

Impakt und Massensterben – Ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand

CHRISTIAN KOEBERL^{*)}

20 Abbildungen, 2 Tabellen

Österreichische Karte 1 : 50.000
Blätter 95, 198

*Impakt
Einschlagskrater
Einschlagsereignis
Massensterben*

Inhalt

Zusammenfassung	169
Abstract	169
1. Impaktereignisse im Sonnensystem und auf der Erde	170
2. Charakteristika von Impaktkratern	170
3. Häufigkeit der Einschlagsereignisse auf der Erde	174
4. Der Impaktprozess und seine Folgen	176
5. Impakte und Massensterben in der Erdgeschichte	181
5.1. Allgemeine Bemerkungen	181
5.2. Das Massensterben an der Kreide/Tertiär-Grenze	182
5.3. Das Massensterben an der Perm/Trias-Grenze	185
5.4. Andere biologische und geologische Zäsuren	188
6. Ausblick	188
Dank	189
Literatur	189

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Charakteristika und Auswirkungen von Meteoriteneinschlägen und verwandter Ereignisse diskutiert. Nach einer allgemeinen Einführung zum Thema Einschläge und Einschlagskrater werden der Ursprung der einschlagenden Körper im Sonnensystem (Kleinplaneten und Kometen) besprochen, gefolgt von einer Diskussion der physikalischen Parameter von typischen Einschlägen und deren Folgen auf die Umwelt. Danach folgt eine ausführliche Beschreibung der Ereignisse an der Kreide/Tertiär-Grenze. Zu dieser Zeit, vor 65 Millionen Jahren, ist der größte Einschlag eines außerirdischen Körpers, der im Laufe der letzten hundert Millionen Jahren auf der Erde nachweisbar ist, erfolgt, mit katastrophalen Auswirkungen auf die Biosphäre. An keinen anderen Zäsuren in der Erdgeschichte (z.B. der Perm/Trias-Grenze) sind allerdings solche Einschläge mit Sicherheit nachweisbar.

Impact and Mass Extinction– Actual State of Research

Abstract

The characteristics and effects of meteorite impact events on Earth are discussed in this paper. A general introduction on the history of impact events, their importance in the solar system, the effects of shock metamorphism and the recognition of impact structures, and the source of the impacting bodies is followed by a detailed discussion of the physical effects of large-scale impacts, in terms of the destruction of the environment and regional to global effects. The possible connection between large impact events and mass extinction in the geological record is also investigated. There is clear evidence of a large impact 65 million years ago, which resulted in the Chicxulub impact structure in Mexico, and which was a major cause of the end-Cretaceous mass extinction. Regarding other such connections, for example, at the Permian/Triassic boundary, the effect of impacts is much less clear and has not been convincingly demonstrated.

^{*)} Univ.-Prof. Dr. CHRISTIAN KOEBERL, Universität Wien, Center of Earth Sciences, Althanstraße 14, A 1090 Wien.
christian.koeberl@univie.ac.at

1. Impaktereignisse im Sonnensystem und auf der Erde

Bis vor nur wenigen Jahren wurde die Untersuchung von Meteoritenkratern als ein Thema für die Astronomie, und nicht für die Erdwissenschaften, angesehen. Die Vorgänge, die die Gestalt unserer Erde bestimmten, wurden als langsame und endogene Prozesse gesehen, in der Tradition von James HUTTON und Charles LYELL. Bekannte Impaktstrukturen, wie etwa das Nördlinger Ries in Süddeutschland oder der Meteor Crater in Arizona, wurden als Ausnahmen betrachtet. Die Wissenschaft von der Erforschung von Einschlägen und Kratern hat einen definierten Startpunkt, und zwar mit der Entdeckung der Mondkrater durch Galileo GALILEI im Jahr 1609. Der Mond ist, wie schon in einem kleinen Teleskop zu sehen, von Kratern bedeckt. Im Laufe der darauf folgenden Jahrhunderte schwankten die Forscher zwischen einer Interpretation der Krater auf dem Mond (und einiger weniger Krater auf der Erde) als durch Vulkanismus oder durch Meteoriteneinschlag entstanden. Bis zur Mitte unseres Jahrhunderts noch waren viele Geologen – dem Beispiel von LYELL folgend – der Meinung, Einschlagskrater gäbe es auf der Erde nicht wirklich, denn die Entstehung eines solchen Kraters wurde ja von Menschen bisher noch nicht beobachtet.

Erst seit etwa 1980 hat die Diskussion von Meteoriteneinschlägen und deren geologischer Bedeutung auch Eingang in den „geologischen Alltag“ gefunden. Dies war vor allem die Folge von Untersuchungen der Gesteine an der Kreide-Tertiär-Grenze, wobei aus chemischen Anomalien auf ein gigantisches Einschlagsereignis vor 65 Millionen Jahren geschlossen wurde, das mit dem schon lange bekannten Aussterben der Dinosaurier und anderer Lebewesen in Verbindung gebracht wurde. Bei diesem Einschlagsereignis wurde der erst 1991 entdeckte – mutmaßlich 200 km durchmessende – Chicxulub-Krater in Mexico gebildet, und die mit diesem Impaktereignis verbundenen Umweltkatastrophen markieren das Ende der Kreidezeit und führten zum Aussterben einer Vielzahl von Lebewesen auf der Erde (siehe unten).

Anfang der 1980er Jahre waren noch weniger als 100 Meteoritenkrater auf der Erde bekannt – mehr allerdings als in den 60er Jahren, als die Liste etwa 20 umfasste. Mittlerweile wurden durch genaue geologische, geophysikalische, mineralogische, geochemische und petrologische Untersuchungen bereits über 170 Impaktkrater auf der Erde bestätigt (für den aktuellen Stand siehe Earth Impact Database, 2006). All dies fiel mit der Erkenntnis zusammen, dass Einschlagsereignisse während der Entwicklung unseres Sonnensystems viel wichtiger waren, als noch vor wenigen Jahren angenommen. Impakte waren schon von Anfang an wichtig: so weiß man heute, dass die Planeten durch Zusammenstöße kleiner Körper, der sogenannten Planetesimale, gebildet wurden. Und die momentan am besten mit den Beobachtungen übereinstimmende Hypothese der Entstehung unseres Erdmondes besagt, dass vor etwa 4,45–4,50 Milliarden Jahren ein etwa marsgroßer Körper mit der Protoerde kollidierte, und aus den Überresten dieser Katastrophe entstand der Mond.

Wie man bereits leicht auf Raumsondenphotos der Planetenoberflächen erkennen kann, sind die Oberflächen aller Planeten, Satelliten, Kleinplaneten (etc.), die eine feste Oberfläche besitzen, von Einschlagskratern übersät. Das größte bekannte Einschlagsbecken im gesamten Sonnensystem befindet sich auf dem Erdmond: Das sogenannte Südpol-Aitken-Becken umfasst die gesamte Südpolgegend des Erdmondes, hat einen Durchmesser von knapp 2500 Kilometern und eine maximale Tiefe von 18 Kilometern. Impaktkrater gibt es im gesamten Sonnensystem. Unser nächster Nachbar im Planetensystem, der Mars, zeigt trotz

der mittlerweile erfolgten Entdeckung von Rift-Systemen und Vulkanen doch teilweise eine von Impaktkratern dominierte Oberfläche. Auch der Merkur, der innerste Planet im Sonnensystem, ist mit Impaktkratern übersät. Die dichte Atmosphäre der Venus verhindert die direkte Beobachtung der Einschlagskrater auf ihrer Oberfläche, aber Radaraufnahmen der Magellan-Raumsonde haben bisher schon mehr als 700 Einschlagskrater gezeigt. Auch die mittlerweile schon ausgezeichneten Bilder von den Kleinplaneten und den Monden der Gasplaneten im äußeren Sonnensystem zeigen, dass die Oberflächen aller dieser Körper zahllose Impaktkrater aufweisen. Insbesondere die Oberfläche unseres Erdmondes, die vollkommen von Kratern bedeckt ist, erlaubt Aussagen über die Impakthäufigkeit im inneren Sonnensystem. Der Mond hat keine Atmosphäre und ist auch nicht (mehr) geologisch aktiv, so dass seine Oberfläche alle Einschlagsereignisse, die über mehrere Milliarden Jahre erfolgt sind, aufgezeichnet hat (Abb. 1). Auf Grund ihrer größeren Anziehungskraft wurde die Erde im Laufe der Jahrmilliarden von einer noch größeren Zahl an kosmischen Projektilen getroffen als der Mond. Die Oberfläche der Erde sollte also mit Einschlagskratern bedeckt sein (vor allem im Vergleich mit der Mondoberfläche). Dass dies augenscheinlich nicht der Fall ist, hängt mit den auf der Erdoberfläche aktiven geologischen Vorgängen, wie etwa Erosion, Subduktion, Sedimentation, Vulkanismus etc., zusammen. Durch diese Vorgänge werden Einschlagskrater auf der Erdoberfläche entweder abgetragen und zerstört oder durch spätere Gesteinsbildungen verdeckt. Der größte Teil der Erdoberfläche wird von ozeanischer Kruste gebildet – und von dieser ist kaum ein Teil älter als 175 Millionen Jahre. Im Gegensatz dazu haben die Gesteine der Mondkruste mehrere Jahrmilliarden Mondgeschichte aufgezeichnet.

Aus der Untersuchung der Einschlagskrater auf den Planeten und Satelliten im inneren Sonnensystem kann man also Aufschlüsse auf die Frage bekommen, mit welcher Häufigkeit solche Einschläge in der Vergangenheit passiert sind, und daraus ableiten, ob (und wie oft) es solche katastrophalen Einschläge auch in Zukunft geben wird. Seit ihrer Entstehung ist die Erde dem Bombardement kosmischer Geschosse ausgesetzt. Diese Vielzahl der Treffer kann man sich besonders deutlich vorstellen, wenn man die Abb. 1 und ähnliche Photos genau betrachtet.

Aus astronomischen sowie aus geochronologischen Untersuchungen der bekannten Meteoritenkrater kann die Frequenz der Einschläge von kosmischen Körpern abgeleitet werden (siehe dazu auch unten, und CHAPMAN & MORRISON, 1994). Daraus findet man etwa, dass Körper mit etwa 1 km Durchmesser, welche Krater von etwa 20–40 km Durchmesser schlagen (wie zum Beispiel das Nördlinger Ries), etwa einmal pro einer Million Jahren auf der Erde auftreffen. Kleine Einschläge (Krater mit etwa 1 km Durchmesser, wie z.B. der Meteor Crater in Arizona) sind wesentlich häufiger – einmal pro etwa 10 000 Jahren. Wirklich große Einschläge, die zur Bildung von Kratern im Bereich von mehr als 100 km Durchmesser führen, sind seltener und treten wahrscheinlich etwa einmal in 50–100 Millionen Jahren auf. Solche gigantischen Einschlagsereignisse sind es dann auch, die zu globalen Katastrophen führen können.

2. Charakteristika von Impaktkratern

Diese Arbeit bietet nicht den Platz, einen vollständigen Überblick über die Erscheinungsformen von Einschlagskratern und ihre Charakteristika zu geben, aber zumindest eine kurze Zusammenfassung muss folgen, bevor wir die Bedeutung von Einschlagsereignissen in der geologischen und biologischen Entwicklung der Erde besprechen können. Geomorphologisch gesehen unterscheidet man auf

Abb. 1.

Ein Teil der von Impaktkratern bedeckten erdabgewandten Seite des Mondes.

Der Mond ist seit etwa 3 Milliarden Jahren nicht mehr geologisch aktiv und zeichnet daher die Impakthäufigkeit im inneren Sonnensystem (in Erdnähe) für die letzten 3 Milliarden Jahre auf.

Apollo 17, Bild 155-23702.



Grund unterschiedlicher Durchmesser und Strukturen zwei grundsätzlich unterschiedliche Formen von Einschlagskratern: die einfachen und die komplexen Krater (z.B. MELOSH, 1989). Auf der Erde sind alle Krater, die kleiner als etwa 2 km im Durchmesser sind, einfache, schüsselförmige Krater; alle anderen Krater sind komplexe Krater, die einen Zentralberg oder ein zentrales Ringsystem aufweisen. Diese beiden wesentlichen Kraterarten sind auch in der Abb. 2 gezeigt. In dieser Abbildung sind relativ junge schüsselförmige Krater auf der Erdoberfläche zu sehen, z.B. der Meteor Crater in Arizona, oder der Tswaing-Krater in Südafrika. Diese morphologische Erscheinungsform wird als „einfacher Krater“ bezeichnet. Die Abbildung zeigt auch komplizierter aufgebaute Krater mit einem Zentralberg, beziehungsweise einer Gruppe von Bergen oder Hügeln, die das Ergebnis von Kollaps und späterer partieller Erosion eines Zentralbergs sind. Diese Strukturen werden als „komplexe Krater“ bezeichnet.

Die Abbildungen zeigen recht deutlich, dass einfache Krater eine etwas andere Form besitzen als komplexe Krater. Einfache Krater sind wesentlich tiefer im Verhältnis zu ihrem Durchmesser als komplexe Krater. In beiden Fällen ist der Kraterboden mit Brekzien und Impaktschmelzen bedeckt; dieses Material ist bei der Kraterbildung wieder in den Krater zurückgefallen. Unter der „Brekzienlinse“ befindet sich dann durch den Einschlag zerrüttetes und zerbrochenes Gestein, das allerdings seinen ursprünglichen Ort nicht verlassen hat. Ein weiterer Teil des ausgeworfenen Materials (Ejekta) ist um den Krater verteilt – je näher am Kraterand, desto dicker ist diese Auswurfdecke. Bei frischen Kratern überlagert das ausgeworfene Material komplett den Untergrund – man bezeichnet das als die kontinuierliche Auswurfdecke, die man üblicherweise bis zu einer Entfernung eines Kraterdurchmessers vom Kraterand weg findet. Im Zentrum von komplexen Kratern findet man meist einen Zentralberg oder eine Ringstruktur aus Hügeln. Diese zentralen Strukturen sind aus Gesteinen aufgebaut, die aus relativ großer Tiefe stammen. Diese Gesteine waren vor dem Einschlag nicht an der Oberfläche aufgeschlossen und wurden als Ergebnis von Kraterbildung und unmittelbarem Kollaps gebildet. Diese Konfiguration bildet ein gutes Unterscheidungsmerkmal zwischen Vulkan- und Einschlagskratern: bei komplexen Impaktkratern findet man im Zentrum Gesteine, die aus größerer Tiefe stammen. Der Zentralberg ist von einem Ring aus Brekzien und Schmelzgestein (die bei einfachen Kratern als zentrale Linse[n] auftreten) umgeben. Komplexe Krater besitzen deutlich mehr Schmelzgestein (bis zu etwa 5 % des gesamten Kratervolumens), das in Form von großen Schmelzkörpern, Linsen, Schichten oder Gängen auftreten

kann. Bei sehr stark durch Erosion zerstörten Kratern ist der Zentralberg oft der einzige Teil des Kraters, der noch übrig ist, wenn der Rest schon bis auf den unteren Teil des mit Brekzien gefüllten Kratergrabens abgetragen ist.

Die Frage stellt sich nun, wie kann man nachweisen, ob es sich um einen Einschlagskrater oder eine andere geologische Struktur handelt? Geophysikalische Beobachtungen können wertvolle Hinweise liefern (z.B. PILKINGTON & GRIEVE, 1992), aber die Bestätigung erfolgt durch petrographische und mineralogische sowie geochemische Untersuchungen an Gesteinsproben der jeweiligen Kraterstruktur (KOEBERL, 2004). Die geochemische Untersuchung von Impaktprodukten – wie zum Beispiel Impaktgläser, Impaktschmelze und andere Impakt-Brekzien – kann Hinweise auf die Entstehungsgeschichte sowie auf das Alter der jeweiligen Meteoritenkrater geben. Anreicherungen an Elementen, die in Meteoriten häufig vorkommen (wie zum Beispiel die Platinmetalle), können gute Hinweise auf die Impaktentstehung einer Struktur geben (siehe KOEBERL, 1998b, 2002).

Von besonderem Interesse für die Bestimmung der Impaktnatur eines Kraters ist die Untersuchung der Impaktbrekzien (siehe FRENCH, 1998). Durch die hohe Impaktenergie beim Einschlag wird eine Schockwelle gebildet, die durch das Gestein läuft und zu unumkehrbaren Änderungen der Kristallstruktur der gesteinsbildenden Minerale führt. Die Schockwellen laufen sowohl in das Target als auch in das Projektil hinein. Die enorm hohen Drucke, die mit den Schockwellen verbunden sind, übersteigen bei weitem die Materialstärke der Gesteine, die bei der Entlastung nach der Kompression schlagartig aufschmelzen oder verdampfen. Die dabei auftretenden Drucke sind im Bereich von Megabar (Millionen Bar, also millionenmal höhere Drucke als der Luftdruck auf der Erdoberfläche).

Bei diesen Prozessen werden die Gesteine sowohl lokal als auch im weiteren Umfeld zerrüttet – es entsteht eine so genannte Brekzie. Im konkreten Fall spricht man von Impaktbrekzien, wobei hier verschiedene Typen unterschieden werden. Zunächst einmal ist es möglich, dass das Gestein nur lokal zerbrochen und wieder rezementiert ist – es ist also nur ein Gestein betroffen und keine Mi-



Abb. 2.

Beispiele von einfachen und komplexen Impaktkratern auf der Erde.

Die Krater in der oberen Reihe und jener in der Mitte rechts sind einfache Krater, die anderen sind komplexe Krater.

1 = Tswaing-(Saltpan-)Krater in Südafrika (1,2 km Durchmesser, 250 000 Jahre alt); 2 = Wolfe-Creek-Krater in Australien (1 km Durchmesser, 1 Million Jahre alt); 3 = Meteor-Krater in Arizona, USA (1,2 km Durchmesser, 50 000 Jahre alt); 4 = Upheaval Dome, Utah, USA (6 km Durchmesser, Alter ca. 100 Millionen Jahre); 5 = BP-Krater in Libyen (2 km Durchmesser, Alter unbekannt aber jünger als 60 Millionen Jahre); 6 = Roter-Kamm-Krater in Namibien (2,5 km Durchmesser, Alter ca. 4 Millionen Jahre); 7 = Clearwater-Doppelkrater in Kanada (24 und 32 km Durchmesser, Alter ca. 250 Millionen Jahre); 8 = Gosses-Bluff-Krater in Australien (24 km Durchmesser, Alter 143 Millionen Jahre); 9 = Aorounga-Krater im Tschad (18 km Durchmesser, Alter unbekannt aber jünger als ca. 300 Millionen Jahre; Streifen sind Sanddünen).

sung verschiedener Gesteine. Dies nennt man eine monomikte Brekzie. Wenn Gesteine allerdings zerbrochen und dann bewegt werden durch die Kraterbildung – wobei solche Gesteine viele Kilometer am Boden oder durch die Luft bewegt werden können – und dann verschiedene Gesteinstypen zusammengemischt und zementiert werden, nennt man das eine polymikte Brekzie. Wenn eine solche Brekzie Schmelzen enthält – Fragmente von dem Material, wo der Druck und die Temperatur so hoch waren, dass Targetgestein aufgeschmolzen wurde –, dann nennt man das einen „Suevit“ (nach dem lateinischen Namen für die Region Schwaben in Süddeutschland, wo die Typenformation für diese Brekzienart im Nördlinger Ries auftritt).

In Abb. 3 ist suevitische Brekzie über der so genannten Bunten Brekzie im Rieskrater in Süddeutschland zu sehen. Der Rieskrater ist 14,4 Millionen Jahre alt und etwa 24 km im Durchmesser. Das Bild zeigt im Bereich der Bunten Brekzie mehrere Meter große, bunte Gesteinsbruchstücke, die in einer feinkörnigen, klastischen Grundmasse vorkommen; dieses Gestein kommt aus oberflächennahen Zone des Ziel-Gebietes und besteht hauptsächlich aus Sedimentgestein.

Darüber liegt die graue Masse des Suevits, der Schmelze führenden Impaktbrekzie, deren Fragmentgehalt aus

größerer Tiefe kommt und vornehmlich aus Kristallgestein besteht. Der Suevit flog weiter und höher und wurde daher in noch heißer Form über der sedimentären Brekzie abgelagert. An einigen Stellen sieht man sogar Entgasungskamine, da das Wasser in den Sedimenten durch die heiße Suevitlage erwärmt wurde und entweichen musste.

In der Abb. 4 ist der typische Suevit vom Rieskrater zu sehen, und zwar in seinem historischen Kontext. Das Ries ist die Typ-Lokalität für Suevit, und dort wurde dieses Gestein schon seit Jahrhunderten als Baumaterial verwendet. In der Abbildung sind sowohl Teile des Rathauses, wie auch der St.-Georgs-Kirche zu sehen, die – wie viele andere Gebäude in dem Gebiet – aus Suevit erbaut wurden. Auch ein Handstück des Suevits ist in der Abbildung gezeigt. Die Temperatur, der einige Komponenten dieses Gesteins ausgesetzt waren, betrugen bis zu 2000°C. Der Rieskrater, mit seiner historischen, kulturellen und wissenschaftlichen Bedeutung ist im Mai 2006 zu einem deutschen Geopark deklariert worden und auf dem besten Weg, in die UNESCO-Geoparkliste aufgenommen zu werden (zu diesem Thema siehe auch den Beitrag von REIMOLD, in diesem Band).

Bei Einschlagsereignissen kommt es also innerhalb kürzester Zeiträume zu sehr hohen Drucken und Temperatu-

Abb. 3.
Steinbruch Aumühle im Rieskrater, Süd-
deutschland.
Grauer Suevit ist über den „Bunten Trümmer-
massen“ („Bunte Brekzie“) abgelagert. Die
Bunte Brekzie stellt eine polymikte Impakt-
brekzie dar, die zuerst (aus geringerer Tiefe;
dominiert von Sedimentgestein-Fragmenten)
ausgeworfen und abgelagert wurde. Darüber
fiel dann der aus größerer Tiefe stammende
(und daher höher und länger fliegende) Suevit
(eine Glas führende polymikte Brekzie, domi-
niert von Kristallingesteinsfragmenten), die
von Material gebildet wurde, das weit höheren
Temperaturen ausgesetzt war.
Der Aufschluss ist etwa 10 Meter hoch.
Foto: C. KOEBERL, Mai 2004.



ren, die um Größenordnungen hö-
her sind als jene, die bei normalen
endogenen (internen) geologi-
schen Prozessen, wie zum Beispiel
Metamorphose, Gebirgsbildung
oder Vulkanausbrüchen, auftreten.
Dabei kommt es zu unumkehrba-
ren Veränderungen in den Gestei-
nen und Mineralen des Gesteins, in das der Impakt erfolgt.
Insbesondere die Kristallstruktur der Minerale wird durch

die hohen Drucke gestört. Es kann auch zur Bildung von
Hochdruckphasen einiger Minerale (z.B. Coesit aus Quarz
oder Stishovit aus Coesit oder Diamant aus Graphit) kom-
men. Kristallographische Veränderungen, die typisch für
die Schock-Metamorphose (auch „Stoßwellenmetamor-
phose“ genannt) sind, werden als „planare Deformations-
strukturen“ (PDF) bezeichnet (siehe STÖFFLER & LANGEN-
HORST, 1994; FRENCH, 1998). Diese sind auf Änderungen
im Kristallgitter von Mineralen (zum Beispiel Quarz oder
Feldspat) zurückzuführen, die nur mit dem Mikroskop
gesehen werden können. Dabei handelt es sich um regel-
mäßige, parallele und generell zueinander im gleichen
Abstand stehende, extrem gerade (planare) Lamellen, die
einen Quarzkristall durchziehen (daher auch der oft infor-
mell verwendete Begriff „Schocklamellen“). Diese Lamel-
len sind sehr dünn (ca. $1\ \mu\text{m}$), parallel und regelmäßig, und
treten in Form von einem oder mehreren einander schnei-
denden Systemen mit genau definierten kristallographi-
schen Orientierungen auf (siehe Abb. 5). Die Form und Art
der planaren Deformationsstrukturen ist charakteristisch
und kommt in dieser Art in der Natur ausschließlich in
Gesteinen von Einschlagskratern vor. In Laborexperimen-
ten mit hohem Schock-Druck wurde nachgewiesen, dass
diese Lamellen erst bei Drucken entstehen, die wesentlich
höher sind als jene, die etwa bei den größten Vulkanerup-
tionen auftreten können. Die Auffindung von solchen „ge-
schockten“ Quarzkristallen ist daher ein eindeutiger Be-
weis für die Impaktentstehung eines Kraters.

Weiter ist es möglich, außer den petrographischen Krite-
rien zur Krateridentifikation auch geochemische Charakte-
ristika, nämlich die Anreicherung typisch extraterrestri-



Abb. 4.
Suevit (Glas führende polymikte Impaktbrekzie) des Rieskraters in Süd-
deutschland: Verbindung von Geschichte, Kultur und Geologie.
Oben sieht man eine aus Suevit als Baumaterial angefertigte Stiege am Nörd-
linger Rathaus (15. Jahrhundert); im Hintergrund ist der Daniel, der Turm der
Nördlinger St. Georgskirche, zu sehen. Diese Kirche wurde ebenfalls aus Sue-
vit erbaut.
Darunter ist Suevit aus dem Steinbruch Aumühle (nordöstlicher Teil des
Randbereiches des Rieskraters) im geschnittenen Handstück zu sehen (1
Euro-Münze als Größenvergleich). Die grauen blasigen Einschlüsse bestehen
aus Impaktglas.

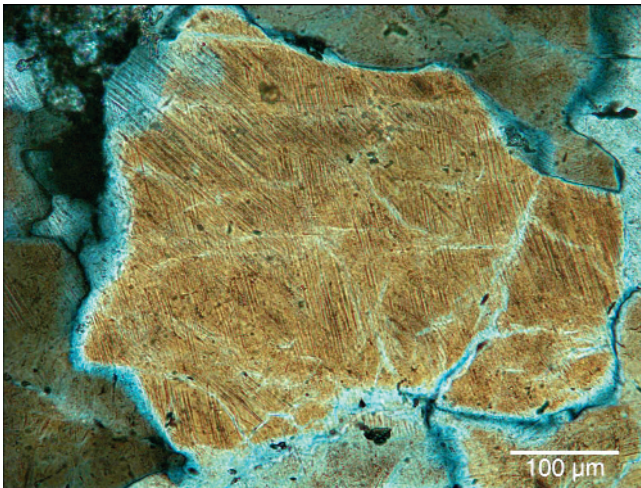


Abb. 5.
Geschockter Quarzkristall im optischen Mikroskop.
Besonders deutlich sind die sogenannten planaren Deformationselemente („Schocklamellen“) zu sehen, die planar (gerade und kristallographisch orientiert) sind, den ganzen Kristall durchsetzen, parallel zueinander sind und in mehr als einer Orientierung (mehr als ein „Set“) vorkommen.
Das Bild zeigt einen Quarzkristall aus den suevitischen Brekzien in Kern LB-08A im Zentrum des Bosumtwi-Kraters in Ghana.
Foto: L. FERRIERE, Univ. Wien.

scher Elemente in Impakt-Brekzien, vor allem in Impaktschmelzgestein, heranzuziehen (KOEBERL, 1998b; siehe auch unten – Kreide/Tertiär-Grenze). Die Bestätigung einer geologisch interessanten und auffälligen Struktur als Impaktkrater bedarf relativ langwieriger und oft auch technisch aufwendiger geologischer, geophysikalischer, petrographischer und geochemischer Untersuchungen. Obwohl die Untersuchung von Impaktkratern erst vor relativ kurzer Zeit Eingang in die Geowissenschaften gefunden hat, und nach wie vor von vielen Geowissenschaftlern als esoterisch angesehen wird, gibt es nun sogar bereits eine kleine Gruppe an Wissenschaftlern, die dazu geführt haben, dass das Pendel auf die „Alles-ist-Impakt“-Seite ausgeschlagen hat. Im Zeitalter der einfach zu beschaffenden Satellitenbilder wird sehr rasch eine annähernd kreisähnliche Struktur unbekannter (oder nicht nachgeprüfter) geologischer Natur als Impaktkrater bezeichnet. Einfache, sogar wellige Linien in Quarzkristallen werden als Schocklamellen bezeichnet, und chemische Anomalien – aus dem Zusammenhang gerissen – werden als Beweis für eine Impaktnatur zitiert. Wie unten noch näher ausgeführt wird, häufen sich derartige Publikationen leider gerade in den letzten Jahren. Diese unkritisch begutachteten Publikationen, die die sehr langwierigen, schwierigen und analytisch bzw. technisch oft komplexen Untersuchungen, die zur tatsächlichen Beweisführung der Impaktnatur einer Struktur nötig sind, negieren, schaden der Sache wesentlich mehr, als sie nützen.

3. Häufigkeit der Einschlagsereignisse auf der Erde

Bevor wir uns nun mit den Anzeichen für große Impaktereignisse in der Erdgeschichte auseinandersetzen, sind noch einige Worte nötig zum astronomischen Aspekt, insbesondere zur Herkunft und Natur der einschlagenden Körper sowie zur Häufigkeit, mit der diese auf der Erde aufschlagen (siehe auch GEHRELS [1994] und ATKINSON et al. [2000]). Als einschlagende Körper kommen im inneren Sonnensystem zwei verschiedene Quellen in Frage: die Asteroiden (Kleinplaneten) und die Kometen. Kleinplaneten, von denen der erste erst im Jahre 1801 entdeckt wurde, ziehen hauptsächlich zwischen Mars und Jupiter

um die Sonne. Es handelt sich um Steinbrocken von bis zu 1000 km Durchmesser, von denen einige auch einen metallischen Kern besitzen (der bei Zusammenstößen freigesetzt werden kann). Mars hat einen mittleren Sonnenabstand von 1,5 Astronomischen Einheiten (AE = die mittlere Entfernung Erde – Sonne, ca. 150 Millionen Kilometer) und Jupiter von 5,2 AE. Im Gegensatz dazu liegen die mittleren Entfernungen der meisten Kleinplaneten zwischen 2,1 und 3,3 AE, aber auf Grund ihrer exzentrischen Ellipsenbahnen kann man sie auch näher (im Perihel = Sonnennähe) oder weiter entfernt (im Aphel = Sonnenweite) finden. Während die Kleinplanetenbahnen stärkere Exzentrizitäten (Abweichungen von der Kreisgestalt) als Planetenbahnen aufweisen können, haben ihre Bahnen doch – im Gegensatz zu den Kometenbahnen – nur relativ geringe Bahnneigungen gegenüber der Erdbahn. Heute kennt man von etwa 15 000 Kleinplaneten relativ genaue Bahnen. In der Frühzeit des Sonnensystems wurden die Bahnen der sogenannten Planetesimalen durch den Riesenplaneten Jupiter gestört. Bei Planetesimalen handelt es sich um die kilometergroßen Gesteinskörper, die zur Zeit der Entstehung des Planetensystems vor etwa 4,56 Milliarden Jahren gebildet wurden und aus denen anderswo im Sonnensystem durch relativ sanfte Zusammenstöße (Akkretion) die Planeten wuchsen. In Jupiternähe jedoch konnten sich die dort kreisenden Körper nie zu einem Planeten zusammenfinden.

Mit der Erde und anderen Körpern im inneren Sonnensystem kollidieren können allerdings nur Kleinplaneten, die sich nicht auf „normalen“ Bahnen im Asteroidengürtel bewegen, sondern lediglich jene, die sich auf exzentrischen Bahnen befinden, die sie in Erdnähe bringen oder die sogar die Erdbahn kreuzen. Diese Kleinplaneten werden je nach der Bahn, in der sie sich befinden, als Apollo-, Amor- oder Aten-Asteroiden bezeichnet. Apollo-Asteroiden befinden sich in erdbahnkreuzenden Bahnen, Amor-Asteroiden in die Marsbahn kreuzenden Bahnen (die sehr nahe an die Erdbahn kommen), und Aten-Asteroiden laufen hauptsächlich innerhalb der Erdbahn um die Sonne. Die Kleinplaneten dieser drei Gruppen können für die Erde gefährlich werden. Apollo-Asteroiden kreuzen die Erdbahn und können daher mit der Erde kollidieren. Aten-Asteroiden haben mittlere Entfernungen von weniger als 1 AE, aber im Aphel können auch sie die Erdbahn kreuzen, und Berechnungen zeigen, dass die Bahnen der Amor-Asteroiden, die momentan nicht die Erdbahn schneiden, sich innerhalb weniger Jahrtausende so entwickeln können, dass sie dies tun. Zusammen werden diese Objekte im Englischen als „Near-Earth Objects“, erdnahe Objekte, bezeichnet. Die Abkürzung NEOs ist mittlerweile auch international gebräuchlich. Die Bahnen der Kleinplaneten sind nicht für längere Zeit stabil. Auf Grund der Wechselwirkung mit der Anziehungskraft der Planeten ändern sich die Bahnelemente relativ rasch.

Dies bedeutet, dass die Verweilzeit der Asteroiden der Apollo-, Amor- und Aten-Gruppen in ihren Bahnen relativ kurz ist. Einige wenige Millionen Jahre sind zwar für Menschen eine lange Zeit, aber im Rahmen geologischer und astronomischer Zeitskalen sehr kurz, verglichen mit dem Alter des Planetensystems. Die NEOs müssen daher ständig nachgeliefert werden. Eine gute Quelle stellt der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter dar. Durch ständige Störungen der Bahnen untereinander und durch die großen Planeten sowie durch Zusammenstöße untereinander werden immer wieder Kleinplaneten aus dem Asteroidengürtel in Bahnen gebracht, die sie ins innere Sonnensystem führen. Die momentan größten bekannten NEOs haben einen Durchmesser von knapp über 8 km. Der Einschlag eines solchen Körpers auf der Erde kann, je nach Geschwindigkeit, einen Krater von etwa 100 bis knapp über 200 km Durchmesser bilden. Da aber die NEOs nur einige Millionen Jahre Verweilzeit in ihren Bah-

nen haben, bedeutet dies nicht, dass ein Körper dieser Größe demnächst auf der Erde aufschlagen würde – oder dass in 50 Millionen Jahren nicht ein viel größeres Objekt in den „NEO-Pool“ gelangen könnte.

Obwohl heute mehrere tausend NEOs bekannt sind (vor allem auf Grund der automatisierten astronomischen Suchprogramme in den USA), ist das nur ein Bruchteil der Körper, die tatsächlich in die Nähe der Erde kommen können. Aus den bisher vorhandenen Beobachtungsdaten sowie aus theoretischen Überlegungen weiß man, dass es eine Korrelation zwischen der Größe und der Häufigkeit der NEOs gibt: je kleiner, desto häufiger. STUART & BINZEL (2004) erwähnen, dass – nach statistischer Auswertung der Asteroidendaten – bis Juni 2004 ca. 56% der NEOs mit mehr als 1 km Durchmesser gefunden wurden. Die halbwegs genaue Kenntnis der Anzahl der erdbahnkreuzenden Kleinplaneten ist aber für Abschätzungen der Wahrscheinlichkeit, mit der diese Körper mit der Erde kollidieren können, von Bedeutung.

Die zweite große Gruppe der möglichen „Impaktoren“ auf der Erde sind die Kometen, die nicht auf so regelmäßigen Bahnen im inneren Sonnensystem wie die Kleinplaneten laufen. Kurzperiodische Kometen laufen auf wenig exzentrischen Ellipsenbahnen, die sie mit Umlaufperioden von weniger als 200 Jahren immer wieder in Sonnennähe bringen (z.B. Komet Halley, der zuletzt 1986 der Erde nahe kam). Im Gegensatz dazu bewegen sich langperiodische Kometen auf sehr exzentrischen Ellipsen oder sogar Parabelbahnen und haben Umlaufperioden von mehreren hundert bis zu Millionen Jahren. Ihre Apheldistanzen können bis zu 50 000 AE betragen – etwa ein Sechstel der Entfernung zu den nächsten Sternen. Berechnungen haben allerdings gezeigt, dass Kometen nur für einen kleinen Teil der Impaktkrater auf der Erde oder auf dem Mond verantwortlich sind (siehe z.B. Artikel in GEHRELS [1994]). Interessante Sonderfälle sind Kometenkerne, die in mehrere Teile brachen. Bekannte Beispiele sind Biela's Komet von 1846, Komet West von 1976, und Komet Shoemaker-Levy 9 (von dem im Jahr 1994 etwa 20 Bruchstücke auf den Planeten Jupiter stürzten und „Impaktwolken“ mit Durchmessern ähnlich jener der Erde bildeten; SPENCER & MITTON [1995]).

Es gibt also zwei wichtige Klassen von „Impaktoren“, die der Erde gefährlich werden können, die Kleinplaneten (NEOs) und die Kometen, wobei Letztere laut verschiedener Berechnungen für einen geringeren Prozentsatz der

Einschläge verantwortlich sind. Die für uns wichtige Frage ist jedoch, wie oft kommt es im Durchschnitt zu derartigen Einschlagsereignissen auf der Erde? Natürlich ist zu erwarten, dass kleinere Körper – weil es viel mehr von ihnen gibt – wesentlich häufiger mit der Erde zusammenstoßen können als größere Körper. Abb. 6 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Durchmesser des einschlagenden Objektes und der Häufigkeit, mit der ein solcher Körper mit der Erde kollidiert, gezeichnet als das mittlere Intervall zwischen Einschlägen. Zusätzlich ist noch die addierte (kumulative) Einschlagswahrscheinlichkeit pro Jahr angegeben. Aus diesem Diagramm erkennt man, dass zum Beispiel Einschläge von Körpern mit ca. 50–100 m Durchmesser, die Krater mit einigen hundert Metern bis ca. 1,5 km Durchmesser schlagen können, alle paar tausend Jahre einmal auf der Erde vorkommen. Vor allem bei kleineren Kratern ist die Art des Impaktors – ob ein Stein- oder Eisen-„Meteorit“ – wichtig. Krater von der Größe des Rieskraters in Süddeutschland (24 km Durchmesser) werden nur etwa alle Million Jahre gebildet und Ereignisse von Chicxulub-Größe, die Massensterben auslösen können, nur etwa einmal pro 100 Millionen Jahre.

Geologische Untersuchungen, zusammen mit detaillierten mineralogischen und geochemischen Analysen der Gesteine der jeweiligen Strukturen haben, wie bereits erwähnt, zum Nachweis von etwa 170 Einschlagskratern auf der Erdoberfläche geführt. Die jeweilige aktuelle Liste findet man online (Earth Impact Database, 2006). Fast jedes Jahr werden einige Krater dieser Liste hinzugefügt. Wenn man diese Liste statistisch untersucht, stellt man fest, dass die bekannten Krater von kleinen und jungen Strukturen dominiert sind. Auf Grund der geologischen Gegebenheiten der Erde ist dies leicht verständlich, da größere Einschläge relativ selten passieren, und auf Grund der aktiven geologischen, hydrologischen, und atmosphärischen Vorgänge auf der Erde die kleinen Krater relativ rasch durch Erosion zerstört werden. Dies sieht man recht deutlich in Abb. 2, wenn man die Bilder der beiden Strukturen Tswaing und Meteor Crater (oben links und rechts) vergleicht – der Tswaing Crater ist bei gleichem Durchmesser deutlich stärker erodiert als der Meteor Crater – und das bei einem Altersunterschied von maximal einem Faktor 5 (250.000 bzw. 50.000 Jahre). Will man daher die Liste der bekannten Krater zu statistischen Zwecken verwenden, so muss man diesen Erosionseffekt (d.h. die fast völlige Abwesenheit von alten kleinen Kratern) entsprechend korrigieren, etwa unter Verwendung von Kraterverteilungen auf dem Erdmond. Die Details dieser Ansätze sprengen allerdings den Rahmen der vorliegenden Arbeit.

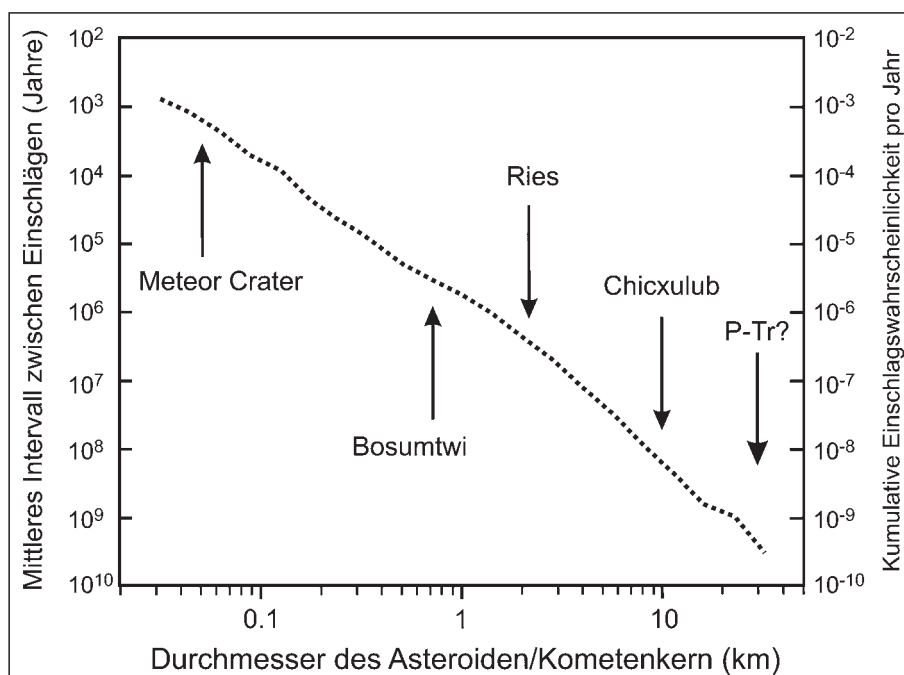


Abb. 6. Zusammenhang zwischen Einschlagshäufigkeit und Durchmesser des einschlagenden Körpers (dargestellt für die mittlere Dichte von Steinmeteoriten/Asteroiden bzw. Kometenkernen). Die Einschlagshäufigkeit ist in Form des mittleren Intervalls in Jahren zwischen den einzelnen Ereignissen sowie als kumulative Wahrscheinlichkeit pro Jahr gegeben. Diagramm teilweise nach STUART & BINZEL (2004). Die Größe des kleinstmöglichen postulierten hypothetischen Körpers für einen Einschlag an der Perm/Trias-Grenze ist eingezeichnet (siehe Text).

Tabelle 1.

Liste aller im Jahre 2006 bekannten Impaktstrukturen auf der Erde, deren Durchmesser (Dm) größer als 30 km ist.
Nach POAG et al. (2004) und Earth Impact Database (2006), mit Zusatzinformationen.

Name	Land	Breite	Länge	Dm [km]	Alter [Ma]
Vredefort	Südafrika	-27.00	27.50	300	2023
Sudbury	Kanada	46.60	- 81.18	240	1850
Chicxulub	Mexiko	21.33	- 89.50	180	65
Manicouagan	Kanada	51.38	- 68.70	100	214
Popigai	Russland	71.50	111.00	100	35
Acraman	Australien	-32.02	135.45	90	680
Chesapeake Bay	USA	37.25	- 76.00	85	35.3
Puchezh-Katunki	Russland	57.10	43.58	80	220
Morokweng	Südafrika	-26.47	23.53	70	145
Kara	Russland	69.08	64.30	65	73
Beaverhead	USA	44.60	-113.00	60	600
Siljan	Schweden	61.03	14.87	60	377
Tookoonooka	Australien	-27.00	143.00	55	128
Charlevoix	Kanada	47.53	- 70.30	54	357
Montagnais	Kanada	42.88	- 64.22	45	51
Araguainha Dome	Brasilien	-16.77	- 52.98	40	249
Mjølnir	Norwegen	73.80	29.66	40	143
Saint Martin	Kanada	51.78	- 98.53	40	220
Carswell	Kanada	58.45	-109.50	39	115
Manson	USA	42.58	- 94.52	38	74
Clearwater Lake West	Kanada	56.22	- 74.50	36	290
Kara-Kul	Tadschikistan	39.02	73.45	30	<50
Slate Islands	Kanada	48.67	- 87.00	30	436
Teague	Australien	-25.87	120.88	30	1685

Tabelle 1 führt alle heute (Mitte 2006) bekannten irdischen Impaktkrater an, die größer als 30 km sind. Sowohl Lokalitäten als auch Alter sind angegeben. Dabei fällt auf, dass zwar kleine Krater meist durch Erosion zerstört werden, aber die Situation bei größeren Strukturen anders ist. Die meisten großen Impaktstrukturen auf der Erde sind auch relativ alt; die beiden ältesten bekannten Krater sind auch gleichzeitig die größten bekannten Strukturen (Vredefort und Sudbury), obwohl deren heutige Durchmesser und Oberflächenaufschlüsse wesentlich kleiner sind als ihre rekonstruierten Durchmesser. Von manchen Kratern sind keine oder fast keine Spuren auf der Erdoberfläche vorhanden (z.B. Chicxulub), trotz ihres nicht allzuhohen Alters. Die Entdeckungsgeschichte der letzten Jahre zeigt, dass es offensichtlich noch eine beträchtliche Zahl an großen Impaktkratern auf der Erde gibt – nur viele von ihnen sind durch Sedimentgesteine verdeckt und daher unseren Blicken verborgen. Diese Einschläge waren es aber, die große Umweltveränderungen hervorgerufen haben.

4. Der Impaktprozess und seine Folgen

Zum Verständnis der Effekte, vor allem der Umwelteinflüsse von Einschlagsereignissen, ist es zuerst notwendig, kurz zu beschreiben, was bei einem solchen Einschlag vor sich geht. Aus Platzgründen ist diese Beschreibung kurz gehalten. Interessierte Leser werden für Details auf die Bücher von MELOSH (1989) und KOEBERL (1998a) sowie die Arbeiten von TOON et al. (1997), KRING (1997) und COLLINS et al. (2005) und Zitate in diesen Publikationen verwiesen. Unsere Kenntnisse zu den Vorgängen während eines Impaktereignisses stammen hauptsächlich aus vier Quellen: erstens, von der Untersuchung bekannter Meteoritenkrater auf der Erde; zweitens, aus der Untersuchung von Kratern, die durch Sprengversuche mit konventionellem Sprengstoff wie auch mit Atom- oder Wasserstoffbomben gebildet wurden; drittens aus Laborexperimenten mit Hochgeschwindigkeitsprojektilen; und viertens, numerische Simulationsrechnungen. Der Begriff „Impakt“ charakterisiert einen kontinuierlichen Vorgang, der mit der Berührung der Oberfläche durch den „Boliden“ oder das „Projek-

til“ beginnt und mit den letzten Setzungsbewegungen der Gesteine im fertigen Krater endet. Zum besseren Verständnis der Vorgänge unterteilt man jedoch diesen kontinuierlichen Prozess in drei Phasen: die Kontakt- und Kompressionsphase, die Auswurfphase und die Modifikationsphase (siehe MELOSH, 1989). Die Kontakt- und Kompressionsphase beginnt mit der Berührung der planetaren Oberfläche durch den einschlagenden Körper (das Projektil). Das sich rasch bewegende Projektil dringt vorerst in die (Erd-)Oberfläche ein, beginnt diese zu komprimieren und beschleunigt einen Teil dieses Materials bis auf einen signifikanten Teil der Einschlagsgeschwindigkeit, die aus himelsmechanischen Gründen zwischen 11 und 72 km/s sein kann. Dies sind enorme Geschwindigkeiten – schon ein langsamer Körper durchmisst die Troposphäre der Erde in weniger als einer Sekunde.

Danach bremst der Widerstand des getroffenen Gesteins (oder Wassers im Fall des Ozeans) das Projektil rasch ab und es bilden sich Schockwellen, die vom Berührungspunkt zwischen Projektil und Target ausgehen. Die Schockwellen laufen sowohl in das Target als auch in das Projektil hinein. Die enorm hohen Drucke, die mit den Schockwellen verbunden sind, übersteigen bei weitem die Materialstärke der Gesteine, die bei der Entlastung nach der Kompression schlagartig aufschmelzen oder verdampfen. Die dabei auftretenden Drucke liegen, wie erwähnt, im Bereich von einigen Megabar.

In dieser frühen Phase – noch bevor ein Krater gebildet wird – kommt es zum Auswurf von stark geschocktem, geschmolzenem, und/oder verdampftem Material von der Grenzschicht zwischen Projektil und Target, den so genannten „Jets“. Dieses Material wird mit hohen Geschwindigkeiten, die bis zur Hälfte der Einschlagsgeschwindigkeit reichen können, ausgeworfen und kann relativ weit fliegen. Das Ende der Kompressionsphase ist erreicht, wenn die Schockwelle, die durch das Projektil läuft, an dessen Ende angekommen ist und das Projektil entlastet wird. Dadurch kommt es zum schlagartigen Aufschmelzen und Verdampfen des Projektils. Eine enorme Menge an Energie ist in einem relativ kleinen Raum freigesetzt worden und hat zu enorm hohen Drucken und Temperaturen (zehntausende Grad) in dem dort befindlichen Material geführt. Seit dem Kontakt hat diese Phase bisher etwa ein Tausendstel einer Sekunde gedauert, für den Einschlag eines Meteoriten mit 10 Metern Durchmesser und einer Geschwindigkeit von 10 km/s bzw. ein Zehntel einer Sekunde für einen Kleinplaneten mit etwa 1 Kilometer Durchmesser.

In der sofort darauf folgenden Phase, der Auswurfphase, dringt die mehr oder weniger kugelschalenförmige Schockwelle weiter in den Boden ein. Je weiter sich diese Schockwelle vom Impaktpunkt entfernt, desto geringer wird ihre Energie und der damit verbundene Druck. Die höchsten Drucke sind daher in unmittelbarer Nähe des Einschlagspunktes zu erwarten. Das Material, das sich unter hohen Temperatur- und Druckbedingungen befindet, dehnt sich explosionsartig aus – hier ist die Analogie mit Bombenexplosionen zu sehen. Über dem Einschlagspunkt befindet sich auch ein sich rasch ausdehnender gluthießer Feuerball, der aus verdampftem Projektil- und Targetmaterial besteht und der die Atmosphäre verdrängt. Hinter der Schockwelle (Kompression) folgt eine Entlastung, die man als Unterdruckwelle verstehen könnte. Dadurch wird zerkümmertes, geschmolzenes, oder verdampftes Material in Bewegung gesetzt, und ein „Massenfluss“ beginnt. Dieser Massenfluss ist es, der zur eigentlichen Kraterbildung führt. Das Material kann sich nicht nach unten weiterbewegen, sondern folgt dem Weg des geringeren Widerstandes und bewegt sich in die Richtung, in der sich kein Hindernis befindet, also hauptsächlich nach oben.

Die ausgeworfenen Materialien werden als „Ejekta“ bezeichnet (siehe MONTANARI & KOEBERL, 2000). Ein Teil wird mit dem sich nach wie vor ausbreitenden Feuerball mitgenommen. Dieses Material kann sehr weit von der Einschlagsstelle entfernt wieder fallen. Manche distale Ejekta bestehen aus Glas und werden als Tektite bezeichnet (z.B. KOEBERL, 1986). Bei sehr großen Einschlägen, die zu Kratern von etwa 100 Kilometern Durchmesser führen, kann ein Teil des ausgeworfenen Materials sogar in die Stratosphäre und in eine Erdumlaufbahn gelangen, um dann über lange Zeit (sogar über einen Zeitraum von mehreren Jahren hinweg) wieder auf die Erde zu fallen (siehe nächstes Kapitel). In geringerem Ausmaß kennt man diesen Effekt auch von Vulkaneruptionen, wo Asche in die Stratosphäre gelangt. Im Krater selbst fließt das Material aus der Tiefe des sich öffnenden Kraters am immer weiter zurückweichenden Kraterrand vorbei und bildet eine Art Vorhang – wie ein umgekehrter Kegel – aus Auswurfmaterial. Dieser Vorhang bewegt sich vom Krater weg, wobei Material ausregnet. Dieses Material besteht aus zerbrochenem, geschocktem oder aufgeschmolzenem Gestein.

Der frisch gebildete Krater wird auch „transienter Krater“ (etwa „Übergangskrater“) genannt. Er ist nicht stabil, und der Kraterrand, der teilweise aus geschockten, zerrütteten, und aufgeschobenen Gesteinen besteht, beginnt in den Krater zu rutschen. Außerdem fällt das senkrecht ausgeworfene Material nun wieder in den Krater zurück und beginnt ihn anzufüllen. Bei kleineren Kratern rutscht der Rand wie bei einem Bergsturz ab, bei größeren Kratern kann sich der eingestürzte Rand – auf Grund des schon vorher etwas flacheren Kraterbodens – terrassenförmig ausbilden und im Zentrum des Kraters, wo sich Material von allen Seiten trifft, zusammen mit dem sich hebenden Kraterboden zur Bildung eines Zentralberges führen. Diese Phase – die Modifikationsphase – dauert je nach Kratergröße Minuten bis Stunden und am Ende steht ein Krater, dessen End-

durchmesser ein Vielfaches der Dimensionen des ursprünglichen Projektils ausmacht (siehe Abb. 7, 8). Der exakte Zusammenhang zwischen der Größe des Meteorits (Kleinplanet, Komet) und dem resultierenden Kraterdurchmesser ist komplex und hängt von vielen Parametern ab: Masse, Geschwindigkeit und Aufprallwinkel des Projektils, von der Art und Struktur des Targets, und von der Anziehungskraft des Himmelskörpers, auf dem der Einschlag erfolgt (siehe auch MELOSH [1989] und COLLINS et al. [2005]).

Es ist also klar, dass bei einem Meteoriteneinschlag ungeheure Energiemengen frei werden, und daher stellt sich die Frage nach den Auswirkungen solcher Einschläge. Hier gibt es große Unterschiede zwischen Einschlägen kleiner und großer Körper. Bei kleinen Körpern ist auch deren Zusammensetzung besonders wichtig. Kleinere Steinmeteorite verhalten sich in der Erdatmosphäre anders als Eisenmeteorite, vor allem auf Grund der viel höheren inneren Festigkeit (Kohärenz) der Eisenmeteorite. Kleinere Objekte werden in der Erdatmosphäre abgebremst und können dabei, auf Grund der inneren Spannungen, zerbrechen. Der Meteor Crater wurde zum Beispiel durch den Einschlag eines Eisenmeteoriten mit etwa 50 m Durchmesser gebildet (wobei ein Teil des meteoritischen Materials in Folge der deutlichen Abbremsung in der Atmosphäre „überlebt“ hat und nun in Form von Meteoriten um den Krater gefunden wurde). Die dabei freigesetzte Energie kann mit der einer Explosion mit 10 Megatonnen TNT verglichen werden. Relativ dazu war die Explosionsstärke der Atombombe von Hiroshima nur etwa 20 Kilotonnen TNT äquivalent, also 500 Mal weniger Energie! Das Schicksal von Steinmeteoriten vergleichbarer Größe (die aber geringere Masse besitzen) ist anders. Berechnungen zeigen, dass diese Objekte während des Abbremsens in der Atmosphäre auf Grund der inneren Spannungen explodieren.

Ein Beispiel einer solchen Explosion ist das sogenannte „Tunguska-Ereignis“, wobei am 30. Juni 1908 über den



Abb. 7.
Der Wiener Stephansdom als Größenvergleich im „Meteor Crater“ in Arizona (Durchmesser 1,2 km).
Blick von Norden (Kratermuseum im Vordergrund am Kraterand). Die Größe des einschlagenden Objektes, der einen Krater dieser Dimension bildet, hat einen Durchmesser von etwa einem Drittel der Höhe des Stephansdoms.



Abb. 8.
Der „Meteor Crater“ (Durchmesser 1,2 km), der durch den Einschlag eines Meteoriten mit nur ca. 40–50 m Durchmesser gebildet wurde, im Größenvergleich mit der Stadt Wien: die Wiener Innenstadt verschwindet vollkommen in dem Krater.

Wäldern Zentralsibiriens eine gewaltige Explosion erfolgte, die eine Waldfläche von zirka 2000 Quadratkilometern zerstörte; die Explosion war bis in 1500 km Entfernung zu hören, und die Luftdruckwelle wurde Stunden später sogar in Europa registriert. Auch seismische Stationen erfassten das Ereignis. Als die heute wahrscheinlichste Erklärung gilt, dass ein Steinmeteorit mit einem Durchmesser von etwa 20 bis 50 m (je nach Eindringgeschwindigkeit und Winkel) in einer Höhe von etwa 10 Kilometern mit einer Explosionsstärke von etwa 5–10 Megatonnen TNT explodiert war (z.B. CHYBA et al. [1993]). Dass solche Ereignisse tatsächlich durch Explosionen von Meteoriten in der Erdatmosphäre erklärt werden können, wird durch Messungen von amerikanischen Spionagesatelliten unterstützt (siehe Arbeiten in GEHRELS [1994]). Erst in jüngster Zeit publik gemachte Daten zeigen, dass diese Satelliten in der Zeit zwischen 1975 und 1992 die atmosphärischen Explosionen von 136 Meteoroiden mit Explosionsstärken zwischen 1 und 10 Kilotonnen TNT äquivalent beobachtet hatten. Derartige Explosionen sind also relativ häufig (siehe auch LEWIS, 1997). Wie Abb. 6 zeigt, kommen Explosionen von Tunguska-Größe etwa alle hundert Jahre einmal vor. Kleinere Ereignisse sind aber häufiger und können durchaus lokale Zerstörungen anrichten. Tunguska hat 2000 km² verwüstet – im Vergleich: die Fläche Wiens liegt bei knapp über 400 km².

Die Bildung auch von kleinen Meteoritenkratern hat ebenfalls drastische Konsequenzen, zumindest für die nähere Umgebung. In Abbildung 8 ist der „Meteor Crater“, einer der kleinsten Krater auf der Erde, im Größenvergleich mit der Stadt Wien abgebildet. Krater dieser Größe entstehen alle paar tausend Jahre irgendwo auf der Erde. In dem Bild ist aber nicht gezeigt, welche Verwüstungen ein solcher Einschlag anrichten würde. Dies ist schematisch in Abb. 9 dargestellt. Wenn man also die Entfernungsangaben (Berechnungen nach KRING [1997]) auf das Stadtbild von Wien übertragen würde, sieht man, dass praktisch das gesamte Stadtgebiet bis in die mittleren Außenbezirke zerstört werden würde. Die Folgen für die Umwelt von solchen Einschlägen sind verschiedenartig, wobei die bedeutendsten

Effekte die Luftdruckwelle der Explosion, das zurückstürzende Gestein, die thermische Strahlung des Explosions-Feuerballs und impaktinduzierte Erdbeben sind.

COLLINS et al. (2005) beschreiben ein Computerprogramm, mit dessen Hilfe Impaktfolgen abgeschätzt werden können. Beispiele dieser Resultate sind in den Abbildungen 10 und 11 dargestellt. COLLINS et al. (2005) demonstrieren die Folgen von drei hypothetischen Einschlägen verschiedener Größenordnung am Beispiel Los Angeles: die Einschläge eines Eisenmeteoriten mit 40 Meter Durchmesser sowie von zwei Steinmeteoriten bzw. Asteroiden mit 1,75 und 18 km Durchmesser. Im ersten Fall bestand das Target aus Sedimentgestein, in den beiden anderen aus Kristallingestein. Der erste Fall führt zur Bildung eines Einschlagskraters, der etwas kleiner als der Meteor Crater ist, der zweite entspricht etwa der Bildung des 24 km großen Ries-Kraters in Süddeutschland, und der dritte der eines Kraters mit etwas größeren Dimensionen als der Chicxulub-Krater (siehe nächstes Kapitel).

Berechnungen von COLLINS et al. (2005) zeigen, dass im Fall des mittelgroßen Einschlages noch in der Entfernung von etwa 200 km (der Entfernung San Diego – Los Angeles entsprechend) die Wärmestrahlung des Feuerballs noch zur Selbstentzündung von Kleidung ausreicht (Abb. 10). Im Fall des größten modellierten Einschlages trifft so ein Effekt noch in der Entfernung von Denver – über 1500 km von Los Angeles entfernt – auf. Der Einschlag des kleinsten Objektes würde in der Entfernung von San Diego keine wesentlichen Konsequenzen hervorrufen – nur ein schwaches Erdbeben, ca. 40 Sekunden nach dem Einschlag, entsprechend einem Beben der Stärke 4,9 nach RICHTER, wäre merkbar. Der Einschlag des mittelgroßen Objektes hätte in 200 km Entfernung wesentlich katastrophalere Folgen – neben der thermischen Strahlung und einem starken Erdbeben würden noch Winde mit mindestens 150 km/h Stärke drastische Schäden anrichten. Die seismischen Auswirkungen sind daher ebenfalls wichtig. So würden bei den beiden größeren Einschlägen noch in Städten, die sich viele hundert Kilometer entfernt befinden, starke Erdbebenschäden auftreten. Am Aufschlagsort selbst würde der

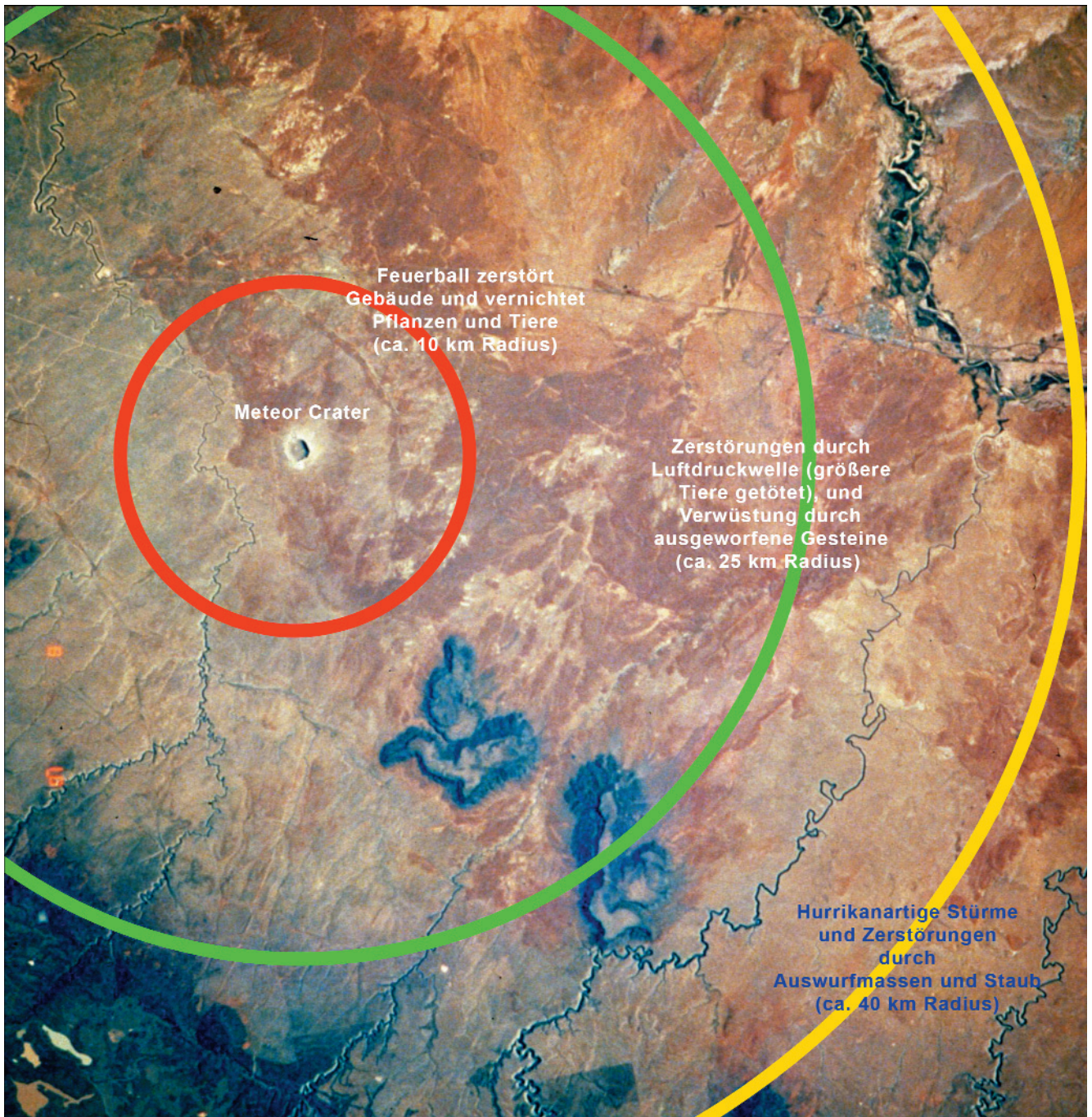


Abb. 9.
Einige der direkten Folgen eines Einschlages der Größe des „Meteor Crater“ in Abhängigkeit von der Entfernung vom Einschlagsort (nach Daten in KRING [1997]).

größte Einschlag ein Beben mit einer aus der Natur sonst nicht dokumentierten Stärke auslösen. Der Luft-Überdruck (d.h. der höchste Druck in der Luftdruckwelle der Explosion) kann noch in beträchtlichen Entfernungen Gebäude zum Einsturz bringen.

Eine weitere wichtige Auswirkung von Einschlägen ist das Auswurfmaterial, das – besonders bei größeren Ereignissen – weit vom Einschlagsort transportiert werden kann. Größere Bruchstücke und Schmelzen folgen ballistischen Bahnen vom Einschlagsort; Staub kann auch anders transportiert werden (u.a. mit dem Feuerball). In Abb. 11 sieht man, dass bei einem kleinen Einschlag (Größenordnung „Meteor Crater“) praktisch die Gesamtmasse der Ejekta innerhalb eines Radius von 10 km vom Einschlagsort wieder abgelagert wird. Bei den beiden größeren Impakten werden allerdings bedeutende Mengen an Auswurfmaterial auch in großen Entfernungen abgelagert – im Fall des

rieskraterähnlichen Impaktes werden noch in 100 km Entfernung etwa 1 m große Ejekta abgelagert; im Fall des chixulubähnlichen Einschlages ist dieser Bereich auf etwa 1000 km Radius ausgedehnt. Derartige Ereignisse führen also schon bei mittelgroßen Einschlägen zu Effekten, die man sonst nur von Supervulkanen erwarten darf; dies führt mit großer Sicherheit zum regionalen bis kontinentalen Zusammenbruch von Ackerbau und Viehzucht und einer starken Beeinträchtigung der Wasserversorgung.

Die Folgen von Einschlägen sind also mannigfaltig. Bei Impakten in marine Targets kann zusätzlich noch Schaden durch Wasser entstehen. Das beinhaltet sowohl impaktinduzierte Tsunamis (deren Effekte auf Grund der Amplitude der Wellen am Ursprungsort möglicherweise weniger gefährlich sind als seismisch induzierte Tsunamis – z.B. WARD & ASPHAUG [2000]), als auch enorme Wassermassen, die bei der enormen Hitze eines Einschlages ver-

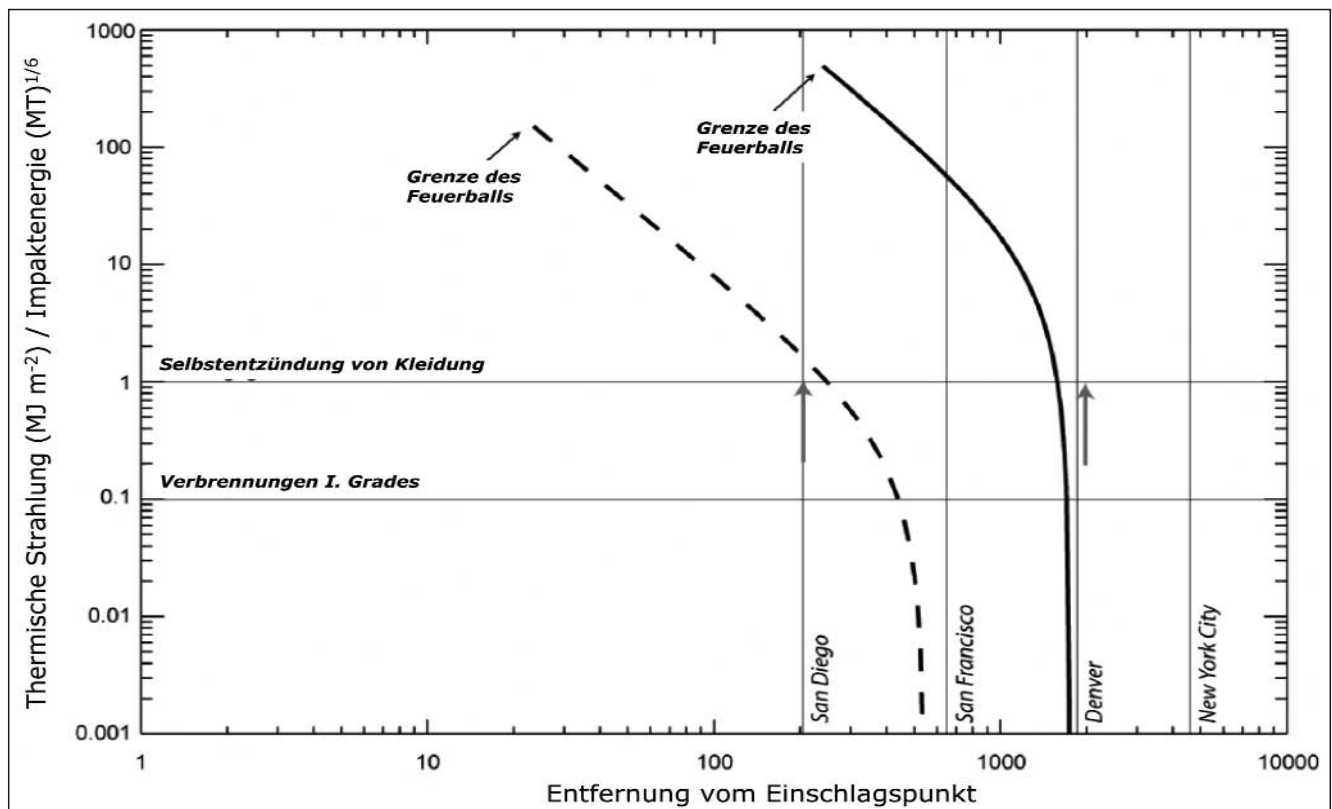


Abb. 10.
Auswirkungen von hypothetischen Einschlägen (mit 20 km/s) in Los Angeles (USA) in Form thermischer Strahlungsenergie. Beim Einschlag des kleinsten Objektes (Eisenmeteorit mit 40 m Durchmesser) wird kein Feuerball gebildet (nur Luftdruckwelle), daher ist für dieses Objekt keine Linie gezeichnet. Die gestrichelte Linie zeigt die Effekte eines 1,75 km großen Asteroiden (Steinmeteorit), während die durchgezogene Linie den Einschlag eines 18 km großen Asteroiden bezeichnet. Die Entfernungen sind in km gegeben. Diagramm nach COLLINS et al. (2005).

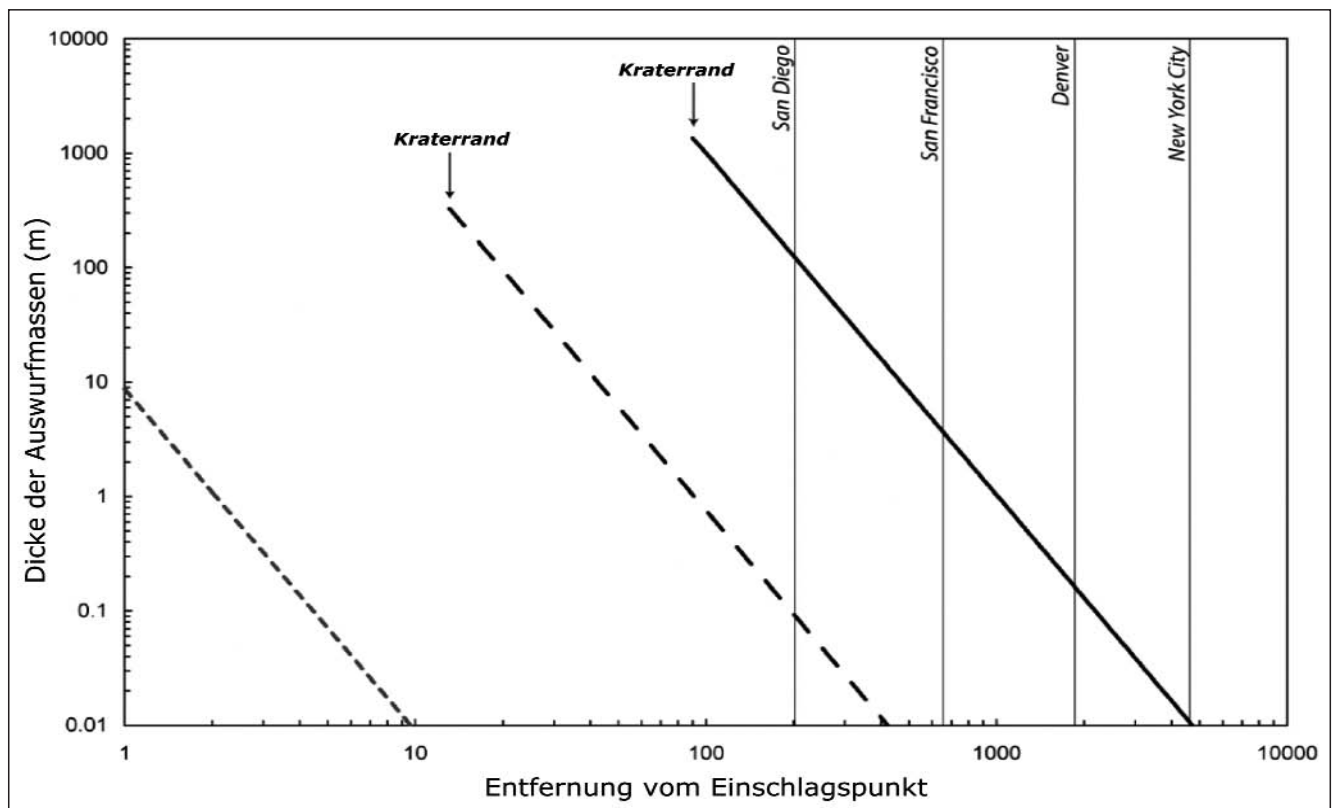


Abb. 11.
Beziehung zwischen der Dicke der Ejekta (Auswurfmassen) in Metern von hypothetischen Einschlägen in Los Angeles (USA) und der Entfernung vom Einschlagsort (in Kilometern). Die drei Linien zeigen die Effekte der Einschläge (mit 20 km/s) der folgenden Körper: 1) Eisenmeteorit mit 40 m Durchmesser (kurz gestrichelte Linie), 2) 1,75 km großer Asteroid (Steinmeteorit) (lang gestrichelte Linie), 3) 18 km großer Asteroid (durchgezogene Linie). Diagramm nach COLLINS et al. (2005).

dampfen und im Form von treibhausaktivem Wasserdampf (und anderer Gase) das Klima der Erde kurz- bis langfristig beeinflussen können (z.B. TOON et al., 1997). Im Meerwasser finden sich auch große Mengen an Chlor und Brom, und Evaporitgesteine unter flachem Meerwasser enthalten Sulfat. Bei raschem Ausregnen dieser Verbindungen kommt es zu saurem Regen. In gasförmigem Zustand sind diese Elemente entweder Treibhausgase oder führen zur Zerstörung der Ozonschicht der Erde, mit allen damit verbundenen negativen Auswirkungen (z.B. Erhöhung der Mutationsrate in Lebewesen durch mehrfach verstärkte Bestrahlungsrate mit ultraviolettem Licht der Sonne).

Die Konsequenzen dieses Effektes wurden von COCKELL & BLAUSTEIN (2000) beschrieben. Diese Autoren haben die potentiellen photobiologischen Effekte des Impakt-Prozesses quantifiziert und festgestellt, dass nach einem so genannten „Impaktwinter“ (der Begriff ist an den „nuklearen Winter“ angelehnt – dabei kommt es für mehrere Monate bis Jahre, je nach der durch einen Impakt ausgeworfenen Staubmenge in der Stratosphäre, zu einer drastischen Abkühlung der ganzen Erde und möglicherweise auch einem weitgehenden Erliegen der Photosynthese) ein „Ultravioletter Frühling“ kommt. Dabei erhöht sich die Einstrahlung der besonders schädlichen UVB-Strahlung (280–315 nm) um mindestens 100%. Zusätzlich wird es durch das Zersetzen von gelösten organischen Stoffen im Frischwasser durch den impaktinduzierten sauren Regen noch zu einer Erhöhung der UVB-Eindringtiefe in Flüssen und Seen kommen. Derartige Effekte führen zu einem sehr starken impaktinduzierten Stress in der Biosphäre.

5. Impakte und Massensterben in der Erdgeschichte

5.1. Allgemeine Bemerkungen

Nach den bisherigen Ausführungen ist klar, dass Impakte zu den Naturkatastrophen zählen, die, je nach Größe und damit verbundener Energie, lokale, regionale, kontinentale oder sogar globale Auswirkungen auf die Geo- und Biosphäre haben können. Die biologischen Konsequenzen solcher Ereignisse hängen stark von der Größe und damit der Energie des Einschlages ab. Auch ein kleines Ereignis – etwa von der Größe des „Meteor Crater“ in Arizona (Abb. 7–9) – kann lokal katastrophale Auswirkungen haben, die je nach Einschlagsort drastisch variieren können. Erfolgt ein solcher Einschlag im Wasser oder in einer dünn besiedelten Region, dann werden sich die Fatalitäten in Grenzen halten – die Opferzahlen beschränken sich möglicherweise auf einige tausend Menschen. Sollte ein solcher Einschlag aber in einem dicht bewohnten Ballungszentrum erfolgen, kann die Opferzahl bereits in die Millionen reichen. Trotzdem handelt es sich auch dann um eine regional begrenzte Katastrophe ohne weitreichende Auswirkungen auf die regionale oder globale Landwirtschaft, die Infrastruktur oder auf das Klima. Störungen verschiedener Art und Auswirkungen auf die Wirtschaft sind allerdings zu erwarten, wie sich ja bereits an Hand von Terroranschlägen mit wesentlich geringeren Opferzahlen gezeigt hat. Die sozialen Konsequenzen solcher katastrophalen Ereignisse sind bisher wenig untersucht.

Nun stellt sich aber die Frage, ob große (seltene) Einschläge Auswirkungen auf die biologische Entwicklung der Erde haben können. Bevor wir diese Frage untersuchen, müssen wir noch die damit zusammenhängende Problematik diskutieren, woran man denn nachweisen kann, ob für ein bestimmtes biologisches Ereignis ein Impakt verantwortlich war oder nicht. In diesem Zusammenhang hat man mit verschiedenen Problemen zu kämpfen. Erstens kennt man zwar etwa 170 Einschlagskrater, aber nur einige dieser Ereignisse waren groß genug, um weltweite Konsequenzen

gehabt zu haben – und nur von einigen wenigen kennt man distale Auswurfmaterialien, die eine weltweite oder zumindest weite Verbreitung haben. Chicxulub mit der Kreide-Tertiär-Grenze ist das am besten bekannte und untersuchte Beispiel. Auch im späten Eozän kennt man eine weltweite Ejektaschicht, die vermutlich von den Popigai und/oder Chesapeake-Bay-Kratern stammt. Bei dieser Lage sind aber keine direkten biologischen Konsequenzen nachzuweisen. Von einem der ältesten bekannten Krater – Sudbury – wurde mit ziemlicher Sicherheit Auswurf gefunden (ADDISON et al., 2005) und CHADWICK et al. (2001) vermuteten, dass eine ungewöhnliche Gesteinsschicht in Süd-Grönland entweder mit Sudbury oder sogar Vredefort zu korrelieren sei. Aber auf Grund des hohen Alters und der Einfachheit der damaligen Biosphäre sind keine biologischen Auswirkungen zu diesem frühen Stadium vor ca. 2 Milliarden Jahren nachweisbar. In anderen Fällen sind die Verbindungen zwischen Massensterben und Impakt-Ereignissen nicht genau nachweisbar, und zwar auf Grund entweder der Differenzen zwischen radiometrischer und biostratigraphischer Datierung oder auf Grund der anhaftenden Unsicherheiten physikalischer Altersbestimmungsmethoden oder weil die Signale einfach nicht eindeutig genug sind. Es mag zwar biologische Auswirkungen eines Einschlages gegeben haben, aber nach vielen Millionen oder hunderten Millionen Jahren sind diese eben nicht mehr genau nachweisbar. Wie bereits oben diskutiert, können Einschlagsereignisse sehr wohl lokal, regional oder sogar kontinental Verwüstungen anrichten, und für viele Todesfälle in der Pflanzen- und Tierwelt (oder sogar bei Menschen) verantwortlich sein, aber wenn auch nur einige wenige Exemplare einer Gattung überleben, ist der biologische Effekt eines Impaktereignisses paläontologisch und chemostratigraphisch nicht mehr nachweisbar.



Abb. 12.

Die „klassische“ Kreide/Tertiär-(K/T-)Grenze in Gubbio, Italien.

An diesem Ort wurde Ende der 1970er Jahre mit geochemischen Methoden die Entdeckung der Spuren eines Asteroideneinschlages am Ende der Kreidezeit gemacht. Links der Autor, rechts A. MONTANARI (Osservatorio Geologico di Coldigioco, Italien), der zusammen mit W. ALVAREZ grundlegende Forschungen an Gesteinen der Kreide-Tertiär-Grenze weltweit durchgeführt hat. Foto: C. KOEBERL, 2006.

5.2. Das Massensterben an der Kreide/Tertiär-Grenze

Die biologischen Konsequenzen großer Einschlagsereignisse können am besten am Beispiel des Chicxulub-Ereignisses am Ende der Kreidezeit vor 65 Millionen Jahren erläutert werden. Die Geschichte der Erforschung dieses Ereignisses ist interessant, da es sich – wie so oft – um eine zufällige Entdeckung gehandelt hat.

Ende der 1970er Jahre untersuchte der Geologe Walter ALVAREZ in Italien Sedimentgesteine aus der Kreidezeit und aus dem darauffolgenden Tertiär, um Aufschlüsse über die tektonische Entwicklung Italiens zu bekommen. Dabei interessierte ihn, wie lange die Ablage dieser Sedimente gedauert hat. Er bat seinen Vater, Physik-Nobelpreisträger Luis ALVAREZ, um Hilfe. ALVAREZ Senior schlug vor, die Häufigkeit des Elements Iridium (Ir) in den Gesteinen zu messen, denn dieses Element (wie auch andere Elemente der Platingruppe) ist in irdischen Gesteinen sehr selten, aber in extraterrestrischem Material etwa eine Mil-

lion Mal häufiger. Da auf die Erde ein steter und konstanter Regen an kosmischem Staub niedergeht (etwa 40.000 Tonnen pro Jahr), meinte ALVAREZ, aus der Menge an Iridium in den Gesteinen die Sedimentationsgeschwindigkeit ableiten zu können – viel Iridium bedeutete eine langsame Sedimentationsrate, wenig Iridium eine schnellere, da das Iridium dabei durch irdische Gesteine stark verdünnt wird.

Zufällig haben ALVAREZ und Kollegen dann aber auch eine dünne Schicht von Tonmineralen, die die paläontologische Kreide-Tertiärgrenze markiert, analysiert. Das Ende der Kreidezeit war den Paläontologen durch eines der größten Massensterben der Erdgeschichte seit langer Zeit wohl bekannt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen waren dann sehr überraschend – in den Gesteinen der Grenzschicht bei Gubbio, Italien (Abb. 12) fand man derart hohe Gehalte an Iridium (tausende Male höher als normal) – und dann auch der anderen Platinmetalle –, dass eine unmöglich langsame Sedimentationsrate resultieren würde. Die einzige Erklärung war, dass diese Tonschicht das Resultat eines gi-

gantischen Einschlags eines extraterrestrischen Körpers war.

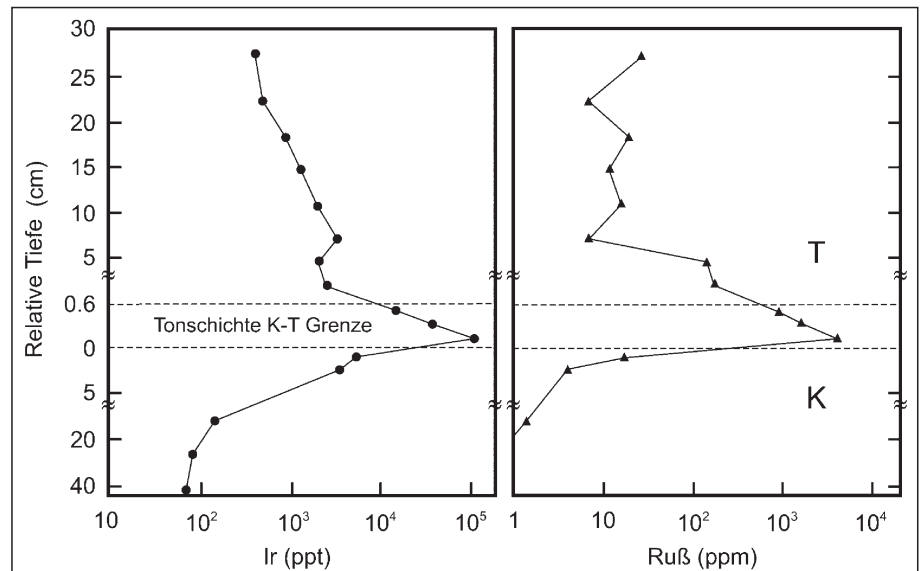
Die daraus folgende Publikation von ALVAREZ et al. (1980) hat Wissenschaftsgeschichte geschrieben, denn zum ersten Mal seit der Mitte des 19. Jahrhunderts wurden Katastrophen als wichtige Prozesse in der Geologie vorgeschlagen. Anfangs gab es viel Widerstand aus den Kreisen der über extraterrestrische Ereignisse nicht informierten Geologen und Paläontologen. Nach und nach wurden allerdings weitere Indizien dafür gefunden, dass tatsächlich ein Riesen-Impakt stattgefunden haben muss, vor allem die Entdeckung von geschockten Mineralen in der Grenzschicht (BOHOR et al., 1984, 1987). Ähnliche Tonschichten wurden an Kreide-/Tertiär-Grenzen rund um die Erde gefunden (Abb. 13) und die hohen Konzentrationen extraterrestrischer Metalle in diesen Gesteinen wurden an vielen anderen Orten der Welt bestätigt (Abb. 14).

Ein unerwartetes Ergebnis war die Auffindung einer relativ dicken Russchicht, die in den Gesteinen der K/T-Grenze auf der ganzen Welt gefunden wurde (Abb. 14). Aber nicht nur der sehr hohe Kohlenstoffgehalt, sondern auch das



Abb. 13.
Die Kreide/Tertiär-Grenze.
a) Frontale (beim Monte San Vicino), Marken-Region, Italien, mit H.P. SCHÖNLAUB. Foto C. KOEBERL, Juli 2001.
b) Elendgraben im Gosaubecken, Salzburg, Österreich. Das graue Band zwischen den Buchstaben K und T (auch markiert mit der Hammerspitze) ist die Tonschicht, die die K/T-Grenze praktisch weltweit charakterisiert. Foto: C. KOEBERL, 2002.

Abb. 14.
Iridium- und Russkonzentrationen in den Gesteinen der Kreide/Tertiär-Grenze, am Beispiel einer Lokalität in Neuseeland (siehe z.B. KOEBERL [1996] und KOEBERL & MARTINEZ-RUIZ [2003]). Die relative Tiefe in Zentimetern ist gemessen ab der K/T-Grenze. Die Russmenge (Daten in ppm = parts per million oder 10^{-6} g/g) erreicht etwa ein halbes Gewichtsprozent, während die Iridiumkonzentration (Daten in ppt = parts per trillion oder 10^{-12} g/g) bis fast 100 ppb erreicht, bis zu 20% einer typischen meteoritischen Konzentration.



Verhältnis der Kohlenstoffisotope ^{12}C und ^{13}C zueinander war ungewöhnlich. Organischen Geochemikern gelang die Isolierung von Spurenbestandteilen in der Russ-schicht, und man konnte aus der Russmenge und der chemischen und Isotopen-Zusammensetzung nachweisen, dass gigantische Waldbrände und auch verbrannte Kohlenwasserstoffe für die Russ-schicht verantwortlich waren (siehe GILMOUR, 1998; GILMOUR et al., 1990; WOLBACH et al., 1985, 1990; BELCHER et al., 2005). Die Russmenge zeigt, dass damals mehr Wälder (oder äquivalente Kohlenstoffmengen in Form von Kohlenwasserstoffen) gebrannt haben, als heutzutage auf der ganzen Erde vorhanden sind. Dies passt gut, denn am Ende der Kreidezeit war das Klima deutlich wärmer als heute und daher gab es auch eine wesentlich dichtere Vegetation als heute. Berechnungen zeigten, dass die glühenden Impaktgesteine bei einem Rieseneinschlag fast um die gesamte Welt verteilt auf die Erde stürzten und dabei Waldbrände auslösen konnten.

Im Laufe der 1980er Jahre wurden dann noch viele Anzeichen dafür gefunden, dass es einen Einschlag zu dieser Zeit gegeben hatte (siehe z.B. Arbeiten in SHARPTON & WARD [1990]; siehe auch KOEBERL [1996]). Was fehlte, war der zugehörige Krater. Die genaue Entdeckungsgeschichte kann hier aus Platzgründen nicht erläutert werden, aber Anfang der 1990er Jahre war es endlich soweit und der Chicxulub-Krater (Abb. 15) wurde unter einer jüngeren, ihn versteckenden Gesteinsschicht auf der mexikanischen Halbinsel Yucatán gefunden (z.B. HILDEBRAND et al., 1991). Der Krater, von dem an der Oberfläche so gut wie nichts zu sehen ist, wurde mit geophysikalischen Methoden gefunden und vermessen; sein Durchmesser beträgt 200 km. Untersuchungen an Bohrkernen zeigten, dass die Schmelzgesteine genau das richtige Alter von 65 Millionen Jahre haben, und die geochemische Zusammensetzung der Kratergesteine ist auch gut vergleichbar mit der Zusammensetzung der Auswurfmaterialien in den Gesteinen der K/T-Grenze rund um die Welt.

Für die Diskussion des Zusammenhanges zwischen Einschlägen und Massensterben ist es aber wesentlich interessanter, welche Prozesse beim Einschlag eines Körpers mit 10 Kilometern Durchmesser auf der Erde ablaufen. Würde der Asteroid, der damals vor 65 Millionen Jahren einschlug, auf der Erdoberfläche liegen, wäre er deutlich höher als der Mt. Everest, der höchste Berg der Erde. Nun muss man bedenken, dass dieser Körper mit einer Geschwindigkeit von vielleicht 20, 30, oder 40 Kilometern pro Sekunde auf die Erde aufgeschlagen ist. Bei dieser Geschwindigkeit dringt der Körper in nur ein oder zwei Sekunden durch den Großteil der Erdatmosphäre. Dabei wird die Luft stark aufgeheizt und für kurze Zeit erreicht der Bolide die Helligkeit und Wärmestrahlung eines Vielfachen der

Sonne. Nachdem der Körper auf den Boden getroffen ist, beginnt der Vorgang der Kraterbildung wie bereits oben beschrieben. Nach etwa einer Sekunde war der Körper fast vollständig verdampft. Kurze Zeit später hatte der Krater seine größte Tiefe erreicht, von etwa 40 Kilometern. Danach begann sich der Kraterboden wieder zu heben, um den Zentralberg zu bilden, während der Kraterand abrutschte.

Während aber die Schockwelle durch den Boden lief, passierten verschiedene Dinge: der Ort, an dem der Kleinplanet auftraf, war mit einigen hundert Metern Meerwasser und einer kilometerdicken Schicht von karbonat- und sulfatreichem Gestein (Kalkstein/Dolomit und Anhydrit) bedeckt. Unter Schockeinfluss setzen diese Gesteine eine große Menge an Kohlendioxid und Schwefeldi- und -trioxid frei – viele tausend Kubikkilometer davon (z.B. CHEN et al., 1994; GUPTA et al., 2001; SIGURDSSON et al., 1992; YANG & AHRENS, 1998). Mittlerweile laufen aber Erdbebenwellen mit einer Stärke von etwa 11 bis 12 auf der Richter-Skala vom Einschlagsort weg. Da der Einschlag in flachem Meerwasser erfolgte, bilden sich Tsunamis, die in Küstennähe viele hundert Meter Höhe erreichen können. Glühende Gesteinsbrocken, die beim Einschlag ausgeworfen wurden, fallen nun wieder auf die Erde zurück – noch Zehntausende von Kilometern vom Einschlagsort entfernt – und setzen die Wälder in Brand. Die in die Atmosphäre gelangten Schwefel-Gase regneten teilweise in Form von saurem Regen wieder aus (z.B. MARUOKA & KOEBERL, 2003; LYONS & AHRENS, 2003). Auch die Ozonschicht wurde zerstört.

Nachdem die Erdbebenwellen um die Welt gelaufen und die Waldbrände verlöscht waren, war das Schlimmste noch nicht vorbei. Viele tausend Kubikkilometer Staub waren in die Stratosphäre geschleudert worden, und diese Staubbmassen, die erst im Lauf von einigen Jahren wieder langsam zur Erde zurückfielen, verhinderten, dass das Sonnenlicht mit seiner vollen Intensität auf die Erde gelangte. Ein Temperatursturz war die Folge, die Photosynthese kam zum Erliegen, und die durch die Brände sowieso schon stark geschädigte Nahrungskette brach zusammen. Die Biosphäre der Erde war stark gestört. Nun aber kam es – nach dem Absinken des Staubes auf die Erde – zum umgekehrten Effekt. Die enormen Kohlendioxidmengen, die durch die Schock-Entgasung in die Atmosphäre gelangten, riefen nun – in viel stärkerem Ausmaß als heutzutage – eine Art Treibhauseffekt und damit eine starke globale Erwärmung hervor (TOON et al., 1997). Dieser Effekt dauerte viele tausend Jahre, wahrscheinlich zehntausende Jahre. Am Ende dieser Ereignisse waren nicht

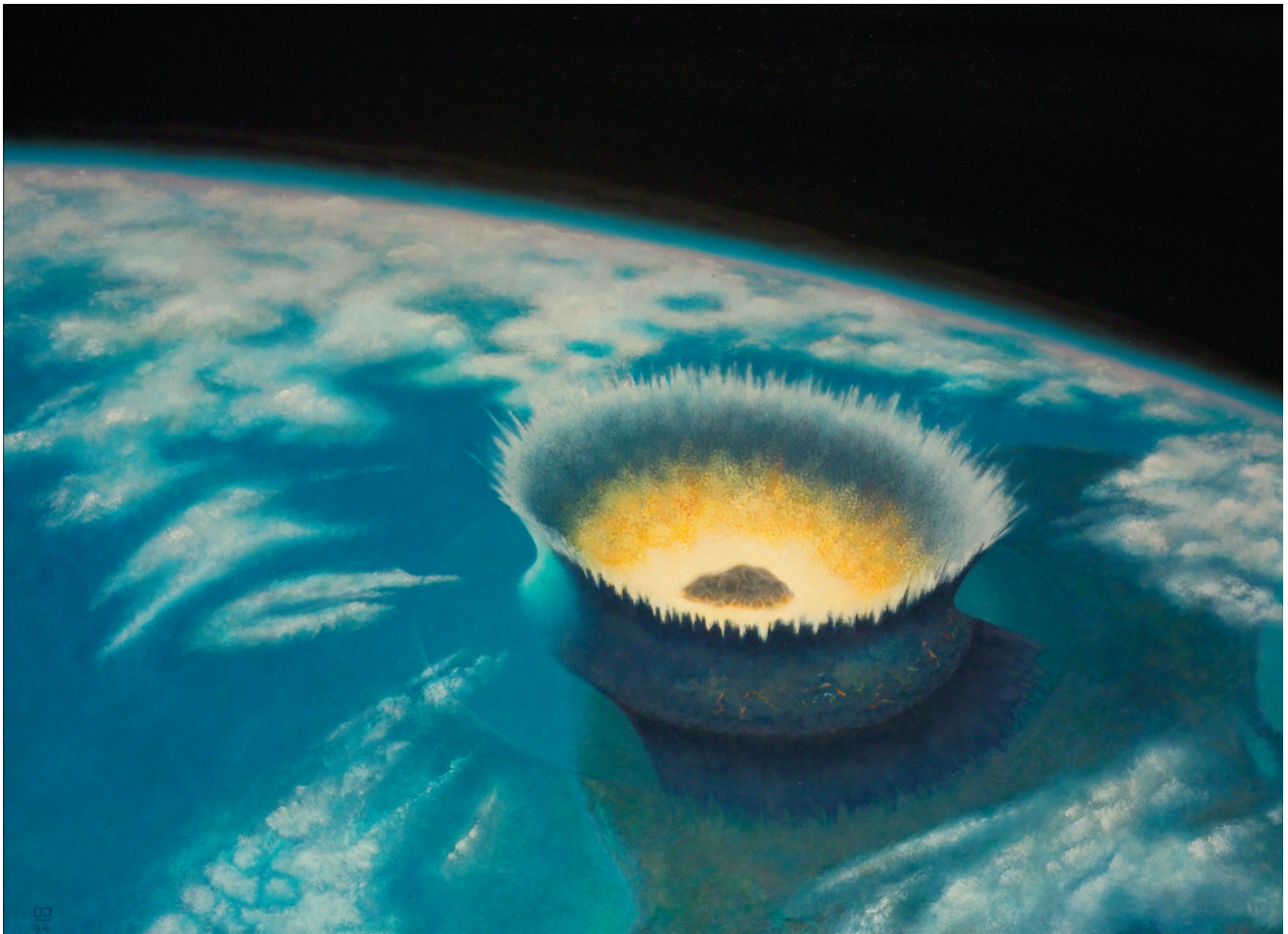


Abb. 15.
Rekonstruktion des Chicxulub-Einschlages im flachen Meerwasser, das damals einen Teil der heutigen Halbinsel Yucatan (Mexiko) bedeckte. Einige Sekunden nach dem Einschlag beginnt gerade die Auswurfphase, und Material aus dem noch wachsenden Krater wird herausgeworfen.
Ölbild von D. JALUFKA, Wien, 1994/2005.

nur die Saurier oder die Ammoniten unwiederbringlich verschwunden, sondern auch viele andere Tier- und Pflanzenarten. Etwa die Hälfte aller damals lebenden Tier- und Pflanzenarten starben aus – und die Umweltbedingungen für die Überlebenden waren ebenfalls denkbar schlecht. Eine Zusammenfassung der Effekte eines solchen Einschlages ist in Tabelle 2 gegeben.

Die Staubmassen, die bei dem Chicxulub-Impakt bis in die Stratosphäre gelangten, hatten eine Verweilzeit – je nach der Teilchengröße – in der Atmosphäre von wenigen Stunden bis zu etwa 1–2 Jahren. Die Zusammensetzung des Staubes entsprach (siehe auch oben) einer horizontalen und vertikalen Mischung der Gesteine am Impaktort (siehe oben). Dazu kommt eine Beimischung von bis zu einigen wenigen Prozent meteoritischer Materie (angezeigt durch den hohen Ir-Gehalt der Auswurfsmassen).

Diese Auswirkungen und der Zusammenhang zwischen Chicxulub und dem Massensterben an der K/T-Grenze wurden sowohl aus geochemischen, petrografischen, und mikropaläontologischen Beobachtungen, Impaktexperimenten wie auch aus numerischen Simulationsberechnungen abgeleitet und sind ziemlich gut etabliert und unter Geowissenschaftlern auch mehrheitlich akzeptiert (z.B. SMIT, 1999), obwohl es nach wie vor einige wenige – dafür aber umso vokalere – Proponenten einer Hypothese gibt, in der Chicxulub einige hunderttausend Jahre älter als der eigentliche K/T-Impakt sei (z.B. KELLER et al., 2004). Keller und Kollegen argumentieren zum Beispiel damit, dass in der Kraterfüllung des Chicxulub-Kraters über den Impaktbrekzien (Sueviten) noch kretazische Gesteine vorhanden

seien, bevor tertiäre Schichten nachweisbar sind. Abgesehen von Problemen bei der Bestimmung der vorgeblich kretazischen Fossilien ist es nur logisch, dass bei einem so großen Krater im flachen Meerwasser die Tsunamiwellen Umgebungsmaterial (klarerweise aus der Kreide) in den Krater zurückspülen und auch ein Kraterstrand aus Ejekta die Sedimentation verlangsamt und daher durchaus eine ruhigere Sedimentationsumgebung vorhanden war. Außerdem ignoriert diese Interpretation die geochemischen Indi-

Tabelle 2.
Effekte und deren Zeitskala nach einem Einschlag in der Größenordnung des Kreide/Tertiär-Grenze-Einschlages (ca. 10 km großer Asteroid in flaches Meerwasser).

Umweltfaktor	Zeitskala
Plasma des glühenden Feuerballs	Minuten
Hitze von glühenden Auswurfmassen	Minuten – Stunden
„Hypercanes“ –	
Winde mit mehr als Hurrikan-Stärke	Stunden
Tsunamis und Erdbeben	Stunden
Impaktinduzierte Brände	Wochen bis Monate
Staubmassen um den Globus –	Monate bis Jahre
Dunkelheit und Kälte	
Saurer Regen (Salzsäure, Salpetersäure ...)	Monate bis Jahre
Aerosole in der Stratosphäre (Abkühlung)	Jahre bis Jahrzehnte
Vernichtung der Ozonschicht (Mutationen)	Jahrzehnte bis Jahrhunderte
Glashauseffekt –	Jahrzehnte bis Jahrhunderte
atmosphär. Wasser (Erwärmung)	
Giftstoffe und Mutagene	Jahrhunderte
Glashauseffekt durch Kohlendioxid	Jahrtausende
(Erwärmung)	
Störung des Klimas	Jahrmillionen

zien, die ja Anfang der 1990er Jahre zur Identifikation des Chicxulub-Kraters – durch Vergleich der geochemischen Charakteristika der Auswurfmaterialien an der K/T-Grenze und jener der Kraterbrekzien und Schmelzen – geführt haben (z.B. BLUM & CHAMBERLAIN, 1992; BLUM ET AL., 1993; KAMO & KROGH, 1995). Die eher einseitige Interpretation von KELLER und Kollegen wird ausführlich in der detaillierten Arbeit von SCHULTE et al. (2006) diskutiert und widerlegt.

Die Daten belegen also relativ deutlich, dass am Ende der Kreidezeit der größte bekannte Impakt erfolgte, der innerhalb der letzten mehreren hundert Millionen Jahre auf der Erde nachweisbar ist. Dieser Einschlag hat ein Zielgestein getroffen, das reich an Carbonat- und Evaporitgestein war. Dadurch kam es zu einem starken Eintrag von großen Mengen klimaaktiver Gase in die Atmosphäre, die zusammen mit den enormen Staubmengen zu kurz- und langfristigen drastischen Änderungen der Umweltbedingungen führten – zusätzlich zu den direkt mit dem Einschlag verbundenen katastrophalen Auswirkungen wie Feuerball, Brände, Erdbeben, Tsunami, Ejekta-Ablagerungen, saurer Regen, etc. Die Summe dieser Umwelteinflüsse, zusammen mit einigen der Auswirkungen des zu dieser Zeit möglicherweise noch aktiven Dekkan-Vulkanismus (SELF et al., 2006), sind für ein Massensterben mehr als ausreichend.

5.3. Das Massensterben an der Perm/Trias-Grenze

Nachdem es während der 1980er Jahre, und vor allem dann im Laufe der 1990er Jahre (nach der Entdeckung der Chicxulub-Impaktstruktur), klar wurde, dass ein Zusammenhang zwischen dem Chicxulub-Impaktereignis und dem Massensterben an der K/T-Grenze sehr wahrscheinlich ist, begann sofort die Suche nach weiteren/ähnlichen Korrelationen zwischen Einschlägen und Massensterben. Im Rahmen der sogenannten „Snowbird“-Tagungen – von denen die ersten beiden in den Jahren 1981 und 1988 in Snowbird, Utah, abgehalten wurden, um die ALVAREZ-Hypothese zu evaluieren – wurden dann 1994 in Houston und 2000 in Wien (Abb. 16) mögliche Impaktursachen für weitere Massensterben diskutiert. Dazu boten sich dann natürlich vor allem die anderen „großen“ Massensterben,



Abb. 16.

Als vierte der sogenannten „Snowbird-Tagungen“ wurde im Sommer des Jahres 2000 in Wien eine Konferenz zum Thema „Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond“ abgehalten.

Das Foto zeigt (von links) den Direktor der Geologischen Bundesanstalt in Wien, Hans Peter SCHÖNLAUB (u.a. Erforschung der Perm-Trias-Grenze), im Gespräch mit Ross TAYLOR (Australian National University; u.a. Erforschung der frühesten Impakte der Erdgeschichte) und Walter ALVAREZ (University of California, Berkeley, USA; Erforschung des K/T-Impaktes).

etwa an der Perm/Trias-Grenze vor 251 Millionen Jahren, oder der Trias/Jura-Grenze vor 200 Millionen Jahren, an. Einen guten Überblick geben RAMPINO & HAGGERTY (1996).

Im Gegensatz zu den Ereignissen an der Kreide-Tertiär-Grenze, wo es ganz deutliche Hinweise auf einen großen Impakt gibt, ist die Situation für die Perm/Trias-Grenze weit weniger klar. Die Suche nach Hinweisen auf einen großen Impakt, der mit der P/Tr-Grenze zeitgleich wäre, hat bisher wenige bis keine, und eher widersprüchliche, Resultate gebracht. Da an der P/Tr-Grenze mehr Arten ausgestorben sind als an der K/T-Grenze (und zu dieser Zeit sind etwa die Hälfte aller damals lebenden Tier- und Pflanzenarten verschwunden), müsste ein damaliger Impakt noch größer gewesen sein als jener an der K/T-Grenze. Dies ist zwar nicht unmöglich, aber nach der bekannten Häufigkeitsverteilung der Einschläge (Abb. 6) nicht gerade wahrscheinlich – wie in dieser Abbildung gezeigt, wird rein statistisch ein Einschlag dieser Größenordnung nur etwa alle 0,5–1 Milliarde Jahre einmal erwartet. Wichtiger als ein statistisches Argument ist allerdings das Problem, dass keine eindeutigen Anzeichen eines Einschlages vorhanden sind.

Eine der am besten untersuchten Lokalitäten der P/Tr-Grenze ist in Österreich in den Karnischen Alpen an der Grenze zwischen Kärnten und Norditalien, am Gartnerkofel. Die sogenannte Reppwand zeigt einen spektakulären Aufschluss, der allerdings schwer zugänglich ist (Abb. 17). Durch die Anstrengungen von H.P. SCHÖNLAUB wurde von nahe der Spitze des Gartnerkofels im Jahr 1986 mit bedeutendem technischem Aufwand ein 331 m langer Bohrkern gezogen, der die P/Tr-Grenze beinhaltet (Abb. 18). Zum Zeitpunkt der Ablagerung der Grenzgesteine war die Gegend der heutigen Karnischen Alpen unter Wasser; es handelte sich dabei um eine marine Grenze. In Abb. 19 ist die Lokalität in einer paleogeographischen Rekonstruktion gezeigt. Die Ergebnisse der Untersuchungen des Bohrkerns sind in kondensierter Form in HOLSER et al. (1989) und ausführlich in den Arbeiten in HOLSER & SCHÖNLAUB (1991) dargestellt. So zeigte sich zum Beispiel eine Iridium-Anomalie von einigen hundert ppt an der P/Tr-Grenze (sowie in einer anderen Tiefe). Dies könnte als Hinweis auf ein Impaktereignis verstanden werden – ähnliche Anomalien wurden auch an anderen Lokalitäten auf der Welt gefunden (siehe Zusammenfassung in RAMPINO & HAGGERTY, 1996). Auch Berichte über einige mögliche geschockte Quarze an P/Tr-Grenzen in Australien und der Antarktis (RETALLACK et al., 1998), Schwefelisotope, die von einem großen Einschlag herkommen sollten (KAIHO et al., 2001), mögliche extraterrestrische Fullerene (POREDA & BECKER, 2003) und sogar ein riesiger Krater vor der Westküste Australiens (BECKER et al., 2004) wurden publiziert. Gibt es also doch Hinweise auf ein großes Einschlagereignis vor 251 Millionen Jahren?

Leider verschwinden bei genauerer Überprüfung der Beobachtungen die sogenannten „Beweise“ sehr rasch. Die Iridiumanomalien gibt es sehr wohl – nur sind die absoluten Mengen an Iridium um mehrere Größenordnungen geringer als jene an der K/T-Grenze (Abb. 20). Die angeblichen geschockten Quarze sind höchst selten. Nicht gerade, was man von einem Einschlag, der größer gewesen sein soll als jener bei Chicxulub, erwarten würde. Im Detail verpuffen dann alle Indizien. Die Interelementverhältnisse der Platinmetalle in den P/Tr-Schichten, die erhöhte Iridiumgehalte haben, sind nicht meteoritisch, sondern typisch irdisch (diagenetisch) (KOEBERL et al., 2004), und die Signatur der Osmiumisotope – die an der K/T-Grenze wunderbare meteoritische Werte ergeben – sind an der P/Tr-Grenze rein irdisch-krustal (KOEBERL et al., 2004). Fullerene und die damit verbundenen extraterrestrischen Helium-3-Anomalien konnten nicht bestätigt werden (FARLEY & MUKHOPADHYAY, 2001; FARLEY et al., 2005). Die Schwefelisotopen-Hypothese ist geochemisch, himmelsmecha-



Abb. 17.
Die Reppwand am Gartnerkofel (Karnische Alpen, Kärnten).
a) Die deutliche Stufe in der Bildmitte markiert die Perm/Trias Grenze, die auch im Bohrkern Gartnerkofel-1 (HOLSER & SCHÖNLAUB, 1991) aufgeschlossen ist.
Foto: C. KOEBERL, 2001.
b) H.P. SCHÖNLAUB beim Abstieg zur Perm/Trias-Grenze an der Reppwand, Karnische Alpen.
Foto: C. KOEBERL, 2001.

nisch, und impact-physikalisch unmöglich (KOEBERL et al., 2002), und genaue transmissions-elektronenmikroskopische Nachuntersuchungen der angeblich geschockten

Quarze haben nachgewiesen, dass es sich um rein tektonische Deformationen handelt – keine Spur von Schock (LANGENHORST et al., 2005). Der angebliche Krater vor der Küste von Westaustralien ist besonders problematisch – die Altersbestimmung ist nicht nachvollziehbar (RENNE et al., 2004), die Gesteine sind vulkanisch, und die detaillierten geophysikalischen Daten zeigen kein Anzeichen einer kraterähnlichen Struktur (MÜLLER et al., 2005).

Im Gegensatz zur Situation an der K/T-Grenze, wo die Eruption der Deccan-Flutbasalte, die in der Tat wenigstens 1–2 Millionen Jahre vor dem Chicxulub Impactereignis



Abb. 18.
Ansicht der Forschungsbohrung durch die Perm/Trias-Grenze am Gartnerkofel im ersten Schnee am 24. Oktober 1986.
Foto: H.P. SCHÖNLAUB.

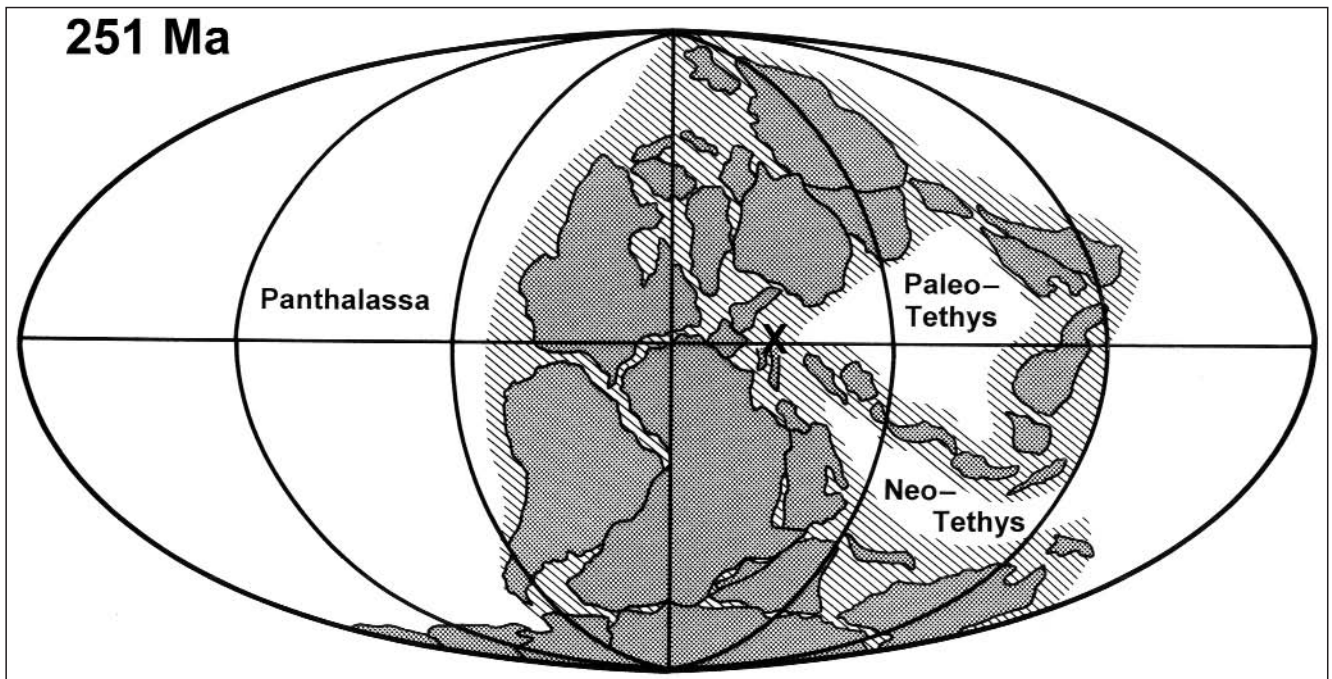


Abb. 19.
Paleogeographische Rekonstruktion der Position der Karnischen Alpen (X = Gartnerkofel) zur Zeit der Perm-Trias-Grenze, vor etwa 251 Millionen Jahren.
Siehe KOEBERL et al. (2004) und www.scotese.com.

begann, eine eher untergeordnete Rolle gespielt zu haben scheint, dürfte die Eruption der viel voluminöseren Sibirischen Flutbasalte katastrophale globale Auswirkungen ausgelöst haben (siehe z.B. MARUOKA et al. [2003] und

GRARD et al. [2005]). Allerdings ist der exakte Zusammenhang zwischen dem Flutbasalt-Vulkanismus und dem Massensterben nicht geklärt, und einige geochemische Daten bleiben vorerst ungeklärt. Eines ist allerdings sicher:

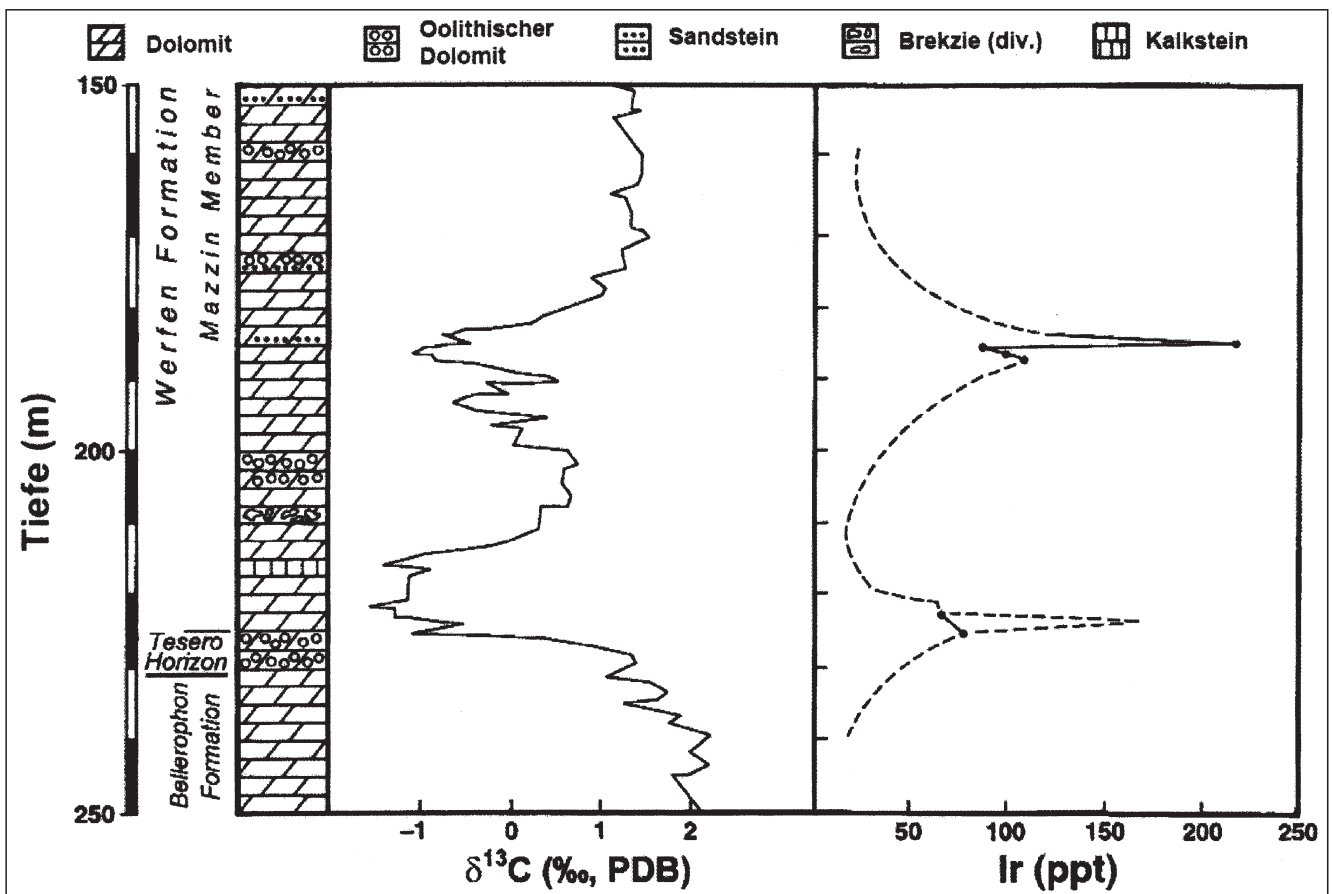


Abb. 20.
Iridium-Anomalien (rechts) und Kohlenstoffisotopenverhältnisse (links) an der Perm/Trias-Grenze am Gartnerkofel, Österreich.
Die Untersuchungen von KOEBERL et al. (2004) haben gezeigt, dass es sich hierbei um rein terrestrische Signaturen handelt und es keine Anzeichen eines Impaktereignisses gibt.

Anzeichen für einen gigantischen Impakt gibt es an der Perm/Trias-Grenze nicht; weitere analytische Arbeiten sind aber unbedingt erforderlich.

5.4. Andere biologische und geologische Zäsuren

Der Zusammenhang zwischen anderen Massensterben in der Erdgeschichte bzw. anderen drastischen Einschnitten in der biologischen und geologischen Vergangenheit der Erde und Impaktereignissen ist ebenfalls nicht besonders gut (bis gar nicht) dokumentiert. Das Massensterben am Übergang vom Jura zur Kreide vor 145 Millionen Jahren ist von kleinerem Ausmaß als jene an den K/T- oder P/Tr-Grenzen und es ist nicht sicher, ob die paläontologischen Signaturen synchron im borealen und australen Bereich sind. Es gibt drei Meteoritenkrater, deren Alter mit jenem der J/K-Grenze innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmen, und zwar der 25-km-Durchmesser messende Gosses-Bluff-Krater in Australien (143 Ma.), der 40 km große Mjølnir-Krater in der Barent-See nördlich von Norwegen (143 Ma.) und die ca. 70 km große Morokweng-Impaktstruktur in Südafrika (145 Ma.). Letztere Impaktstruktur hat zwar das „richtige“ Alter (KOEBERL et al., 1997), ist aber mit ziemlicher Sicherheit nicht groß genug (REIMOLD et al., 1999), um globale Auswirkungen gehabt zu haben. Es ist natürlich möglich, dass all diese – und vielleicht noch andere, bisher nicht entdeckte – Einschlagseignisse zu einer Umweltveränderung beigetragen haben; dies klar nachzuweisen ist allerdings bisher nicht möglich gewesen.

Die Trias/Jura-Grenze (ca. 200 Ma.) markiert eines der 5 großen Massensterben und auch hier ist eine Verbindung mit einem Impaktereignis nicht klar nachzuweisen. Es gibt zwar Hinweise auf geschockte Quarze an Tr/J-Grenzen sowohl in Italien wie in Österreich, aber diese Untersuchungen konnten bisher nicht bestätigt werden. An verschiedenen Lokalitäten in den USA konnten OLSEN et al. (2002) eine geringe Iridium-Anomalie nachweisen; diese Messungen wurden an anderen Lokalitäten von TANNER & KYTE (2005) bestätigt. Allerdings ist nicht klar, ob es sich um ein extraterrestrisches oder terrestrisch-diagenetisches Signal handelt; diese Untersuchungen sind noch im Gange. Sollte es eine extraterrestrische Signatur sein, fehlt bisher der dazugehörige Einschlagskrater. Es gibt zwar einen großen Krater (Manicouagan, 100 km Durchmesser, in Kanada), aber der ist mit 214 Millionen Jahren zu alt, und steht vermutlich mit einer Ejektalage, die in England in Gesteinen der späten Trias gefunden wurde (WALKDEN et al., 2002), in Verbindung. Mit anderen Worten, für die Tr/J-Grenze ist ein Impaktereignis nicht unwahrscheinlich, aber die Daten-Lage ist unklar, und heute kann noch keine eindeutige Aussage über einen möglichen Zusammenhang gemacht werden.

Eine andere wichtige Zäsur ist die Eozän/Oligozän-Grenze vor etwas über 33 Millionen Jahren. Messungen von extraterrestrischem ^3H zeigen hier eine erhöhte Akkretionsrate extraterrestrischen Materials (FARLEY et al., 1998; MUKHOPADHYAY et al., 2001) und es gibt auch einige recht große Einschlagskrater – wie den 100 km großen Popigai-Krater in Sibirien oder den 85 km großen Chesapeake-Bay-Krater an der Ostküste der USA (POAG et al., 2004) – aber beide Krater und die mit ihnen verbundenen globalen Ejekta-Horizonte sind etwas älter als die E/O-Grenze, mit ca. 35 Millionen Jahren. Zu diesem Zeitpunkt sind zwar Auswirkungen auf das Klima nachweisbar (BODISELITSCH et al., 2004), aber diese waren nicht besonders stark und scheinen kein Massensterben verursacht zu haben. Auch zu keinen anderen Zeiten in der Erdgeschichte ist es bisher gelungen, eindeutige Hinweise für einen Zusammenhang zwischen Impakten und Massensterben zu finden.

6. Ausblick

Die Untersuchungen der letzten Jahre – vor allem nach dem Anstoß, den die Entdeckung des Impaktes am Ende der Kreidezeit gegeben hat – haben gezeigt, dass Impaktereignisse in der Geschichte der Erde wesentlich wichtiger waren als von Geologen noch vor wenigen Jahren angenommen. Es scheint zwar, als ob wirklich katastrophale Auswirkungen wie Massensterben nur selten von Impaktereignissen ausgelöst werden, aber die Auswirkungen der vielen Einschläge auf die geologische Entwicklung des Planeten sind nicht von der Hand zu weisen. Der Grund für die langsame Akzeptanz der Ansicht, dass die Erde kosmischen Ereignissen genauso ausgesetzt ist wie etwa der Mond, hatte verschiedene Gründe. Zuerst einmal war die Erforschung von Einschlagskratern bis in die 1980er Jahre bestenfalls ein Randgebiet zwischen Astronomie und den Geowissenschaften (und auch heute noch ist es, auf Grund der Interdisziplinarität des Gebietes, schwierig, Geldmittel für die Untersuchung von Impaktstrukturen zu bekommen). Damit verbunden war, dass die meisten Geowissenschaftler keine Expertise auf diesem Gebiet (vor allem auch bezüglich der Schockmetamorphose und Schockpetrographie) haben und die Effekte daher nicht erkennen konnten. Weiter war in den Geowissenschaften – zurückgehend auf HUTTON und LYELL, die die moderne Geologie vor mehr als 150 Jahren begründeten – die Ansicht des Gradualismus vorherrschend, dass nämlich geologische Prozesse langsam und über lange Zeiträume ablaufen. Katastrophismus wurde nicht als wichtig angesehen. Die Biosphäre der Erde entwickelte sich – in dieser vorherrschenden Ansicht – vornehmlich auf Grund interner (langsam ablaufender) irdischer Prozesse, und für extraterrestrischen Einfluss war schon gar kein Platz. Auch die von den Paläontologen dokumentierten Massensterben in der Erdgeschichte liefen über längere Zeiträume hinweg ab und nur die Kompression der geologischen Stratigraphie gab den Eindruck von Kurzeffekten. Langfristige Klimaänderung durch Vulkaneruptionen oder Meeresspiegeländerungen wurden als die Hauptgründe angesehen. Erst als unwiderlegbare Beweise für den gigantischen Einschlag am Ende der Kreidezeit als Ursache des K/T-Massensterbens gefunden wurden, hat sich – beginnend vor etwa 15 Jahren – das Bild gewandelt.

Impakte gab es aber nicht nur in der geologischen Vergangenheit, und vielleicht irgendwann in einer fernen, unsere Zivilisation nicht betreffenden Zukunft, sondern solche Ereignisse können jederzeit eintreten. Wichtig für diese Rezeption war der Einschlag des Kometen Shoemaker-Levy 9 im Juli 1994 auf dem Planeten Jupiter (siehe SPENCER & MITTON, 1995). Der Kometenkern war in der Nähe des Jupiter in mehrere Stücke zerbrochen. Dies war ein kosmisches Spektakel ersten Ranges. Kometenkern-Bruchstücke sind mit einer Geschwindigkeit von etwa 60 Kilometer pro Sekunde in die dichte Gasatmosphäre des Jupiters eingetaucht (Jupiter hat keine feste Oberfläche, nur eine sehr dichte Atmosphäre); diese Gasatmosphäre bewirkt, dass es keinen Aufschlag auf eine feste Oberfläche gibt wie auf der Erde oder dem Mond, sondern eine Explosion in der Atmosphäre. Beobachtungen des ersten Einschlagsflecks zeigten, dass dieser bald 10 000 Kilometer Durchmesser erreicht hatte – sogar für den Riesenplaneten Jupiter mit seinen 143 000 Kilometern Äquatordurchmesser (etwa zwölfmal so groß wie die Erde) war das ein gewaltiger Fleck. Von den Kometenfragmenten waren 21 groß genug, um sichtbare Einschläge (beziehungsweise Explosionen in der Jupiteratmosphäre) hervorzurufen. Nach den Einschlägen wurde klar, dass die Ausdehnung der Impaktwolken alle Vorhersagen und Vorausberechnungen weit überschritten hatte. Die Kometenfragmente waren von ca. 100 Metern bis knapp 1 km groß. Es

ist beeindruckend, welche Effekte der Einschlag von Objekten mit einigen hundert Metern Durchmesser hatte. Dieses Ereignis hat eine weitreichende Wirkung nicht nur auf Astronomen und Geologen (die nunmehr die Realität von Impakten und ihren Effekten kaum mehr anzweifeln), sondern auch auf die Bevölkerung im Allgemeinen. Es wurde klar, dass Einschläge kosmischer Körper tatsächlich passieren können und nicht nur von akademischem Interesse sind.

Die Literatur zur Impaktforschung hat in jüngerer Zeit an Umfang zugenommen. Dies betrifft vor allem Artikel in Fachzeitschriften und populäre Bücher (vornehmlich in englischer Sprache; es wird aber auf ein deutschsprachiges Buch des Autors hingewiesen: KOEBERL [1998a]). Es gibt bisher nur drei Fachbücher, die verschiedene Themen der Impaktforschung behandeln: MELOSH (1989), FRENCH (1998), UND MONTANARI & KOEBERL (2000). Der interessierte Leser sei für weiterreichende Literatur auf diese Bücher verwiesen. Die Gefahr von Impaktereignissen und deren Einfluss auf die Geo- und Biosphäre wird nunmehr intensiver denn je diskutiert (siehe z.B. GEHRELS, 1994; CHAPMAN & MORRISON, 1994; LEWIS, 1996; TOON et al., 1997; ATKINSON et al., 2000; COLLINS et al., 2005).

Derart apokalyptische Vorgänge wie am Ende der Kreidezeit, die zu einem der größten Massensterben in der Erdgeschichte geführt haben (z.B. Arbeiten in RYDER et al. [1996] und KOEBERL & MACLEOD [2002]), sind aber in der geologischen Vergangenheit unseres Planeten nicht besonders häufig. Genaue Untersuchungen zeigen, dass mit heutigem Wissensstand nur eines der bekannten großen Massensterben, eben jenes am Ende der Kreidezeit, ziemlich eindeutig dem Chicxulub-Impakt zuzuschreiben ist. Der Beitrag der Eruption der Deccan-Flutbasalte war zwar vorhanden, wird aber als nicht besonders bedeutend für das altersmäßig sehr rasche Massensterben gesehen (z.B. RAVIZZA & PEUCKER-EHRENBRINK, 2003). Im Fall der P/Tr-Grenze scheint es umgekehrt zu sein – die Auswirkungen der viel stärkeren Sibirischen Flutbasalt-Eruptionen scheinen zu dominieren, während bisher keine eindeutigen Spuren eines großen Impaktes nachgewiesen werden konnten. Auch im Fall anderer Massensterben konnte eine solche Verbindung zu Impakten bisher nicht nachgewiesen werden. Dies bedeutet allerdings nicht, dass es solche Verbindungen nicht gibt – aber der heutige Wissensstand lässt vorerst keine eindeutige Schlussfolgerung zu. Man sollte daher Impaktereignisse im Auge behalten, aber daran denken, dass kleinere Einschläge mit lokalen bis regionalen Effekten für die Menschheit eine unmittelbar größere Gefahr darstellen. Man soll die Gefahr von Impakten nicht überschätzen, aber diese Ereignisse mit anderen „Geohazards“ vergleichen. Aus der Untersuchung von Impaktkratern und deren Effekten auf der Erde kann man viel über die Konsequenzen zukünftiger Ereignisse lernen.

Dank

Viele Kollegen haben im Laufe der Jahre mit mir zu relevanten Arbeiten kooperiert und mit Diskussionen geholfen. Besonders hervorheben möchte ich auf dem Gebiet der vorliegenden Arbeit W.U. REIMOLD (jetzt Humboldt-Museum Berlin), I. GILMOUR (Open University, England), C.W. POAG (USGS, USA), K. FARLEY (Caltech, USA) und eben H.P. SCHÖNLAUB (GBA Wien). Für eine kritische Durchsicht des Manuskriptes danke ich W.U. REIMOLD.

Literatur

- ADDISON, A.D., BRUMPTON, G.R., VALLINI, D.A., MCNAUGHTON, N.J., DAVIS, D.W., KISSIN, S.A., FRALICK, P.W. & HAMMOND, A.L. (2005): Discovery of distal ejecta from the 1850 Ma Sudbury impact event. – *Geology*, **33**, 193–196.
- ALVAREZ, L.W., ALVAREZ, W., ASARO, F. & MICHEL, H.V. (1980): Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. – *Science*, **208**, 1095–1108.
- ATKINSON, H., TICKELL, C. & WILLIAMS, D. (2000): Report of the Task Force on Potentially Hazardous Near Earth Objects. – 56 pp., London (UK Government, British National Space Center).
- BECKER, L., POREDA, R.J., BASU, A.R., POPE, K.O., HARRISON, T.M., NICHOLSON, C. & LASKY, R. (2004): Bedout: a possible end-Permian impact crater offshore of Northwestern Australia. – *Science*, **304**, 1469–1476.
- BELCHER, C.M., COLLINSON, M.E. & SCOTT, A.C. (2005): Constraints on the thermal energy released from the Chicxulub impactor: new evidence from multi-method charcoal analysis. – *Journal of the Geological Society of London*, **162**, 59–602.
- BLUM, J.D. & CHAMBERLAIN, C.P. (1992): Oxygen isotope constraints on the origin of impact glasses from the Cretaceous-Tertiary boundary. – *Science*, **257**, 1104–1107.
- BLUM, J.D., CHAMBERLAIN, C.P., HINGSTON, M.P., KOEBERL, C., MARIN, L.E., SCHURAYTZ, B.C. & SHARPTON, V.L. (1993): Isotopic comparison of K-T boundary impact glass with melt rock from the Chicxulub and Manson impact structures. – *Nature*, **364**, 325–327.
- BODISELITSCH, B., MONTANARI, A., KOEBERL, C. & COCCIONI, R. (2004): Delayed climate cooling in the Late Eocene caused by multiple impacts: high-resolution geochemical studies at Massignano, Italy. – *Earth and Planetary Science Letters*, **223**, 283–302.
- BOHOR, B.F., FOORD, E.E., MODRESKI, P.J. & TRIPLEHORN, D.M. (1984): Mineralogical evidence for an impact event at the Cretaceous/Tertiary boundary. – *Science*, **224**, 867–869.
- BOHOR, B.F., MODRESKI, P.J. & FOORD, E.E. (1987): Shocked quartz in the Cretaceous/Tertiary boundary clays: Evidence for global distribution. – *Science*, **236**, 705–708.
- CHADWICK, B., CLAEYS, P. & SIMONSON, B.M. (2001): New evidence for a large Palaeoproterozoic impact: spherules in a dolomite layer in the Ketilidian orogen, South Greenland. – *Journal of the Geological Society of London*, **158**, 331–340.
- CHAPMAN, C.R. & MORRISON, D. (1994): Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard. – *Nature*, **367**, 33–40.
- CHEN, G., TYBURCZY, J.A. & AHRENS, T.J. (1994): Shock-induced devolatilization of calcium sulfate and implications for K-T extinctions. – *Earth and Planetary Science Letters*, **128**, 615–628.
- CHYBA, C.F., THOMAS, P.J. & ZAHNLE, K.J. (1993): The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid. – *Nature*, **361**, 40–44.
- COCKELL, C.S. & BLAUSTEIN, A.R. (2000): „Ultraviolet spring“ and the ecological consequences of catastrophic impacts. – *Ecology Letters*, **3**, 77–81.
- COLLINS, G.S., MELOSH, H.J. & MARCUS, R.A. (2005): Earth impact effects program: A web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. – *Meteoritics and Planetary Science*, **40**, 817–840.
- Earth Impact Database (2006) Online-Datenbank auf: <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>
- FARLEY, K.A. & MUKHOPADHYAY, S. (2001): An extraterrestrial impact at the Permian-Triassic Boundary? – *Science*, **293**, 2343a.
- FARLEY, K.A., MONTANARI, A., SHOEMAKER, E.M. & SHOEMAKER, C.S. (1998): Geochemical evidence for a comet shower in the late Eocene. – *Science*, **280**, 1250–1253.
- FARLEY, K.A., WARD, P., GARRISON, G. & MUKHOPADHYAY, S. (2005): Absence of extraterrestrial ³He in Permian-Triassic age sedimentary rocks. – *Earth and Planetary Science Letters*, **240**, 265–275.
- FRENCH, B.M. (1998): Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. – LPI Contribution, **954**, 120 pp., Houston (Lunar and Planetary Institute).
- GEHRELS, T. (Ed.) (1994): Hazards Due to Comets & Asteroids. – 1300 pp., Tucson (Univ. of Arizona Press).
- GILMOUR, I. (1998): Geochemistry of carbon in terrestrial impact processes. – In: GRADY, M.M., HUTCHISON, R., MCCALL, G.J.H., ROTHY, D.A. (Eds): Meteorites: Flux with Time and Impact Effects, Geological Society of London Special Publication, **140**, 205–216.
- GILMOUR, I., WOLBACH, W.S. & ANDERS, E. (1990): Early environmental effects of the terminal Cretaceous impact. – In: SHARPTON, V.L. & WARD, P.D. (Eds): Global Catastrophes in Earth History. Geological Society of America Special Paper, **247**, 383–390.
- GIRARD, A., FRANCOIS, L.M., DESSERT, C., DUPRE, B. & GODDERIS, Y. (2005): Basaltic volcanism and mass extinction at the Permo-Triassic boundary: Environmental impact and modeling of the global

- carbon cycle. – *Earth and Planetary Science Letters*, **234**, 207–221.
- GUPTA, S.C., AHRENS, T.J. & YANG, W. (2001): Shock-induced vaporization of anhydrite and global cooling from the K/T impact. – *Earth and Planetary Science Letters*, **188**, 399–412.
- HILDEBRAND, A.R., PENFIELD, G.T., KRING, D.A., PILKINGTON, M., CARMARGO, Z.A., JACOBSEN, S.B. & BOYNTON, W.V. (1991): Chicxulub crater: A possible Cretaceous-Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. – *Geology*, **19**, 867–871.
- HOLSER, W.T. & SCHÖNLAUB, H.P. (Eds.; 1991): The Permian-Triassic Boundary in the Carnic Alps of Austria (Gartnerkofel Region). – *Abh. Geol. B.-A.*, **45**, 232 pp., Wien.
- HOLSER, W.T., SCHÖNLAUB, H.P., ATTREP, M.JR., BOECKELMANN, K., KLEIN, P., MAGARITZ, M., ORTH, C.J., FENNINGER, A., JENNY, C., KRALIK, M., MAURITSCH, H., PAK, E., SCHRAMM, J.M., STATTEGGER, K. & SCHMÖLLER, R. (1989): A unique geochemical record at the Permian-Triassic boundary. – *Nature*, **337**, 39–44.
- KAIHO, K., KAJIWARA, Y., NAKANO, T., MIURA, Y., KAWAHATA, H., TAZIKI, K., UESHIMA, M., CHEN, Z. & SHI, G.R. (2001): End-Permian catastrophe by bolide impact: Evidence of a gigantic release of sulfur from the mantle. – *Geology*, **29**, 815–818.
- KAMO, S.L. & KROGH, T.E. (1995): Chicxulub crater source for shocked zircons from the Cretaceous-Tertiary boundary layer, Saskatchewan: Evidence from new U-Pb data. – *Geology*, **23**, 281–284.
- KELLER, G., ADATTE, T., STINNESBECK, W., REBOLLEDO-VIEYRA, M., FUCUGAUCHI, J.U., KRAMAR, U. & STÜBEN, D. (2004): Chicxulub impact predates the K-T boundary mass extinction. – *Proceedings of the National Academy of Science*, **97**(1), 1–6.
- KOEBERL, C. (1986): Geochemistry of tektites and impact glasses. – *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, **14**, 323–350.
- KOEBERL, C. (1996): Chicxulub – The K-T boundary impact crater: A review of the evidence, and an introduction to impact crater studies. – *Abh. Geol. B.-A.*, **53**, 23–50.
- KOEBERL, C. (1998a): *Impakt: Gefahr aus dem All*. – 184 pp, Wien – Klosterneuburg (Verlag VaBene).
- KOEBERL, C. (1998b): Identification of meteoritical components in impactites. – In: GRADY, M.M., HUTCHISON, R., MCCALLM, G.J.H. & ROTHERY, D.A. (Eds.): *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects*. – Geological Society of London, Special Publication, **140**, 133–152.
- KOEBERL, C. (2002): Mineralogical and geochemical aspects of impact craters. – *Mineralogical Magazine*, **66**, 745–768.
- KOEBERL, C. (2004): Remote sensing studies of impact craters: how to be sure? – *Comptes Rendus Geoscience*, **336**, 959–961.
- KOEBERL, C. & MACLEOD, K. (Eds.; 2002): *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond*. – Geological Society of America, Special Paper, **356**, 746 pp.
- KOEBERL, C. & MARTINEZ-RUIZ, F. (2003): The stratigraphic record of impact events: A short overview. – In: C. KOEBERL & F. MARTINEZ-RUIZ (Eds.): *Impact Markers in the Stratigraphic Record*, Impact Studies, vol. **3**, 1–40, Heidelberg (Springer).
- KOEBERL, C., ARMSTRONG, R.A. & REIMOLD W.U. (1997) Morokweng, South Africa: A large impact structure of Jurassic-Cretaceous boundary age. – *Geology*, **25**, 731–734.
- KOEBERL, C., GILMOUR, I., REIMOLD, W.U., CLAEYS, P. & IVANOV, B.A. (2002): Comment on "End-Permian catastrophe by bolide impact: Evidence of a gigantic release of sulfur from the mantle" by KAIHO et al. – *Geology*, **30**, 855–856.
- KOEBERL, C., FARLEY, K.A., PEUCKER-EHRENBRINK, B. & SEPHTON M.A. (2004): Geochemistry of the end-Permian extinction event in Austria and Italy: No evidence for an extraterrestrial component. – *Geology*, **32**, 1053–1056.
- KRING, D.A. (1997): Air blast produced by the Meteor Crater impact event and a reconstruction of the affected environment. – *Meteoritics and Planetary Science*, **32**, 517–530.
- LANGENHORST, F., KYTE, F.T. & RETALLACK, G.J. (2005): Reexamination of quartz grains from the Permian-Triassic boundary section at Graphite Peak, Antarctica. – *Lunar and Planetary Science*, **36**, abs. # 2358.
- LEWIS, J.S. (1997): *Rain of iron and ice: The very real threat of comet and asteroid bombardment*. – 240 pp., Addison-Wesley Publishing Comp.
- LYONS, J.R. & AHRENS, T.J. (2003): Terrestrial acidification at the K/T boundary. – In: DAVISON, L. et al. (Eds.): *High-pressure shock composition of solid V: Shock chemistry with applications to meteorite impacts*, 181–197, New York (Springer).
- MARUOKA, T. & KOEBERL, C. (2003): Acid-neutralizing scenario after the K-T impact event. – *Geology*, **31**, 489–492.
- MARUOKA, T., KOEBERL, C., HANCOX, P.J. & REIMOLD, W.U. (2003): Sulfur geochemistry across a terrestrial Permian-Triassic boundary section in the Karoo Basin, South Africa. – *Earth and Planetary Science Letters*, **206**, 101–117.
- MELOSH, H.J. (1989): *Impact cratering – A geologic process*. – 245 pp, New York (Oxford University Press).
- MONTANARI, A. & KOEBERL, C. (2000): *Impact Stratigraphy: The Italian Record*. – Lecture Notes in Earth Sciences, **93**, 364 pp., Heidelberg (Springer Verlag).
- MUKHOPADHYAY, S., FARLEY, K. & MONTANARI, A. (2001): A 35 Myr record of helium in pelagic limestones: implications for interplanetary dust accretion from the early Maastrichtian to the Middle Eocene. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **65**, 653–669.
- MÜLLER, R.D., GONCHAROV A. & KRITSKI, A. (2005): Geophysical evaluation of the enigmatic Bedout basement high, offshore north-western Australia. – *Earth and Planetary Science Letters*, **237**, 264–284.
- OLSEN, P.E., KENT, D.V., SUES, H.-D., KOEBERL, C., HUBER, H., MONTANARI, A., RAINFORTH, E.C., FOWELL, S.J., SZAJNA, M.J. & HARTLINE, B.W. (2002): Ascent of dinosaurs linked to Ir anomaly at Triassic-Jurassic boundary. – *Science*, **296**, 1305–1307.
- PIERAZZO, E., KRING, D.A. & MELOSH, H.J. (1998): Hydrocode simulation of the Chicxulub impact event and the production of climatically active gases. – *Journal of Geophysical Research*, **103**, 28607–28625.
- PILKINGTON, M. & GRIEVE, R.A.F. (1992): The geophysical signature of terrestrial impact craters. – *Reviews of Geophysics*, **30**, 161–181.
- POAG, C.W., KOEBERL, C. & REIMOLD, W.U. (2004): Chesapeake Bay Crater: Geology and Geophysics of a Late Eocene Submarine Impact Structure. – *Impact Studies*, vol. **4**, 522 pp (+ CD-ROM), Heidelberg (Springer Verlag).
- POREDA, R.J. & BECKER, L. (2003): Fullerenes and interplanetary dust at the Permian-Triassic boundary. – *Astrobiology*, **3**, 75–90.
- RAMPINO, M.R. & HAGGERTY, B.M. (1996): Impact crises and mass extinctions: A working hypothesis. – In: RYDER, G., FASTOVSKY, D. & GARTNER, S. (Eds.): *New Developments Regarding the KT Event and Other Catastrophes in Earth History*. – Geological Society of America, Special Paper, **307**, 11–30.
- RAVIZZA, G. & PEUCKER-EHRENBRINK, B. (2003): Chemostratigraphic evidence of Deccan Volcanism from the marine osmium isotope record. – *Science*, **302**, 1392–1395.
- REIMOLD, W.U., KOEBERL, C., BRANDSTÄTTER, F., KRUGER, F.J., ARMSTRONG, R.A. & BOOTSMA, C. (1999): The Morokweng impact structure, South Africa: Geologic, petrographic, and isotopic results, and implications for the size of the structure. – In: DRESSLER, B.O. & SHARPTON, V.L. (Eds.): *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II*, Geological Society of America Special Paper, **339**, 61–90.
- RENNE, P.R., FARLEY, K.A., REIMOLD, W.U., KOEBERL, C., RAMPINO, M.R., KELLEY, S.P. & IVANOV, B.A. (2004): Is Bedout an impact crater? Take 2. – *Science*, **306**, 610–612.
- RETALLACK, G.J., SEYEDOLALI, A., KRULL, E.S., HOLSER, W.T., AMBERS, C.P. & KYTE F.T. (1998): Search for evidence of impact at the Permian-Triassic boundary in Antarctica and Australia. – *Geology*, **26**, 979–982.
- RYDER, G., FASTOVSKY, D. & GARTNER, S. (Eds.; 1996): *The Cretaceous-Tertiary Event and other Catastrophes in Earth History*. – Geological Society of America, Special Paper, **307**, 576 pp.
- SCHULTE, P., SPEIJER, R., MAI, H. & KONTNY, A. (2006): The Cretaceous-Paleogene (K-P) boundary at Brazos, Texas: Sequence stratigraphy, depositional events and the Chicxulub impact. – *Sedimentary Geology*, **184**, 77–109.
- SELF, S., WIDDOWSON, M., THORDARSON, T. & JAY, A.E. (2006): Volatile fluxes during flood basalt eruptions and potential effects on the global environment: A Deccan perspective. – *Earth and Planetary Science Letters*, **248**, 518–532.
- SHARPTON, V.L. & WARD, P.D., (Eds.; 1990): *Global Catastrophes in Earth History*. – Geological Society of America, Special Paper, **247**, 631 pp.
- SIGURDSSON, H., D'HONDT, S. & CAREY, S. (1992): The impact of the Cretaceous/Tertiary bolide on evaporite terrane and generation of major sulfuric acid aerosol. – *Earth and Planetary Science Letters*, **109**, 543–559.

- SMIT, J. (1999): The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta. – *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, **27**, 75–113.
- SPENCER, J.R. & MITTON, J. (1995): *The great comet crash*. – 118 pp., Cambridge (Cambridge University Press).
- STEEL, D. (1995): *Rogue asteroids and doomsday comets – The search for the million megaton menace that threatens life on earth*. – 308 pp., New York (J. Wiley & Sons, Inc.).
- STÖFFLER, D. & LANGENHORST, F. (1994): Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observations and theory. – *Meteoritics*, **29**, 155–181.
- STUART, J.S. & BINZEL, R.P. (2004): Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects. – *Icarus*, **170**, 295–311.
- TANNER, L.H. & KYTE, F.T. (2005): Anomalous iridium enrichment at the Triassic-Jurassic boundary, Blomidon Formation, Fundy Basin, Canada. – *Earth and Planetary Science Letters*, **240**, 634–641.
- TAYLOR, S.R. & MCLENNAN, S.M. (1985): *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. – 312 pp., Oxford (Blackwell Scientific Publications).
- TOON, O.B., ZAHNLE, K., MORRISON, D., TURCO R.P. & COVEY, C. (1997): Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets. – *Reviews of Geophysics*, **35**, 41–78.
- WALKDEN, G., PARKER, J. & KELLEY, S. (2002): A late Triassic impact ejecta layer in southwestern Britain. – *Science*, **298**, 2185–2188.
- WARD, S.N. & ASPHAUG, E. (2000): Asteroid impact tsunami: a probabilistic hazard assessment. – *Icarus*, **145**, 64–78.
- WOLBACH, W.S., LEWIS, R.S. & ANDERS, E. (1985): Cretaceous extinctions: Evidence for wildfires and search for meteoritic material. – *Science*, **230**, 167–170.
- WOLBACH, W.S., GILMOUR, I. & ANDERS, E. (1990): Major wildfires at the Cretaceous/Tertiary boundary. – In: SHARPTON, V.L. & WARD, P. D. (Eds.): *Global Catastrophes in Earth History*, Geological Society of America, Special Paper, **247**, 391–400.
- YANG, W. & AHRENS, T.J. (1998): Shock vaporization of anhydrite and global effects of the K/T bolide. – *Earth and Planetary Science Letters*, **156**, 125–140.

Manuskript bei der Schriftleitung eingelangt am 27. Juli 2006