



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

Zur Wahrscheinlichkeit der Beeinträchtigung der Integrität untertägiger Endlager durch Impaktereignisse

Dr. Jan-Martin Hertzsch

Hannover, Dezember 2013

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung.....	3
Abstract.....	4
1 Veranlassung.....	5
2 Impakteffekte und Kraterstruktur.....	5
3 Globale Impaktstatistik.....	6
3.1 Globale Häufigkeit von Impaktereignissen.....	6
3.2 Theoretische Untergrenze der Projektilmasse für Kraterentstehung.....	7
3.3 Periodizität von Impaktereignissen?.....	8
4 Umrechnung der Kratergrößen-Häufigkeit für einen gegebenen Ort.....	9
5 Skalierung der Abmessungen von Impaktkratern.....	12
6 Zusammenfassung.....	14
Literaturverzeichnis.....	16
Abkürzungsverzeichnis.....	17
Tabellenverzeichnis.....	18
Abbildungsverzeichnis.....	19

Titelfoto: Franz Böker, © BGR

Meteoritenkrater (Arizona, USA) mit 1.600 Meter Durchmesser und einer Tiefe von etwa 170 Metern.
Der Meteorit hatte einen Durchmesser von etwa 50 Metern und schlug vor etwa 50.000 Jahren ein.

© Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Geozentrum Hannover
Stilleweg 2
30655 Hannover
www.bgr.bund.de

Verkürzte Zusammenfassung

Autor:	Hertzsch, Jan-Martin, Dr.
Titel:	Zur Wahrscheinlichkeit der Beeinträchtigung der Integrität untertägiger Endlager durch Impaktereignisse
Schlagwörter:	Endlagersicherheit, Hochgeschwindigkeitsimpakte

Meteoriteneinschläge auf der Erdoberfläche verursachen ab einer gewissen Größe des Projektils Impaktkrater, deren Bildung mit der Exkavation von Material und der Entstehung von Rissen im Gestein bis zu einer von der Impaktenergie und der Beschaffenheit des Untergrunds abhängigen Tiefe einhergeht. Sie stellen daher ein Risiko für die Untertagelagerung von Abfällen, bei denen es auf die Vermeidung von Wegsamkeiten ankommt, dar. Unter Verwendung einer modernen Statistik der globalen Häufigkeitsverteilung terrestrischer Impaktereignisse und eines bewährten Modells der Kraterbildungsprozesse wird die lokale Häufigkeit von Impakten in Abhängigkeit von der Kratergröße abgeschätzt. Bei Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen Kraterfläche und Erdoberfläche kann man schlussfolgern, dass ein Impakt, der eine Gefahr für ein Endlager in einer Teufe von einigen 100 m an einem gegebenen Ort darstellt, ein seltenes Ereignis ist, das im Nachweiszeitraum mit einer Frequenz von weniger als 10^{-12} a^{-1} auftritt.

Abstract

Impacts of meteorites above a certain size cause impact craters on Earth's surface. Whose formation is accompanied by the excavation of material and the fracturing of the underground rocks up to a depth which depends on the impact energy and the nature of the material in the target area. Such events pose a risk to the subsurface storage of waste, which requires to avoid the generation of pathways through the rock. Using modern statistics of the global frequency of terrestrial impact events and a proven model of cratering processes, the dependency of the local frequency of impacts on the crater size is estimated. Taking into account the ratio between crater surface and Earth's surface it is possible to conclude that an impact which poses a danger for a subsurface repository in a given place at a depth of several hundred metres is a rare event with an occurrence of less than 10^{-12} a^{-1} during the post-closure phase.

1 Veranlassung

Gesundheits- und/oder umweltgefährdende Abfälle radioaktiver oder chemischer Art werden bevorzugt mehrere hundert Meter tief in geologischen Formationen gelagert, da auf diese Weise leicht Barrieren gegen die meisten äußeren Einflüsse, gegen den Austritt schädlicher Stoffe und gegen unbefugten Zugang geschaffen werden können. Aus technologischen Gründen wird eine Einlagerung nur in Teufen bis zu etwa 1000 m in Betracht gezogen. Da jedoch eine Anzahl von Impaktkratern auf der Erde bekannt ist, deren Tiefe in derselben Größenordnung liegt, erscheint es sinnvoll, die Gefährdung durch solche Impaktereignisse abzuschätzen. Dazu wird die zu erwartende Häufigkeit des Entstehens eines Impaktkraters an einem gegebenen Ort auf der Erdoberfläche in Abhängigkeit von der Kratergröße, die ein Ausdruck der beim Impact verwandelten kinetischen Energie ist, aus der globalen Häufigkeit von Impaktereignissen in Abhängigkeit von der Kratergröße ermittelt.

2 Impakteffekte und Kraterstruktur

An dieser Stelle sollen vor allem solche Impakte diskutiert werden, die Krater mit einer Tiefe verursachen, die der Teufe der vorgeschlagenen Untertage-Endlager vergleichbar ist. Ein Vergleich bekannter Impaktkrater auf der Erde zeigt, dass es sich dabei vorwiegend um einfache Krater, d. h. ohne Aufwölbung des Kraterbodens, handelt. Erst bei einem Kraterdurchmesser von etwa 2 km wird der Übergangsbereich zu komplexen Kratern erreicht.

Grundsätzlich laufen bei einem Impact eines kosmischen Projektils folgende Prozesse teils nacheinander, teils gleichzeitig ab (MELOSH 1989):

1. Kompression: Durch die hohe Verzögerung beim Impact unterliegen die Materialien von Projektil und Einschlagsgebiet einer Kompression mit einem Mehrfachen der Schallgeschwindigkeit. Impactgeschwindigkeiten auf der Erde können je nach Herkunft des Projektils zwischen 12 km/s und 72 km/s betragen. Da das Material also einer Stoßwellenkompression unterworfen wird, wird es stark erwärmt, so dass metamorphe Prozesse im Untergrund stattfinden. Man beobachtet Hochdruckmodifikationen von Mineralien, die in dieser relativen Nähe zur Erdoberfläche durch keinen anderen geologischen Prozess gebildet werden können. Das Projektil sowie oberflächennahe Bereiche des Gesteins können aufschmelzen und verdampfen.
2. Exkavation: Das Material im Umkreis der Einschlagstelle wird deformiert, ähnlich wie bei einer Sprengung kommt es zum Auswurf teils geschmolzenen, teils frag-

mentierten Materials, das in der Umgebung des Kraters eine Decke von Ejekta bildet. Dadurch entstehen eine schüsselartige Senke und ein Kraterwall.

3. Modifikation: Die Schwerkraft und elastische Nachwirkungen im deformierten Untergrundmaterial führen zu einer Modifikation der Gestalt des Kraters. Der Kraterboden federt zurück, der Wall kollabiert teilweise wieder. Bei großen Kratern bilden sich durch die Wechselwirkung von Rückfederung und Kollaps komplexere Strukturen wie Zentralberge oder Ringsysteme.

Die Auswirkungen auf das Gestein erstrecken sich nicht nur auf den sichtbaren Kraterbereich, sondern auch in den tieferen Untergrund. Zwar lässt die Wirkung der Stoßwelle mit zunehmendem Abstand vom Impaktort rasch nach, jedoch haben Bohrungen in Impaktkratern eine Brekzierung des Kratergrundes (Megabrekzie) bis in eine Tiefe, die etwa dem Doppelten der Kratertiefe entspricht, nachgewiesen. Hierdurch können, auch wenn der eigentliche Krater nicht die Tiefe der Einlagerung erreicht, Wegsamkeiten in den Lagerbereich entstehen. Für die Abwägung der Risiken von Hochgeschwindigkeitsimpakten auf unterirdische Lagerräume muss also diese größere Tiefe in Betracht gezogen werden, die im Folgenden als Zerrüttungstiefe bezeichnet werden soll.

3 Globale Impaktstatistik

3.1 Globale Häufigkeit von Impaktereignissen

Auf Himmelskörpern ohne Atmosphäre (Erdmond) wird die Größe von Impaktkratern von der kinetischen Energie des Projektils (Impaktenergie) und der Beschaffenheit des Untergrunds bestimmt. Auf der Erde jedoch beeinflusst die Atmosphäre zumindest das Verhalten kleinerer Projektile erheblich. Die kleinsten Meteoroiden verdampfen infolge der Abbremsung noch in der Luft, etwas größere fragmentieren, so dass ihre Bruchstücke den Boden quasi im freien Fall erreichen, und selbst noch die kleinsten echten Impaktkrater mit nachweisbaren Stoßwelleneffekten werden durch eine Gruppe von Bruchstücken anstatt durch einen einzigen Körper erzeugt. Die Energie eines Projektils muss also nicht nur ausreichend sein, die Atmosphäre zu durchdringen, sondern seine Fragmente müssen groß genug bleiben, um einen Krater verursachen zu können. BLAND & ARTEMIEVA (2006) haben mittels numerischer Simulationen die Effekte der Erdatmosphäre auf potenzielle Impaktoren untersucht. Gekoppelt mit der aus astronomischen Beobachtungen erhaltenen Größenverteilung erdnaheer Objekte und der daraus sich ergebenden globalen zeitlichen Häufigkeitsverteilung für den Eintritt von Meteoroiden mit einer Energie in gegebenen Intervallen in die Hochatmosphäre kann daraus eine Verteilung der Häufigkeit von Kratergrößen (BLAND & ARTEMIEVA 2006) an der Erdoberfläche abgeleitet werden, die

in Spalten 1 bis 5 von Tab. 1 dieses Berichts wiedergegeben ist. Diese Daten werden mit den in Abschnitt 3.2 diskutierten Änderungen zur Grundlage der Berechnungen in Abschnitt 4 gemacht. Dabei wurde wie von BLAND & ARTEMIEVA (2006) unter Annahme einer mittleren Impaktgeschwindigkeit von etwa 18.75 km/s die kinetische Energie des Impakts auf die Projektilmasse, die nun als Hilfsgröße zur Skalierung dient, umgerechnet. Der Bequemlichkeit des Vergleichs halber wird an Stelle eines Bezugs auf die Energie dieser Bezug auf die Masse in den folgenden Rechnungen beibehalten.

3.2 Theoretische Untergrenze der Projektilmasse für Kraterentstehung

Für eine statistische Betrachtung der potentiellen Gefährdung von Untertageanlagen durch kraterbildende Impakte ist es zunächst notwendig, die Mindestmasse oder energie eines Projektils für die Entstehung eines echten Impaktkraters (mit Stoßwelleneffekten) zu bestimmen. Die numerischen Simulationen von BLAND & ARTEMIEVA (2006) sagen für eine Projektilmasse von 10 t noch keine Kraterbildung voraus, jedenfalls wird noch kein Kraterdurchmesser angegeben. Jedoch zeigten Beobachtungen, die dem Meteoritenschauer von Sichote-Alin im Jahr 1947 folgten, dass Eisenkörper von etwa 1 m Durchmesser durchaus schon echte Krater erzeugen konnten. In solchen Grenzfällen ist allerdings nicht zuletzt wegen der oben erwähnten Fragmentation (KRINOV 1974) mit erheblicher Streuung der Daten zu rechnen. Überdies stellen solche relativ kleinen Körper für Untertageanlagen in Teufen von mehr als 50 m noch keine Gefahr dar. Der Mindestmasse, die man durch Extrapolation der Daten für die kleinsten beobachteten Kraterdurchmesser ermitteln kann, kommt nur die Bedeutung eines mathematischen Nullpunkts der Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung zu, der die weiter unten beschriebenen Berechnungen ermöglicht.

Betrachtet man die von BLAND & ARTEMIEVA (2006) vorhergesagten Kraterdurchmesser für Projektilmassen von 50 t bis 5000 t (0,05 kt bis 5 kt), so stellt man fest, dass diese Werte in guter Näherung einer Potenzfunktion

$$D_f(m) = 0,1959 \cdot (m - 0.00603)^{0.3788}$$

(D_f in km, m in kt) folgen (siehe Abb. 1). Dass für eine Masse von 10 t kein Krater mehr zu erwarten sein soll (BLAND & ARTEMIEVA 2006) (theoretischer Kraterdurchmesser Null), steht mit dieser Funktion nicht im Einklang. Extrapoliert man nämlich formal zu kleineren Werten, so findet man, dass die theoretische Mindestmasse für die Bildung eines Impaktkraters an der Erdoberfläche etwa 6 t bzw. die Mindestenergie etwa 10^{12} J betragen sollte. Dieser Wert ist daher in Tab. 1 eingetragen und als „extrapoliert“ gekennzeichnet worden. Einsetzen einer Projektilmasse von 10 t in diese Potenzfunktion ergibt, dass für diese Masse ein Kraterdurchmesser von etwa 24 m erwartet werden kann

(in Tab. 1 als „korrigiert“ gekennzeichnet) und solche und größere Ereignisse global etwa einmal in zehn Jahren zu erwarten sind. Dieser korrigierte Wert wird anstelle der von BLAND & ARTEMIEVA (2006) verwendeten Angabe „N/A“ für den Kraterdurchmesser in den folgenden Rechnungen verwendet. Nochmals sei darauf hingewiesen, dass wegen der Streuung der Beobachtungsdaten dieser Wert – ebenso wie der für die theoretische Mindestmasse – nur als Hilfsgröße zu verstehen ist.

3.3 Periodizität von Impaktereignissen?

Eine mögliche Periodizität der Impaktrate mit Perioden zwischen 16 und 38 Millionen Jahren wird kontrovers diskutiert. Aufgrund der Ungenauigkeiten in der Bestimmung des Alters terrestrischer Krater und von Widersprüchen zwischen den zugrunde gelegten Annahmen (vorwiegend kometarer Ursprung der Projektile) und geochemischen Befunden (Herkunft der meisten Projektile aus dem Asteroidengürtel) stellt BLAND (2005) fest, dass hierfür keine überzeugenden Argumente vorliegen. Die Hypothese der Periodizität wird daher hier nicht weiter berücksichtigt, zumal auch die eventuelle Amplitude schwer zu bestimmen ist.

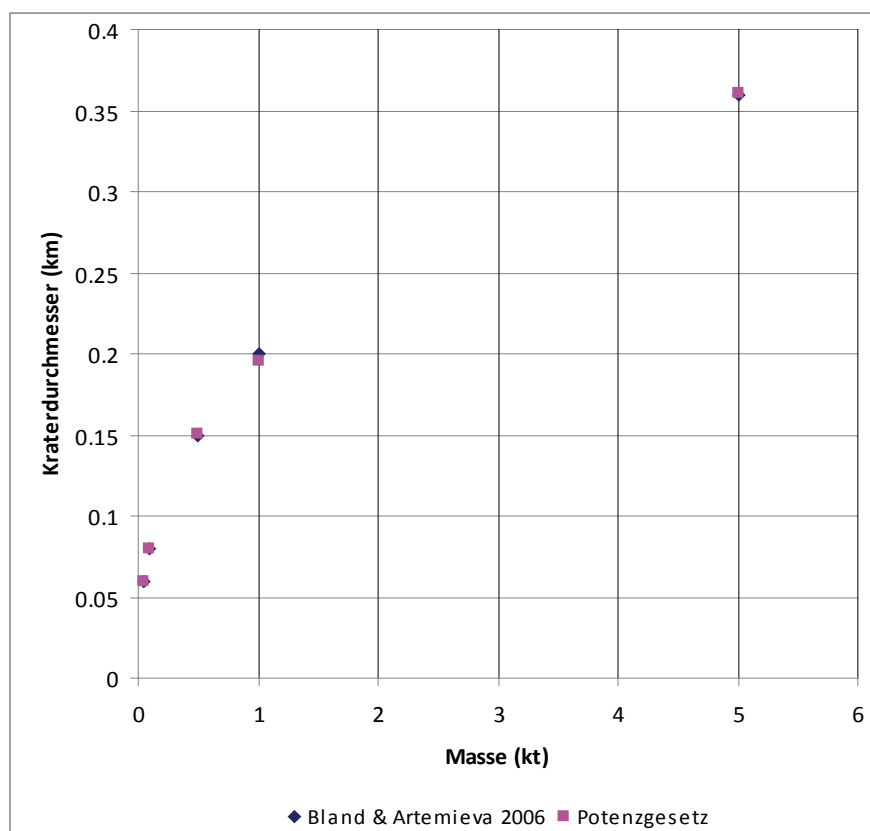


Abb. 1: Zur Bestimmung der theoretischen Mindestmasse für die Bildung von Impaktkratern: Vergleich der prognostizierten Kraterdurchmesser mit dem Potenzgesetz $D_i(m) = 0,1959 \cdot (m - 0,00603)^{0,3788}$

4 Umrechnung der Kratergrößen-Häufigkeit für einen gegebenen Ort

Bei den von BLAND & ARTEMIEVA (2006) ermittelten und in Tab. 1, Spalte 4 dargestellten Häufigkeiten N handelt es sich um Werte einer komplementären kumulativen Verteilungsfunktion (CCDF), die die Häufigkeit des Auftretens von Ereignissen mit einer Projektilmasse größer als ein gegebener Betrag beschreibt. Zudem ist diese Verteilung globaler Natur, sie gibt die Häufigkeit des Eintretens eines Ereignisses an einem beliebigen Punkt der Erdoberfläche an. Vom Standpunkt der Bewertung des Risikos für eine Untertageanlage aus muss man jedoch die lokale Häufigkeit kennen, die sich aus der lokalen Wahrscheinlichkeit p_n von Impakten in den verschiedenen Größenintervallen n mit $D_n < D_f \leq D_{n+1}$ ergibt. Letztere kann man abschätzen, indem man die globale Wahrscheinlichkeit P_n der Bildung eines Kraters mit einem finalen Durchmesser D_f in einem bestimmten Intervall $D_n < D_f \leq D_{n+1}$ durch Differenzbildung aus den Werten der CCDF für die Intervallgrenzen berechnet:

$$P_n = N(D_{n+1}) - N(D_n)$$

und diese mit dem durchschnittlichen Verhältnis der Kraterfläche $S_c = \pi D_f^2/4$ in diesem Intervall (Tab. 1, Spalte 8) zur Erdoberfläche $S_E = 5,1 \cdot 10^8 \text{ km}^2$ multipliziert:

$$p_n = P_n \cdot S_c / S_E = P_n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_f^2 / S_E$$

Auf diese Art abstrahiert man in pessimistischer Weise von der detaillierten Gestalt des Kraters, indem eine Schädigung des Untergrundes in gleicher Tiefe über die gesamte Fläche des Kraters angenommen wird, während das Profil der Schädigung vielmehr dem des Kraters folgen wird. Die Methode ist zusätzlich pessimistisch, weil das Verhältnis S_c/S_E quadratisch von D_f abhängt, die Durchschnittsbildung aber linear erfolgt. Die so berechneten lokalen Wahrscheinlichkeiten für einen gegebenen Ort, in einem Krater einer gewissen Größe zu liegen, sind in Tab. 1, Spalte 9 aufgeführt. Hieraus kann man durch Summation leicht die kumulative Verteilungsfunktion (CDF) F_f für die lokalen Wahrscheinlichkeiten berechnen:

$$F_f(D_f) = \sum_{D_i < D_f} p_i(D_i)$$

Jedoch ist für die Prognose die Kenntnis der CCDF notwendig, die auch als „Überlebensfunktion“ bezeichnet wird. Deren Bestimmung „für alle Zeiten“ ist aber mit den vorliegenden Daten nicht möglich, da die Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung von BLAND & ARTEMIEVA (2006)

keinen Wert für die maximal mögliche Kratergröße angibt. Theoretisch würde diese der Fläche einer Hemisphäre der Erde entsprechen, allerdings ist mit einer praktisch völligen Zerstörung der Biosphäre bereits bei Kratern ab einigen 100 km Durchmesser zu rechnen, die bei der heutigen Größenverteilung erdnahe Objekte nur mit extrem geringer Wahrscheinlichkeit auftreten (Krater mit mehr als 200 km Durchmesser treten nur noch in Intervallen von ca. 100 Millionen Jahren und länger auf). Solche Ereignisse muss man also für die angestrebte Lebensdauer von Untertagelagern von 10^6 Jahren nicht in Betracht ziehen. Zudem machen der bedeutende Größenunterschied zwischen dem maximalen von BLAND & ARTEMIEVA (2006) angegebenen Kraterdurchmesser und diesem theoretischen Maximum sowie die große Unsicherheit der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit solch katastrophaler Impakte eine Rechnung unzuverlässig.

Statt dessen wird die Betrachtung von Ereignissen mit einer globalen Häufigkeit in der Größenordnung der Dauer der zu betrachtenden Nachbetriebsphase eines Endlagers (1 Million Jahre) als ausreichend angesehen. Die Obergrenze des Bereichs der in dieser Zeit zu erwartenden möglichen Kraterdurchmesser erhält man durch Anpassung einer Potenzfunktion an die inverse globale Häufigkeitsverteilung $D_f(F)$ und Berechnen des Durchmessers für $F = 10^6 \text{ a}^{-1}$ zu 27,6 km. Dies entspricht formal einer Impaktormasse von rund 27 Millionen Tonnen oder einer kinetischen Energie von $4.74 \cdot 10^{21} \text{ J}$. Die Potenzfunktion (Abb. 2) lautet in guter Näherung:

$$D_f(F) = 0,0035 \cdot F^{-0,6469}$$

(D_f in km, F in a^{-1}).

Dann kann man aus den berechneten lokalen Wahrscheinlichkeiten p_i mit der Methode von KAPLAN & MEIER (1958) die gewünschte „Überlebensfunktion“ \bar{F} (die lokale CCDF) für den gegebenen Zeitraum näherungsweise aus der Anzahl d_i der in diesem Zeitraum entstandenen Krater im Größenintervall n (mit $D_n < D_f \leq D_{n+1}$) und der Anzahl n_i der noch zu erwartenden Krater in den darüberliegenden Größenintervallen (mit $D_{n+1} < D_f$) berechnen (diese Formel wird meist für die Bestimmung einer tatsächlichen Überlebensfunktion im zeitlichen Sinn gebraucht):

$$\bar{F}(D_f) \approx \prod_{D_i \leq D_f} \frac{n_i - d_i}{n_i}$$

für $0 \leq D_f \leq D_f(10^6 \text{ a})$.

Die hierbei erhaltenen Werte sind normiert auf einen Wert von 1 für den kleinstmöglichen Durchmesser. Um die Häufigkeiten auf ein gegebenes Zeitintervall zu beziehen, müssen sie mit der Summe der lokalen Wahrscheinlichkeiten für dieses Intervall (hier 1 Million Jahre) multipliziert werden. Spalte 15 in Tab. 1 gibt diese Werte an, die grafisch in Abb. 3 dargestellt sind. Man findet, dass diese Häufigkeiten derart gering sind, dass man an einem gegebenen Ort (jedoch nicht global!) einen Einschlag, der überhaupt einen Krater erzeugt, erst in Zeiträumen erwarten muss, die das Alter des Sonnensystems um Größenordnungen übersteigen.

Sollte ein anderer Betrachtungszeitraum als 1 Million Jahre in Erwägung gezogen werden, kann die obige Rechnung ohne Schwierigkeit daran angepasst werden.

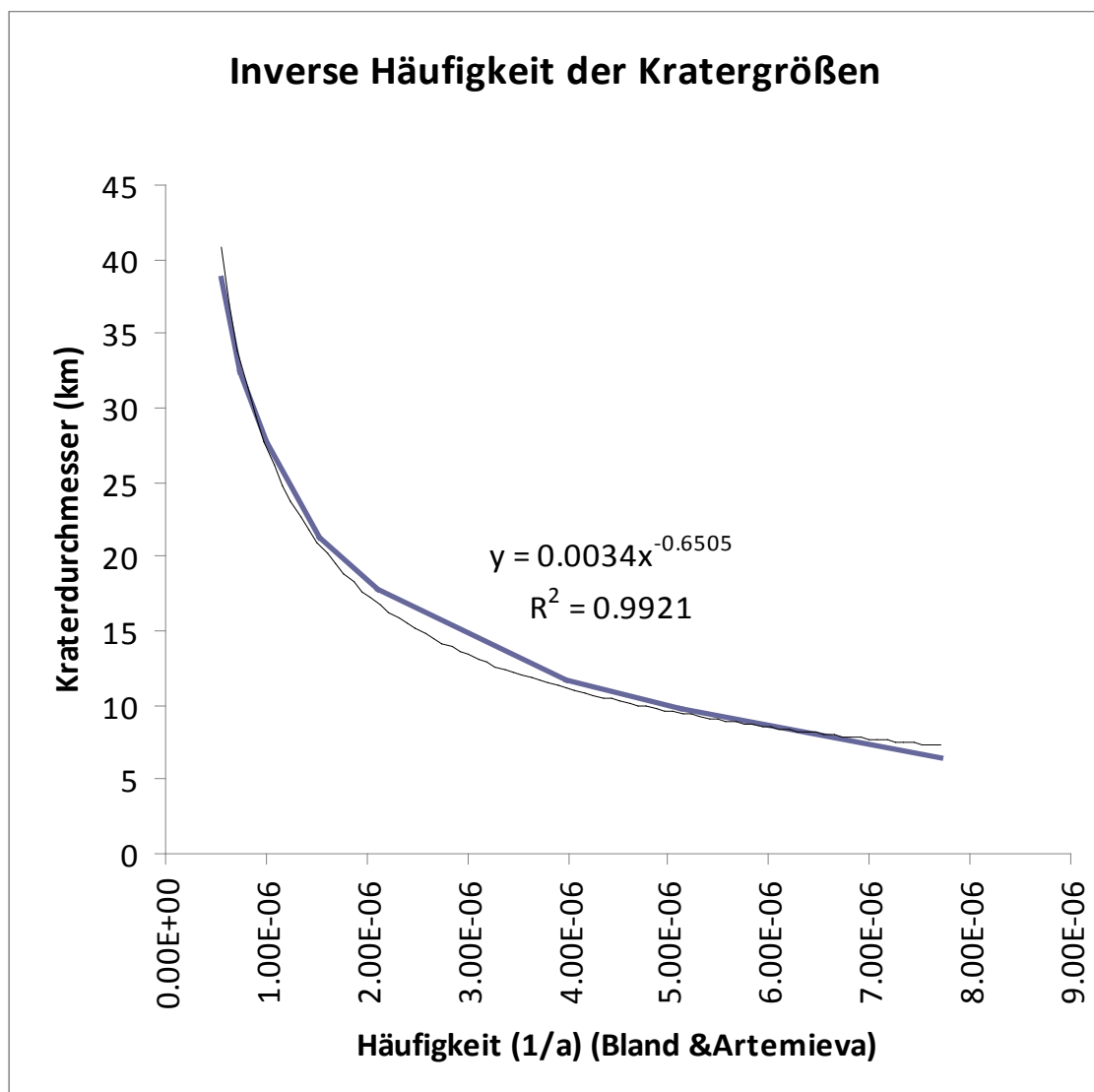


Abb. 2: Zur Bestimmung der Obergrenze des während 1 Million Jahre zu erwartenden Kraterdurchmessers durch ein an die prognostizierten Daten angepasstes Potenzgesetz

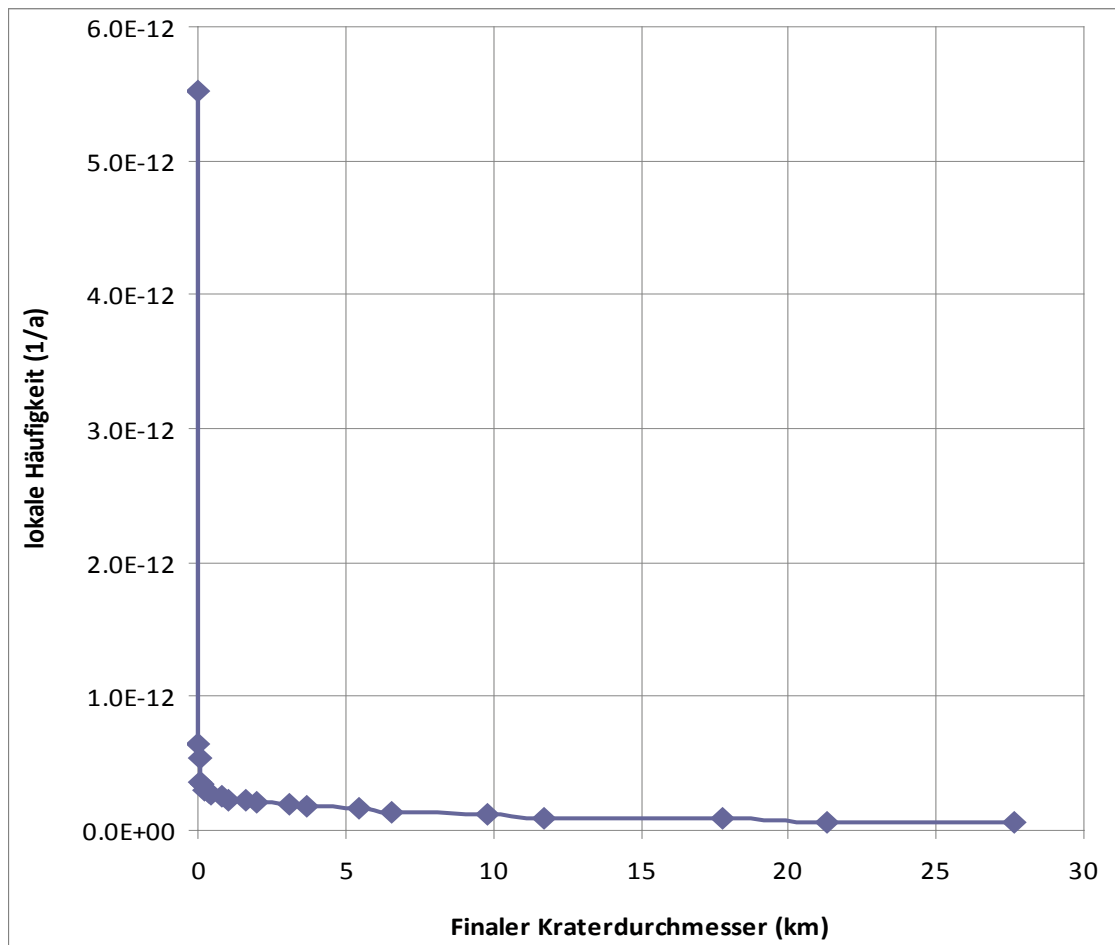


Abb. 3: Lokale kumulative Häufigkeit der Bildung von Kratern größer als ein gegebener Durchmesser

5 Skalierung der Abmessungen von Impaktkratern

Zu einer Beurteilung des Risikos eines Impaktereignisses muss seine Häufigkeit auch in Beziehung zur Tiefe gesetzt werden. Hierzu ist die Kenntnis der Abhängigkeit der Kratertiefe und der Zerrüttungstiefe vom Kraterdurchmesser notwendig. Aus Messungen an irdischen Impaktkratern ist bekannt, dass in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des anstehenden Gesteins bzw. des Bodens die Zerrüttungstiefe das 1,5- bis 2-fache der Kratertiefe beträgt. Die Beziehung zwischen Kratertiefe und Kraterdurchmesser ergibt sich aus den Modellen von HOLSAPPLE (1993), für deren Anwendung eine Berechnungshilfe (HOLSAPPLE 2003) bereitsteht. Hierbei ist zu beachten, dass von BLAND & ARTEMIEVA (2006) die finalen Kraterdurchmesser (nach Schritt 3 in Abschnitt 2) angegeben werden. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Eigenschaften des Bodens bzw. des anstehenden Gesteins über die Erdoberfläche variieren und die Skalierung daher mit einer deutlichen Streuung behaftet ist. Mit Hilfe von Berechnungen nach HOLSAPPLE (2003) werden daher zunächst

die transienten Kraterdurchmesser (nach Schritt 2 aus Abschnitt 2) bestimmt sowie die dazugehörigen transienten Kratertiefen, und im Sinne einer pessimistischen Vorhersage werden letztere als Grundlage für die Berechnung der Zerrüttungstiefe benutzt. Dabei wird angenommen, dass das im Kraterbereich anstehende Material die Eigenschaften von „Hard soil / soft rock“ besitzt, also eine gewisse Kohäsion aufweist, da die Anlage eines Untertage-Lagers im Lockermaterial nicht praktikabel wäre und diese Annahme aber für festere Gesteine (Kristallin) pessimistisch ist. In Spalten 16 bis 18 von Tab. 1 sind die entsprechenden Werte angegeben. Man findet, dass die Häufigkeit der Zerrüttung mit der Tiefe abnimmt und bereits bei Tiefen zwischen 200 m und 1000 m so gering ist (kleiner als 10^{-12} a^{-1}), dass ein entsprechend großer Einschlag lokal nur einmal in einem Zeitraum erwartet wird, der das Alter der Erde um Größenordnungen übersteigt. Abb. 4 stellt den Zusammenhang zwischen Einlagerungstiefe (der die Zerrüttungstiefe gleichgesetzt wird) und Risiko einer Schädigung grafisch dar.

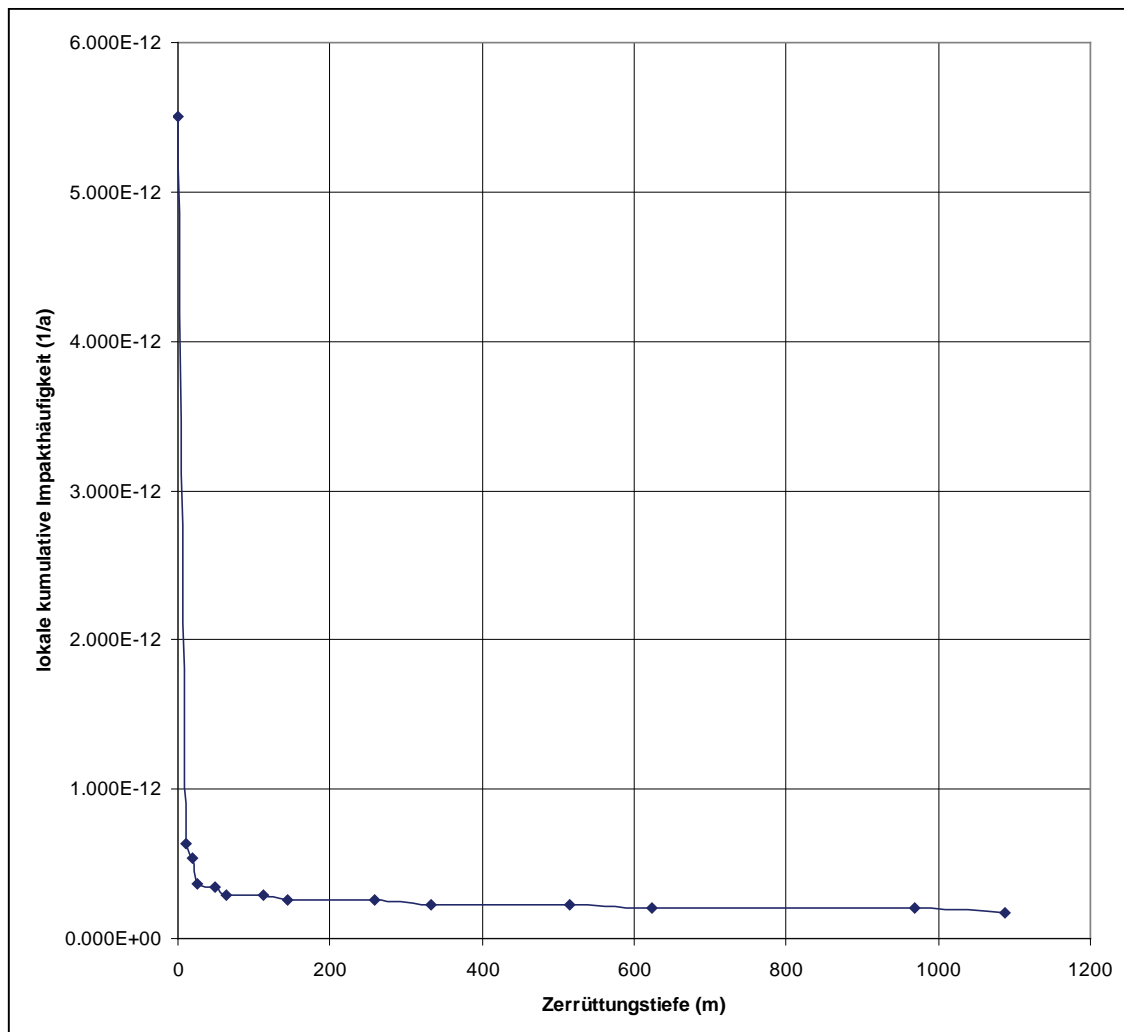


Abb. 4: Lokale kumulative Häufigkeit von Impakten, die mindestens zu einer gewissen Zerrüttungstiefe führen

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Wegsamkeiten zu einem unterirdischen Endlager durch Exkavation von Material und Rissbildung im Untergrund infolge von Hochgeschwindigkeitsimpakten in Abhängigkeit von Einlagerungstiefe und Kratergröße betrachtet. Weitere Effekte von Impakten auf die Ökosphäre, z. B. durch Ejekta oder durch thermische Wirkungen in einem größeren Umkreis, wurden nicht betrachtet. Erreicht der unmittelbare Kraterbereich, in dem Aufschmelzung und Metamorphose von Gesteinen stattfinden, den Einlagerungsbereich, ist auch mit dem Auswurf eingelagerter Stoffe zu rechnen. Bei Rissbildung können Wegsamkeiten entstehen. Aus der gegenwärtig aktuellen globalen Häufigkeitsverteilung von Impaktkratern (BLAND & ARTEMIEVA 2006) wurde zunächst die lokale Wahrscheinlichkeit der Entstehung eines Impaktkraters in Abhängigkeit von der Kratergröße berechnet und daraus durch Anwendung einer bewährten Methode der mathematischen Statistik (KAPLAN & MEIER 1958) die Häufigkeitsverteilung von Impakten, die zu Kratern über einer gegebenen Größe führen, für den zu betrachtenden Zeitraum der Nachbetriebsphase eines untertägigen Endlagers berechnet und mit Hilfe der Skalierungsbeziehungen nach HOLSAPPLE (1993, 2003) in Beziehung zu der der Kratergröße nach zu erwartenden Zerrüttungstiefe gesetzt. Die Schaffung von Wegsamkeiten zu einem Untertagelager erfordert eine der Kratertiefe entsprechende Impaktenergie, die umso seltener auftritt, je höher sie ist. Das Ergebnis ist durch die große Variationsbreite der Eigenschaften der an der Erdoberfläche anstehenden Gesteine mit einer Streuung behaftet, jedoch ist unter der Annahme, dass sich die Häufigkeitsverteilung von Größen und Geschwindigkeiten erdnaheer Körper in den betrachteten Zeiträumen nicht signifikant ändert, das Risiko einer Schädigung eines untertägigen Endlagers an einer gegebenen Stelle innerhalb der vorgesehenen Dauer des Nachweiszeitraums von 1 Million Jahren durch ein Impaktereignis insgesamt als sehr gering einzustufen, da die zu erwartenden Zeitskalen das Alter des Sonnensystems bei Weitem übersteigen.

Tab. 1: Gesamtdarstellung der Daten und Berechnungen (Spalten 1 bis 5 nach BLAND & ARTEMIEVA 2006)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Masse m (kg)	Masse m (kt)	D _f Krater (km)	Häufigkeit F (N>m a ⁻¹)	Intervall (1/N) (a)													
0.1	0.0000001	0	13710														
0.5	0.0000005	0	6217														
1	0.000001	0	4422														
5	0.000005	0	1189														
10	0.00001	0	674														
50	0.00005	0	94														
100	0.0001	0	40														
500	0.0005	0	5.3														
1000	0.001	0	2.2														
5000	0.005	0	2.98E-01	3.400E+00													
6030	0.00603	0	1.65E-01	6.058E+00	1.651E+05	6.51E-02	8.96649E-13	5.83478E-14	5.83E-14	5.83E-08	0	1.000E+00	1.000E+00	5.518E-12	0	0	0
10000	0.01	0.0241	1.00E-01	1.000E+01	1.000E+05	7.99E-02	5.54399E-12	4.42965E-13	5.01E-13	5.01E-07	4.43E-07	1.164E-01	1.164E-01	6.422E-13	6.5	13	0.018
50000	0.05	0.06	2.01E-02	5.000E+01	2.010E+04	1.00E-02	9.85598E-12	9.85598E-14	6.00E-13	6.00E-07	9.86E-08	8.357E-01	9.727E-02	5.367E-13	13	26	0.046
100000	0.1	0.08	1.01E-02	9.900E+01	1.010E+04	8.07E-03	3.46499E-11	2.79625E-13	8.79E-13	8.79E-07	2.80E-07	6.821E-01	6.634E-02	3.660E-13	17	34	0.062
500000	0.5	0.15	2.03E-03	4.920E+02	2.030E+03	1.01E-03	6.15999E-11	6.22159E-14	9.42E-13	9.42E-07	6.22E-08	9.339E-01	6.196E-02	3.419E-13	32	64	0.115
1000000	1	0.2	1.02E-03	9.810E+02	1.020E+03	7.59E-04	1.99584E-10	1.51484E-13	1.09E-12	1.09E-06	1.51E-07	8.614E-01	5.337E-02	2.945E-13	42	84	0.153
5000000	5	0.36	2.61E-04	3.830E+03	2.610E+02	7.50E-05	3.25863E-10	2.44397E-14	1.12E-12	1.12E-06	2.44E-08	9.781E-01	5.221E-02	2.881E-13	75	150	0.277
1.00E+07	10	0.46	1.86E-04	5.363E+03	1.860E+02	1.01E-04	1.03549E-09	1.04274E-13	1.22E-12	1.22E-06	1.04E-07	9.147E-01	4.775E-02	2.635E-13	96	192	0.354
5.00E+07	50	0.82	8.53E-05	1.172E+04	8.530E+01	2.44E-05	1.73034E-09	4.22203E-14	1.26E-12	1.26E-06	4.22E-08	9.666E-01	4.616E-02	2.547E-13	172	344	0.63
1.00E+08	100	1.06	6.09E-05	1.641E+04	6.090E+01	3.14E-05	4.14197E-09	1.30058E-13	1.39E-12	1.39E-06	1.30E-07	9.067E-01	4.185E-02	2.309E-13	222	444	0.814
5.00E+08	500	1.64	2.95E-05	3.390E+04	2.950E+01	4.80E-06	6.15999E-09	2.95679E-14	1.42E-12	1.42E-06	2.96E-08	9.792E-01	4.098E-02	2.261E-13	343	686	1.26
1.00E+09	1000	2	2.47E-05	4.040E+04	2.470E+01	8.20E-06	1.45143E-08	1.19017E-13	1.54E-12	1.54E-06	1.19E-07	9.229E-01	3.782E-02	2.087E-13	415	830	1.52
5.00E+09	5000	3.07	1.65E-05	6.075E+04	1.650E+01	2.70E-06	2.05166E-08	5.53948E-14	1.60E-12	1.60E-06	5.54E-08	9.653E-01	3.651E-02	2.014E-13	646	1292	2.36
1.00E+10	10000	3.65	1.38E-05	7.242E+04	1.380E+01	4.62E-06	4.60781E-08	2.12881E-13	1.81E-12	1.81E-06	2.13E-07	8.825E-01	3.222E-02	1.778E-13	725	1450	2.65
5.00E+10	50000	5.47	9.18E-06	1.089E+05	9.180E+00	1.48E-06	6.58681E-08	9.74848E-14	1.91E-12	1.91E-06	9.75E-08	9.489E-01	3.057E-02	1.687E-13	1070	2140	3.92
1.00E+11	100000	6.54	7.70E-06	1.298E+05	7.700E+00	2.58E-06	1.47298E-07	3.80029E-13	2.29E-12	2.29E-06	3.80E-07	8.339E-01	2.550E-02	1.407E-13	1240	2480	4.54
5.00E+11	500000	9.78	5.12E-06	1.952E+05	5.120E+00	1.14E-06	2.1081E-07	2.40324E-13	2.53E-12	2.53E-06	2.40E-07	9.050E-01	2.307E-02	1.273E-13	1790	3580	6.56
1.00E+12	1000000	11.7	3.98E-06	2.510E+05	3.980E+00	1.86E-06	4.87932E-07	9.07554E-13	3.44E-12	3.44E-06	9.08E-07	7.359E-01	1.698E-02	9.368E-14	2110	4220	7.75
5.00E+12	5000000	17.8	2.12E-06	4.728E+05	2.120E+00	5.80E-07	6.98681E-07	4.05235E-13	3.84E-12	3.84E-06	4.05E-07	8.945E-01	1.519E-02	8.380E-14	3110	6220	11.4
1.00E+13	10000000	21.3	1.54E-06	6.474E+05	1.540E+00	7.96E-07	1.17722E-06	9.37063E-13	4.78E-12	4.78E-06	9.37E-07	8.039E-01	1.221E-02	6.737E-14	4410	8820	16.1
2.71E+13	27107359	27.6	1.00E-06	1.000E+06	1.000E+00	4.57E-07	1.61663E-06	7.38798E-13	5.52E-12	5.52E-06	7.39E-07	8.661E-01	1.057E-02	5.835E-14	4630	9260	17
5.00E+13	50000000	32.4	7.44E-07	1.344E+06	7.440E-01	4.82E-07	2.31837E-06	1.11746E-12	6.63E-12								
1.00E+14	100000000	38.8	5.43E-07	1.840E+06	5.430E-01	3.59E-07	5.34257E-06	1.91798E-12	8.55E-12								
5.00E+14	500000000	58.9	2.62E-07	3.819E+06	2.620E-01	2.00E-07	7.65417E-06	1.52777E-12	1.01E-11								
1.00E+15	1000000000	70.5	1.84E-07	5.434E+06	1.840E-01	1.45E-07	1.76314E-05	2.55479E-12	1.26E-11								
5.00E+15	5000000000	107	6.24E-08	1.604E+07	6.240E-02	4.91E-08	2.52313E-05	1.23886E-12	1.39E-11								
1.00E+16	1E+10	128	3.91E-08	2.556E+07	3.910E-02	3.08E-08	5.85584E-05	1.80243E-12	1.57E-11								
5.00E+16	5E+10	195	1.33E-08	7.544E+07	1.330E-02	1.05E-08	8.4324E-05	8.83716E-13	1.66E-11								
1.00E+17	1E+11	234	8.32E-09	1.202E+08	8.320E-03												
5.00E+17	5E+11	355	2.82E-09	3.549E+08	2.820E-03												
		Summe bis 1 Mio a	2.99E-01	Summe	2.990E+05												
					2.990E+05			5.51754E-12		3.97E-05							

Literaturverzeichnis

- BLAND, P. A (2005): The impact rate on Earth. - Phil. Trans. R. Soc. A, 363: 2793-2810.
- BLAND, P. A. & ARTEMIEVA, N. A. (2006): The rate of small impacts on Earth. - Meteoritics and Planetary Science, 41: 607-631.
- HOLSAPPLE, K. (1993): The Scaling of Impact Processes in Planetary Sciences. - Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 21: 333-373.
- HOLSAPPLE, K. (2003): Crater Sizes from Explosions or Impacts v. 1.4 (with additions from Mr. Raman Narayan). - William E. Boeing Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington - <http://keith.aa.washington.edu/craterdata/scaling/index.htm>, abgerufen 13.08.2013.
- KAPLAN, E. L. & MEIER, P. (1958): Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. - Journal of the American Statistical Association, 53: 457-481.
- KRINOV, E. N. (1974): Fragmentation of the Sikhote-Alin meteoritic body. - Meteoritics, 9: 255-262.
- MELOSH, H. J. (1989): Impact cratering: a geologic process: 245 S., 143 Abb., 17 Tab.; New York (Oxford University Press) - ISBN 0195042840.

Abkürzungsverzeichnis

CCDF Komplementäre kumulative Verteilungsfunktion

CDF Kumulative Verteilungsfunktion

D_f Finaler Kraterdurchmesser

D_n minimaler Durchmesser eines Impaktkraters im Größenbereich n

D_{n+1} maximaler Durchmesser eines Impaktkraters im Größenbereich n

p_n lokale Wahrscheinlichkeit der Entstehung eines Impaktkraters

P_n globale Wahrscheinlichkeit der Entstehung eines Impaktkraters

S_C Fläche eines Kraters

S_E Oberfläche der Erde

Tabellenverzeichnis	Seite
---------------------	-------

Tab. 1: Gesamtdarstellung der Daten und Berechnungen (Spalten 1 bis 5 nach BLAND & ARTEMIEVA 2006).....	15
---	----

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Zur Bestimmung der theoretischen Mindestmasse für die Bildung von Impaktkratern: Vergleich der prognostizierten Kraterdurchmesser mit dem Potenzgesetz $D_f(m) = 0,1959 \cdot (m - 0,00603)^{0,3788}$	8
Abb. 2: Zur Bestimmung der Obergrenze des während 1 Million Jahre zu erwartenden Kraterdurchmessers durch ein an die prognostizierten Daten angepasstes Potenzgesetz.....	11
Abb. 3: Lokale kumulative Häufigkeit der Bildung von Kratern größer als ein gegebener Durchmesser.....	12
Abb. 4: Lokale kumulative Häufigkeit von Impakten, die mindestens zu einer gewissen Zerrüttungstiefe führen.....	13