-725.
- POPE, K. O., OCAMPO, A. C. & DULLER, C. E. (1991): Mexican site for K/T impact crater? – *Nature* 351, 105.
- RAMPINO, M.R. & REYNOLDS, R.C. (1983): Clay mineralogy of the Cretaceous-Tertiary boundary clay. – *Science* 219, 495-498.
- SAITO, T., YAMANOI, T. & KAIHO, K. (1986): End-Cretaceous devastation of terrestrial flora in the boreal Far East. – *Nature* 323, 253-255.
- SALAMI, M.B. (1984): Late Cretaceous and Early Tertiary palynofacies of southwestern Nigeria. – *Revista Española de Micropaleontología* 16, 415-423.
- SCHMITZ, B., ANDERSSON, P. & DAHL, J. (1988): Iridium, sulfur isotopes and rare earth elements in the Cretaceous-Tertiary boundary clay at Stevns Klint, Denmark. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, 229-236.

- SCHMITZ, B., KELLER, G. & STENVALL, O. (1992): Stable isotope and foraminiferal changes across the Cretaceous-Tertiary boundary at Stevns Klint, Denmark: arguments for long-term oceanic instability before and after bolide-impact event. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 96, 233-260.
- SCHURAYTZ, B.C., LINDSTROM, D.J., MARIN, L.E., MARTINEZ, R.R., MITTFELDELDT, D.W., SHARPTON, V.L. & WENTWORTH, S.J. (1996): Iridium metal in Chicxulub impact melt: forensic chemistry on the K-T smoking gun. – *Science* 271, 1573-1576.
- SHARPTON, V.L., DALRYMPLE, G.B., MARIN, L.E., RYDER, G., SCHURAYTZ, B.C. & URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. (1992): New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary. – *Nature* 359, 819-821.
- SIGURDSSON, H., BONTÉ, P., TURPIN, L., CHAUSSIDON, M., METRICH, N., STEINBERG, M., PRADEL, P. & D'HONDT, S. (1991): Geochemical constraints on source region of Cretaceous/Tertiary impact glasses. – *Nature* 353, 839-842.
- SMIT, J. & HERTOGEN, J. (1980): An extraterrestrial event at the Cretaceous-Tertiary boundary. – *Nature* 285, 198-200.
- SMIT, J., MONTANARI, A., SWINBURNE, N.H.M., ALVAREZ, W., HILDEBRAND, A.R., MARGOLIS, S.V., CLAEYS, P., LOWRIE, W. & ASARO, F. (1992): Tektite-bearing, deep-water clastic unit at the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico. – *Geology* 20, 99-103.
- SONG, Z.-C. & HUANG, F. (1997): The boundaries between the southern Laurasian and northern Gondwana Provinces and the Aquilapollenites and Normapolles palynofloras in East Asia. – *Cretaceous Research* 18, 1-15.
- SPICER, R.A. (1989a): Plants at the Cretaceous-Tertiary boundary. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 325, 291-305.
- SPICER, R.A. (1989b): The formation and interpretation of plant fossil assemblages. – *Advances in Botanical Research* 16, 95-191.
- STETS, J., ASHRAF, A.R., ERBEN, H.K., HAHN, G., HAMBACH, U., KRUMSIEK, K., THEIN, J. & WURSTER, P. (1996): The Cretaceous-Tertiary boundary in the Nanxiong Basin (continental facies, southeast China). – In: N. MACLEOD & G. KELLER (eds.), *Cretaceous-Tertiary mass extinctions: biotic and environmental changes*, 349-371. W.W.Norton & Company (New York-London).
- STINNESBECK, W. & KELLER, G. (1996): Environmental changes across the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Brazil. – In: N. MACLEOD & G. KELLER (eds.), *Cretaceous-Tertiary mass extinctions: biotic and environmental changes*, 451-469. W.W.Norton & Company (New York-London).
- SWEET, A.R. & BRAMAN, D.R. (1992): The K-T boundary and contiguous strata in western Canada: interactions between paleoenvironments and palynological assemblages. – *Cretaceous Research* 13, 31-80.
- TSCHUDY, R.H. & TSCHUDY, B.D. (1986): Extinction and survival of plant life following the Cretaceous/Tertiary boundary event, Western Interior, North America. – *Geology* 14, 667-670.
- VENKATESAN, M.I. & DAHL, J. (1989): Organic geochemical evidence for global fires at the Cretaceous/Tertiary boundary. – *Nature* 338, 57-60.
- WANG, D.-N., SUN, X.-Y. & ZHAO, Y.-N. (1990): Late Cretaceous to Tertiary palynofloras in Xinjiang and Qinghai, China. – *Review of Palaeobotany and Palynology* 65, 95-104.
- WOLBACH, W.S., GILMORE, I., ANDERS, E., ORTH, C.J. & BROOKS, R.R. (1988): Global fire at the Cretaceous-Tertiary boundary. – *Nature* 334, 665-669.
- WOLFE, J.A. (1991): Palaeobotanical evidence for a June 'impact winter' at the Cretaceous/Tertiary boundary. – *Nature* 352, 420-423.
- WOLFE, J.A. & UPCHURCH, G.R. (1986): Vegetation, climatic and floral changes at the Cretaceous-Tertiary boundary. – *Nature* 324, 148-152.
- WOLFE, J. A. & UPCHURCH, G. R. (1987): Leaf assemblages across the Cretaceous-Tertiary boundary in the Raton Basin, New Mexico and Colorado. – *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 84, 5096-5100.

(Ein ausführliches Literaturverzeichnis ist beim Autor erhältlich.)

(Am 15. Dezember 2000 bei der Schriftleitung eingegangen.)

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mitteilungen des Badischen Landesvereins für Naturkunde und Naturschutz e.V. Freiburg i. Br.](#)

Jahr/Year: 1998-2001

Band/Volume: [NF_17](#)

Autor(en)/Author(s): Ferguson David Kay

Artikel/Article: [Die Kreide / Tertiär Wende - neue Erkenntnisse zur Ursache von Florenveränderungen \(2001\) 853-873](#)