

Asteroiden und Meteorite werden also nur aufgrund der Größe unterschieden, wobei die Grenze aber keinesfalls scharf definiert ist.

Fast alle Objekte befinden sich im sogenannten Asteroidengürtel, einem relativ schmalen Gebiet zwischen den Umlaufbahnen der Planeten Mars und Jupiter (Abbildung 1). Durch Stöße der Asteroiden untereinander und aufgrund von Störungen Jupiters auf die Körper, werden bisweilen einige Asteroiden aus dem Asteroidengürtel herauskatapultiert. Ein Teil dieser Objekte gerät auf Umlaufbahnen, die sie in das innere Sonnensystem und in Erdnähe führen.

In jeder wolkenlosen Nacht zeigen die Sternschnuppen, daß die Erde unentwegt aus dem Weltraum bombardiert wird. Mit Geschwindigkeiten von etlichen Kilometer pro Sekunde treffen diese Teilchen auf die Lufthülle unseres Planeten. Während ihres Sturzes durch die immer dichter werdende Atmosphäre heizen sich die Partikel auf und verglühen. Größere Meteorite überstehen die Erhitzung und gelangen schließlich zum Boden. Auf ihnen beruht der größte Teil unseres Wissens über die mineralogische Zusammensetzung der Asteroiden.

Obwohl viele Berichte kursieren, nach denen Menschen durch herabfallende Meteorite verletzt wurden, gibt es in der westlichen Welt keine zweifelsfrei dokumentierten Todesfälle. Lediglich in chinesischen Chroniken finden sich entsprechende Hinweise. So fiel beispielsweise im Jahre 616 ein Meteorit in ein Rebellenlager, zerstörte Kriegsgeschütze und tötete mehrere Menschen [1].

Das Gefahrenpotential

Weder Sternschnuppen noch Meteorite bereiten den Wissenschaftlern Kopfzerbrechen, wohl aber seit einigen Jahren die großen Körper, angefangen bei hausgroßen Brocken bis hin zu Felsen mit einigen Kilometern Durchmesser. Diese können die Atmosphäre nahezu unbeschadet durchqueren und bilden eine stete Gefahr für Menschen und prinzipiell sogar für die menschliche Zivilisation [2].

Trifft solch ein Asteroid auf die Erdatmosphäre, entscheiden Masse, Mineralogie und Geschwindigkeit über sein weiteres Schicksal. Zunächst wird die Oberfläche durch die Reibungshitze aufgeschmolzen. Bei kleineren Objekten bis etwa 100 m Durchmesser gelangt die Hitze durch Wärmeleitung in das

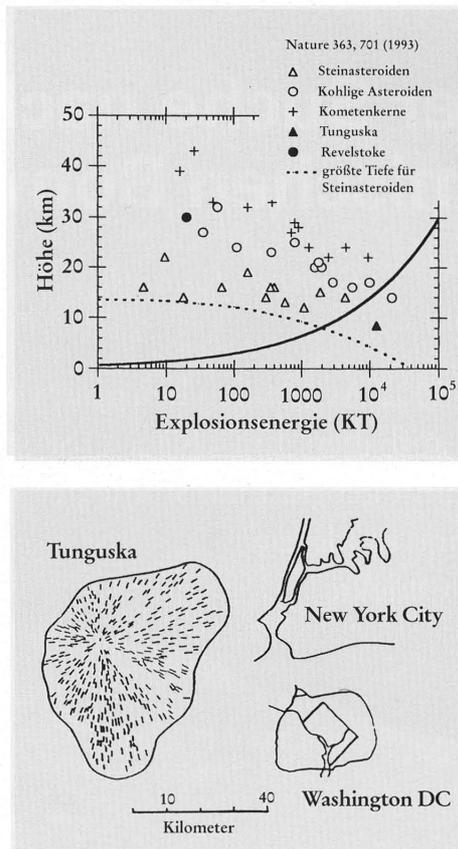


Abb. 2. Explosionshöhe erdnahe Asteroiden in Abhängigkeit von der freigesetzten Energie. Die offenen Symbole bezeichnen zwölf bekannte Asteroiden mit Durchmessern zwischen fünf und zehn Meter, wobei angenommen wird, daß alle Objekte eine bestimmte Zusammensetzung aufweisen. Zwei historische Asteroiden werden durch ausgefüllte Symbole dargestellt: ▲ Tunguska, ● Revelstoke. Die durchgezogene Linie, bei der die Druckwelle keine Schäden am Boden hinterläßt, liegt mit zwei Ausnahmen unterhalb der Symbole. Die gepunktete Linie bezeichnet die von der Energie abhängige Höhe, bei der Steinasteroiden explodieren [8].

Abb. 3. 1908 verwüstete der Tunguska-Meteorit ein Gebiet von einigen tausend Quadratkilometern. Die Skizze vergleicht dieses Gebiet mit den amerikanischen Städten New York und Washington, DC. [2].

Innere und verformt den Asteroiden. Durch mechanische Spannungen zerbrechen diese Körper in einigen Kilometern Höhe, wobei die kinetische Energie in einen Feuerball und eine Druckwelle dissipiert wird. Die Überreste eines Steinasteroiden gelangen danach mit der Frei-Fall-Geschwindigkeit zu Boden, wo sie kleinere Krater hinterlassen. Lediglich Eisenasteroiden überstehen den Sturz durch die Atmosphäre nahezu unbeschadet und erzeugen größere Krater, wie denjenigen in der Wüste von Arizona.

In Abhängigkeit von der Höhe verteilt sich die freigesetzte Energie in der Atmosphäre ohne Schaden anzurichten (Abbildung 2). Am Auftreffpunkt können aber auch Brände entzündet und durch die Druckwelle Bäume gefällt oder Gebäude beschädigt werden. Dieses Szenario ähnelt dem einer Atombombenexplosion in der Atmosphäre. Die Formeln zur Berechnung der Schäden wurden bei Atomwaffentests entwickelt [8].

Als historisches Beispiel gilt der Tunguska-Meteorit, der 1908 in der Nähe des sibirischen Flusses Tunguska niederging (Abbildung 3). Insgesamt wurde ein Gebiet von mehr als 2000 km² verwüstet, mehr als 20 km im Umkreis um die Einschlagstelle (entsprechend der Größe Berlins) wurden Bäume geknickt und Waldbrände entzündet. Noch in 40 km Entfernung konnten Schäden festge-

stellt werden. Als Ursache gilt ein Asteroid von etwa 60 m Durchmesser, der in 8,5 km Höhe explodierte und dabei eine Energie von etwa 10 MT freisetzte [3]. Das entspricht etwa der Energie einer großen Wasserstoffbombe.

Asteroiden mit mehr als 100 m Durchmesser können den Boden erreichen und Krater von mehreren Kilometern Durchmesser hinterlassen. Da ein Teil der kinetischen Energie bei der Kraterbildung verbraucht wird, ist die Gesamtfläche der Zerstörung wahrscheinlich nicht größer, als wenn ein kleinerer Asteroid in der Atmosphäre explodiert.

Was für Folgen haben Einschläge von Asteroiden mit Durchmessern zwischen einem Kilometer und fünf Kilometer? Atomwaffentests bieten hier keine Hilfe mehr. Aufgrund von Schätzungen, die zum Teil auf geologischen Daten beruhen, wird vermutet, daß sie Krater von 10 bis 15 km Durchmesser erzeugen. Große Mengen Staub werden dabei in die Stratosphäre geblasen, wo sie über Jahre hinweg verbleiben. In Analogie zum sogenannten nuklearen Winter würden die Lufttemperaturen um einige Grad fallen und weltweite Ernteausfälle und Hungersnöte wären die Folge. Statistisch erfolgen solche Einschläge etwa alle 300 000 Jahre. Noch seltener sind Einschläge von Asteroiden mit mehr als fünf Kilometer Durchmesser. Nur alle 10 bis

30 Millionen Jahre finden solche Ereignisse statt. Das sogenannte KT-Ereignis, das vor 65 Millionen Jahren am Übergang vom Kreide zum Tertiärzeitalter stattfand und zu einem Massenaussterben verschiedener Lebensformen, darunter der Dinosaurier, führte, soll durch einen Asteroiden dieser Größe verursacht worden sein (Abbildung 4).

Die erdnahen Asteroiden

Über 150 der bekannten Asteroiden befinden sich auf Umlaufbahnen, die sie in die Nähe der Erde bringen. Alle derartigen Körper werden als Near Earth Objects (NEO) bezeichnet. Zu ihnen gehören auch Kometen, von denen sich viele auf Umlaufbahnen zwischen Jupiter und der Sonne befinden, die sie alle paar Jahre in die Nähe der Erdbahn führen. Sie machen jedoch nicht mehr als ein Prozent der NEO aus, so daß wir sie im folgenden vernachlässigen können.

Keiner der bislang bekannten erdnahen Körper bildet eine akute Gefahr. Mond, Mars, Merkur und die Monde der großen Planeten zeigen jedoch, daß Asteroiden aller Größe im ganzen Sonnensystem anzutreffen sind und auch heute noch die Planetenoberflächen verändern. Besonders die kraterzerfurchte Oberfläche des Mondes gibt wertvolle Hinweise auf die wirkliche Population der erdnahen Asteroiden. Aus der Größenstatistik der Mondkrater und aus Modellen zur Kraterentstehung bestimmt man die Größe der Objekte, welche diese Krater erzeugten. Die Anzahl N der NEO in Abhängigkeit von ihrem Durchmesser D wird durch ein Potenzgesetz der Form

$$N \sim D^b \tag{1}$$

beschrieben.

Integriert man zwischen verschiedenen Durchmessern, so erhält man die Zahl aller Asteroiden, die größer sind als ein gegebener Durchmesser (Abbildung 5). Demzufolge gibt es 320 000 Asteroiden, die größer als 100 m sind! Zu diesen gesellen sich noch die sogenannten kurzperiodischen Kometen (mit Umlaufzeiten bis etwa fünf Jahren), die jedoch, wie gesagt, nur ein Prozent zur Zahl der Objekte beitragen.

Langperiodische Kometen bilden eine weitere Komponente der erdnahen Objekte. Pro Jahr werden etwa drei neue langperiodische Kometen entdeckt, deren Größe zwischen drei

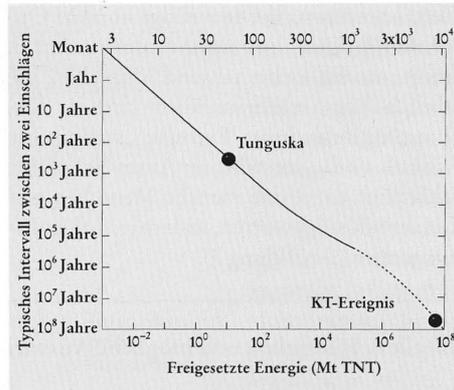


Abb. 4. Zeitraum zwischen zwei Asteroidentreffern, aufgetragen über der freigesetzten Energie. Bei 0,01 MT beträgt die Unsicherheit in den Einschlagfrequenzen einige Monate, bei 100 MT einige zehn Millionen Jahre. Die am oberen Rand angegebenen Durchmesser beruhen auf der Annahme, daß die Asteroiden eine Geschwindigkeit von 20 km s^{-1} und eine Dichte von 3 g cm^{-3} besitzen. Eingezeichnet sind der Tunguska-Meteorit von 1908 sowie das Ereignis in der Übergangszeit zwischen Kreide und Tertiär vor 65 Millionen Jahren [4].

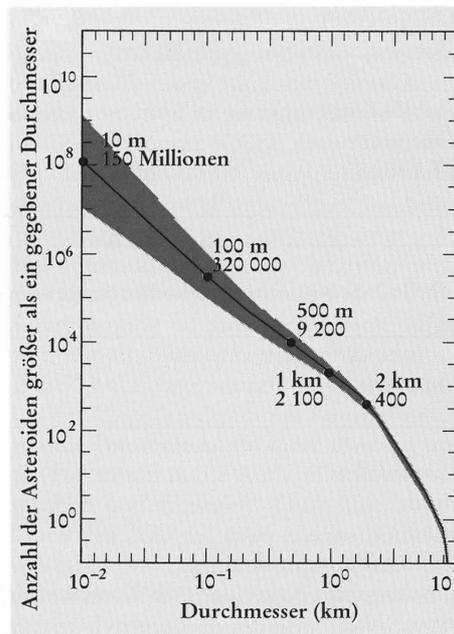


Abb. 5. Anzahl der erdnahen Asteroiden, größer als ein gegebener Durchmesser. Die Zahlen beruhen auf Beobachtungen der erdnahen Asteroiden, der Analyse von Mondkratern und geologischen Daten. Der Fehlerbereich wird durch die rot markierte Fläche eingegrenzt. Kometen erhöhen die angegebenen Werte um etwa ein Prozent [2].

und acht Kilometer beträgt. Da sie sich mit höherer Geschwindigkeit bewegen als die Körper im inneren Sonnensystem, tragen langperiodische Kometen auch stärker zum Fluß derjenigen Objekte bei, welche die Erde treffen. Allein 25 % des gesamten Risikos wird durch sie verursacht.

Statistische Risiken

Interessant ist die Risikoanalyse, die sich aus der statistischen Häufigkeit von Asteroidentreffern ableiten läßt. In die Risikoschätzung gehen die Häufigkeit der Asteroiden, die davon betroffene Landfläche und die Bevölkerungsdichte in dem jeweiligen Gebiet ein.

Ein großer Asteroid mit einem Durchmesser von ein bis zwei Kilometer, der weltweite Auswirkungen hat, schlägt einmal in 500 000 Jahren auf der Erde ein (siehe Tabelle 1 und Abbildung 6). Da solche Ereignisse jede menschliche Erfahrung übersteigen, definierten einige Autoren die globale Katastrophe so, daß mindestens ein Viertel der Weltbevölkerung bei einem solchen Ereignis getötet wird. Das Risiko für jeden Menschen beträgt dann ein Viertel. Zusammen mit der jährlichen Wahrscheinlichkeit eines Treffers von $1/500\,000$ folgt, daß die jährliche Wahrscheinlichkeit durch einen großen Asteroiden zu sterben $1 \text{ zu } 2\,000\,000$ beträgt, etwas höher als die Gefahr in Amerika durch Botulismus (eine durch Bazillen hervorgerufene Form der Lebensmittelvergiftung) umzukommen (siehe Tabelle 2).

Ein Tunguska-artiger Asteroid verwüstet ein Gebiet von etwa 5000 km^2 (grob $1/30000$ der Erdoberfläche ohne Ozeane). Wäre die Weltbevölkerung gleichmäßig verteilt, so ergäbe sich eine jährliche Wahrscheinlichkeit von etwa $1 \text{ zu } 30$ Millionen, fünfzehn Mal geringer als bei einem Einschlag mit weltweiten Folgen (Abbildung 6).

Zwar bedeuten diese Zahlen, daß rein statistisch pro Jahr etwa 3000 Menschen durch einen großen, beziehungsweise 200 Menschen durch einen kleinen Asteroiden getötet werden (bei einer Weltbevölkerung von 6 Milliarden Menschen). Ein grundlegender Unterschied zwischen dem Risiko von Asteroidentreffern und eher normalen Katastrophen darf jedoch nicht vergessen werden: Der Einschlag eines großen Asteroiden ist ein äußerst seltenes, einmaliges Ereignis, das weltweite Konsequenzen auslöst. Tornados, Überschwemmungen oder Autounfälle gehören