

Die globale Wirkung von „Supervulkanen“

(vorgetragen in der Plenarsitzung am 9. Mai 2008)

GERHARD WÖRNER

Die geologische und klimatische Entwicklung unserer Erde bestimmt in großem Maße die Evolution der Pflanzen und der Tiere. Meeresspiegel wechseln als Folge der Öffnung und der Schließung von Ozeanen über Zeiträume von mehreren 10er Millionen von Jahren. Hierbei werden junge Ozeanbecken mit junger Ozeankruste neu gebildet und alte, kalte Ozeankruste durch Subduktion in den Erdmantel zurückgeführt. Dieser Wechsel des Meeresspiegels schafft neue Lebensräume, die die Evolution begünstigen. Die Verteilung der Kontinente auf dem Globus sowie die Bildung und die Zerstörung von Landbrücken (s. Mittelamerika) hängen ab von den Bewegungen der Erdplatten und bestimmen so die Meeresströmungen und beeinflussen Eiszeiten, globale Temperaturen und wiederum den Meeresspiegel.



Gerhard Wörner, Professor für Geochemie an der Georg-August-Universität Göttingen, O. Mitglied der Göttinger Akademie seit 2003

Diese Prozesse bedingen sehr langsame, kontinuierliche Änderungen der Lebensbedingungen auf unserem Planeten, diese sind oft Motor der Evolution. Kontinuierliche Entwicklung wurde und wird in der Erdgeschichte immer wieder unterbrochen von katastrophalen Ereignissen, die das Leben selbst bedrohen und die Evolution in neue Bahnen lenken. Das wohl bekannteste Beispiel ist der Einschlag eines Meteoriten an der Wende der Kreide- zur Tertiärzeit vor 65 Millionen Jahren. Dieses „Event“ wird mit dem Aussterben der Dinosaurier und mit dem Beginn des evolutionären „Aufstiegs“ der Säugetiere in Verbindung gebracht. Ähnliche „Aussterbereignisse“ in der früheren Erdgeschichte (z. B. Wende Perm/Trias) werden ebenfalls mit Einschlägen großer Meteoriten erklärt. Jedoch sind die Befunde nicht immer eindeutig, und es gibt alternative Überlegungen, die

große vulkanische Flutbasalteruptionen verantwortlich sehen. Dies lenkt unsere Aufmerksamkeit von den Meteoriteneinschlägen weg und hin zu der Frage: Was ist die Wirkung großer Vulkaneruptionen auf die globalen Lebensbedingungen und auf evolutionäre Prozesse?

Tambora-Vulkan 1815:

100 km³ eruptiertes Magma

200 Millionen Tonnen SO₂ in der Atmosphäre, weltweit klimatische Effekte, 90.000 Tote

„In den Bergen aß man Silberdisteln und Brennesseln, in der Eifel Heu und Stroh.“

1815, das erste Jahr nach den Napoleonischen Kriegen: wegen unergiebigter Ernten war die Versorgung der Bevölkerung schlecht. 1816 ist ein „Jahr ohne Sommer“. In Mitteleuropa ist es um 1,4 Grad Celsius kühler als im längerfristigen Durchschnitt, mit den niedrigsten Mittelwerten, seit diese in Europa gemessen und aufgezeichnet werden.

„Im Mai und Juni fast täglich Regen und Gewitter, so daß die Äcker versoffen und Weinberge rutschten. Großer Hagelschlag und Überschwemmungen. Der Scheffel Dinkel, den man noch um Pfingsten um 5–6 Gulden kaufte, kostete im Juli schon 12–15 Gulden. Den 31. Juli schneite es auf der [Schwäbischen] Alb [...] Die Wintersaat mußte man zum Theil in den Schnee säen.“

Diese kleine Auswahl von Berichten (zitiert aus Vasold, 1994) zeigt, dass die Toba-Eruption in Indonesien, die mit 100 km³ Magma ein noch relativ kleines Ausmaß hatte, weltweit klimatische Effekte und Mangelversorgung ausgelöst hat. Ähnliche Berichte gibt es von der Laki-Eruption 1783/84 in Island, die zu Temperaturreduzierungen von mehr als einem Grad über zwei Jahre führte. Nordeuropa war überzogen von schwefelhaltigem Smog. Ob die dadurch bewirkte Mangelversorgung die Französische Revolution (mit-) ausgelöst haben könnte, ist allerdings sehr umstritten, zweifelsohne aber waren die erniedrigten Temperaturen und die Missernten in den folgenden Jahren vor allem für das einfache Volk drastisch spürbar.

Es ist keine Frage: Eruptionen der Größenordnung von Tambora und Laki treten in der geologischen Geschichte relativ häufig, etwa alle 100 bis 1000 Jahre auf, und je nachdem, wo sie sich ereignen, haben sie verheerende lokale und immer auch schwerwiegende globale Klimawirkungen, die mehrere Jahre andauern können. Ihre Häufigkeit bedingt, dass Eruptionen dieser Größenordnung schon mehrfach in der jüngeren Menschheitsgeschichte aufgetreten sind, mit offensichtlich möglichen schweren Folgen. Im Vergleich zu den „Champions“, den wirklich großen Eruptionen, gehören diese Ereignisse allerdings höchstens in die Regionalliga.

Hotspots, Plumes und Flutbasalte

Die Dynamik des Erdmantels und die Abkühlung der ozeanischen Lithosphärenplatten führen zum Absinken dieser Platten und deren Subduktion in den Mantel. In der Folge werden neue Ozeane gebildet, dort weichen die Platten auseinander, und der Mantel steigt nach oben, schmilzt partiell auf, und die Magmen bilden so neue ozeanische Kruste. An einigen Stellen der Erde jedoch steigen heiße Gesteinsströme punktuell nach oben und bilden relativ ortsfeste „Hotspots“. Hawaii und Island sind gute Beispiele dafür. Diese Hotspots werden gespeist aus den „Plumes“, von denen viele – so vermutet man – ihren Ursprung im heißen, unteren Mantel haben. Solche Plumes können, etwa im Falle von Hawaii, über 80 Millionen Jahre aktiv sein. Wie aber entstehen sie, wie beginnen sie? Diese Frage wird von Geophysikern und Geochemikern bearbeitet, und nach deren Forschungen entstehen die großen Plumes im unteren Mantel, möglicherweise an der Kern-Mantel-Grenze in 2900 km Tiefe, von wo sie zunächst langsam als heiße, aber feste Gesteinsmasse aufsteigen. Dabei vergrößert sich der Plume-Kopf und vermischt sich mit dem umgebenden Mantel. Erst wenn dieser Plume-Kopf die Basis der Lithosphärenplatten in etwa 100 km Tiefe erreicht, hat sich der Druck soweit reduziert, dass das nun sehr große Volumen an heißem Mantelmaterial aufschmelzen kann. Die Folge sind große Mengen von Basaltmagma, das in so genannten Flutbasaltprovinzen an die Erdoberfläche tritt. Beispiele solcher Basaltfluten gibt es in Indien (67 Ma, Deccan-Provinz) und in Sibirien (250.32 ± 1.1). Das Alter der sibirischen Flutbasaltprovinz fällt exakt zusammen mit dem größten Aussterbeereignis in der Erdgeschichte: An der Wende vom Paläozoikum zum Mesozoikum vor 249 ± 0.14 (Reichow et al., 2009) Ma sind ca. 95 % aller mehrzelligen Arten ausgestorben.

Das Onton-Java-Plateau (122 Ma) ist mit 36 Millionen km^3 das größte bekannte durch einen Plume gebildete Basaltereignis. Die Eruptionsrate wird auf 12 km^3 Magma pro Jahr geschätzt. Allerdings ist unter den genannten Flutbasaltereignissen dieses das einzige, das sich im ozeanischen Milieu überwiegend submarin ausgebreitet hat (Tabelle 1).

Eine globale Wirkung von Flutbasaltprovinzen mit möglichem Einfluss auf die Evolution (und Aussterbeereignisse in der Erdgeschichte, Abbildung 1) vermutet man deshalb, weil die großen Volumina von Basaltmagma in kurzer Zeit große Mengen an SO_2 in die Atmosphäre tragen (Rampino, 2001; Rampino und Stothers, 1988). Einzelne Lavaströme dieser Flutbasaltprovinzen (Abbildung 2) haben Volumina von bis zu 1000 km^3 , deren Freisetzung von Schwefel-Dioxid von Self et al. (2008) auf 5.4×10^3 bis

Tabelle 1: Flutbasalt-Provinzen

Name	Alter (Ma)	Fläche Mio km ²	Volumen Mio km ³	Eruptionsrate km ³ /a	Aussterbeereignis
Columbia River Plateau	16–18	0.16	0.17	0.017	14±2
Aden/Yemen/Afar	20–29	0.75	2.0	>1	35±1
North Atlantic	53–63	0.61	>2	>1	65±1
Deccan	66±1	>1.0	>1.5	>1.5	65±1
Parana/Etendeka	110–130	1.3	1.5	0.75	137±1
Ontong-Java	122		35	12	?
Sibirien	250.3±1.1	2.5	1.0	1.0	249.25±0.14

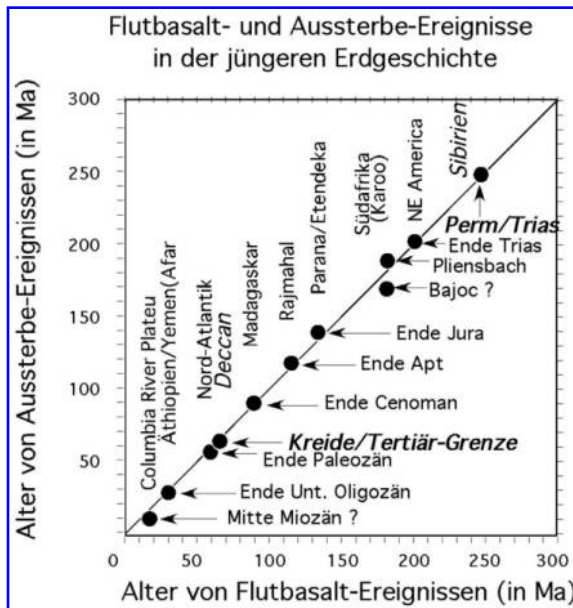


Abbildung 1: Alter von Flutbasalteruptionen und Aussterbeereignisse in den letzten 250 Millionen Jahren (modifiziert nach Rampino und Stothers, 1988)

3.6×10^3 Tg an SO_2 abgeschätzt wurde. Diese Mengen wurden vermutlich innerhalb weniger Jahre gefördert. Die Freisetzungsrates an SO_2 -Gas von ca. einer Million Tonnen SO_2 pro Jahr basieren auf Mikromessungen von kleinen, nichtentgastem Glaseinschlüssen in Mineralen und auf deren Vergleich mit SO_2 -ärmerem, entgastem Basaltglas. Die Rate errechnet sich dann aus der Differenz im Schwefelgehalt zwischen Lavastrom und Glaseinschlüssen sowie der Masse des Lavastroms und der Dauer einer solchen



Abbildung 2: Lavaströme der Ferrar-Provinz (178 Ma, Molzahn et al., 1996) in der Antarktis. Die Mächtigkeit der Ablagerung beträgt hier über 1000m, sie erstreckt sich über mehrere tausend Kilometer entlang dem Transantarktischen Gebirge (Foto: Wörner).

Eruption. Zahllose Lavaströme dieses Ausmaßes sind in den Flutbasalten innerhalb einer Million Jahre dokumentiert. Rampino, Self und andere Forscher schließen daraus, dass Flutbasaltereignisse in der Erdgeschichte einen „vulkanischen Winter“ erzeugt haben können, mit globalen Auswirkungen auf das Klima und die Lebensbedingungen auf unserem Planeten. Die Wiederkehrrate solcher Ereignisse betrug in der jüngeren Erdgeschichte ca. 33 Millionen Jahre (Abbildung 1), und dies belegt, dass der Gang der Evolution zum Teil durch tief im Erdmantel verursachte Umwälzungen beeinflusst wird.

Supervulkane anderer Art sind die großen explosiven Eruptionen aus langlebigen (> 1 Ma) Magmakammern in der Erdkruste. Die Magmenproduktion kann an einigen Stellen im Erdmantel so groß sein, dass sich Magma in der Erdkruste über längere Zeit ansammelt, sich dort durch Kristallisation in seiner Zusammensetzung ändert und sich so zu „hochdifferenzierten“, gasreichen Magmen entwickelt. Kommt es zu einer Eruption aus einer solchen Magmakammer, kann innerhalb weniger Tage und Wochen ein Magmavolumen von Hunderten bis Tausenden von Kubikkilometern explosiv gefördert werden. In der Regel bricht dann das Dach der Magmakammer ein, und es bilden sich große Einbruchskrater, die – wie zum Beispiel im Falle der Yellowstone-„Caldera“ – einen Durchmesser von über 80 km haben können (Abbildung 3).

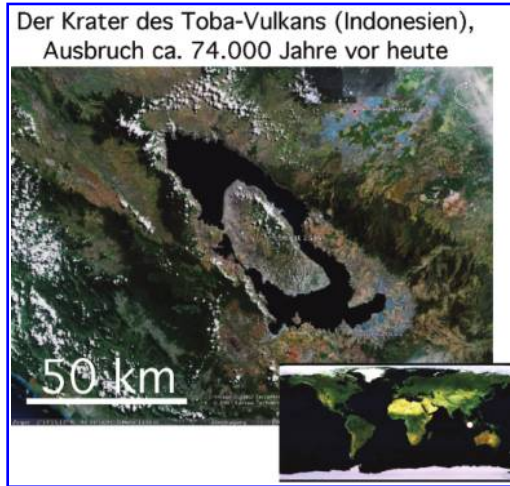


Abbildung 3: Die Toba-Caldera auf Sumatra (modifiziert nach Google Earth)

Die Eruptionen von solchen Supervulkanen (Tabelle 2) fördern Asche, Bimsstein und Gas in Form von Fallablagerungen und Glutlawinen, der Feinanteil und die Gase in Massen von 1000 Megatonen erreichen die Stratosphäre und verbreiten sich über die gesamte Hemisphäre – mit weitreichenden Wirkungen.

Tabelle 2: Supervulkane und eine Auswahl großer, im Text erwähnter historischer Eruptionen

Name	Ort	Alter	Eruptiertes Volumen
Yellowstone Caldera	USA	2,2 Mio J.	2.500 km ³
	USA	1,3 Mio J.	280 km ³
	USA	0,64 Mio J.	1.000 km ³
Long Valley Caldera	USA	0,76 Mio J.	600 km ³
Toba Caldera	Sumatra	73.500 J.	2.800 km ³
Phlegräische Felder	Italien	39.000 J.	300 km ³
		14.000 J.	50 km ³
Taupo	Neuseeland	26.500 J.	800 km ³
Laacher See	Deutschland	13.065 J.	6 km ³
Santorini	Griechenland	1628 v. Chr.	61 km ³
Vesuv	Italien	79 v. Chr.	4 km ³
Lakiv	Island	1783/84	15 km ³
Tambora	Indonesien	1815	100 km ³
Mt. St. Helens	USA	1980	3 km ³

Die Toba-Eruption (Abbildung 3) vor ca. 73.500 Jahren gehört zu den größten in der jüngsten Erdgeschichte (< 2 Ma) dokumentierten Eruptionen dieser Art. Die Eruptionssäule erreichte vermutlich über 30 km Höhe, und es wurden 10^{10} Tonnen Asche und H_2SO_4 -Aerosole in die Atmosphäre geschleudert (Abbildung 5: Rampino und Self, 1993). Die Aerosole verweilten bis zu 6 Jahren in der Atmosphäre, die Folge war ein „vulkanischer Winter“ mit durchschnittlich 3 bis 5°C niedrigeren Oberflächentemperaturen weltweit. Eisbohrkerne (Summit, Grönland) zeigen für die Tambora-Eruption (Abbildung 5) eine ca. 6-jährige Periode (71.100 ± 5.000 a b.p.) mit stark erhöhtem SO_4^{2-} -Signal in der Atmosphäre an (Rampino and Self, 1992). Dies hatte drastische Folgen für die Vegetation. Temperaturmodellierungen (Jones et al., 2005) zeigen, dass die tropische Vegetation zu 100 % ausgelöscht und Pflanzen in gemäßigten Breiten auf 50 % reduziert wurden. Die Folgen für die frühe Menschheit waren vermutlich ebenfalls verheerend. Genetische Studien (Ambrose, 1998; Rampino und Ambrose, 2000) zeigen, dass die Zahl der überlebenden Menschen möglicherweise auf nur einige wenige Tausende reduziert wurde (Abbildung 4).

Supereruptionen wie die des Toba-Vulkans auf Sumatra treten in der Erdgeschichte etwa alle 50.000 Jahre auf, also 10- bis 15-mal so häufig wie große Meteoriteneinschläge. Die Energiefreisetzung einer solchen Eruption (10^{22} Joule) ist ebenfalls größer als bei den meisten Impaktereignissen. Supereruptionen stellen damit eine weit größere und realere Bedrohung für die Menschheit und die Zivilisation dar. Die letzte Supereruption in den Vereinigten Staaten hatte ihren Ursprung vor 640.000 Jahren in der Yellowstone-Caldera (Abbildung 6). Noch in 1.500 km Entfernung wurde eine Aschenlage von etwa einem Meter abgelagert. Es besteht unter Vulkana-

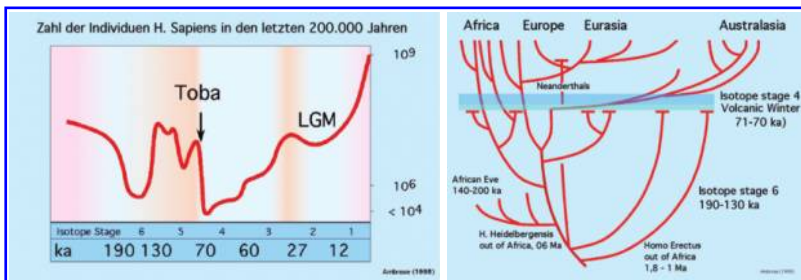


Abbildung 4: (links): Zahl der lebenden Individuen von Homo Sapiens mit extremem Rückgang vor ca. 74.000 Jahren (Ambrose et al., 1998). (rechts): Genetische Entwicklung der Hominiden mit weitgehendem Rückgang der genetischen Vielfalt („human bottleneck“) vor ca. 74.000 Jahren (modifiziert nach Harpending et al., 1993)

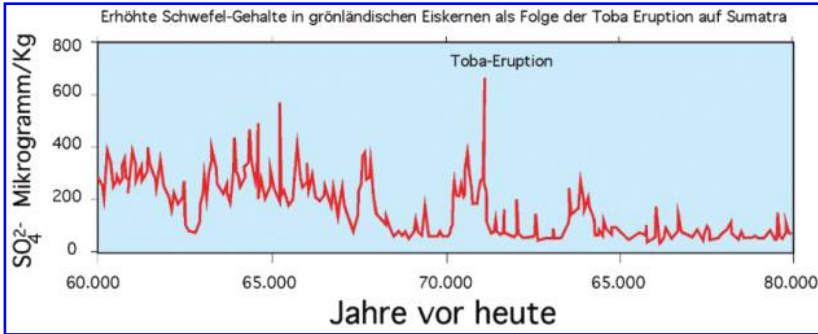


Abbildung 5: Erhöhung der Schwefelgehalte durch die Toba-Eruption in Eisbohrkernen Grönlands (modifiziert nach Zielinsky et al., 1996)

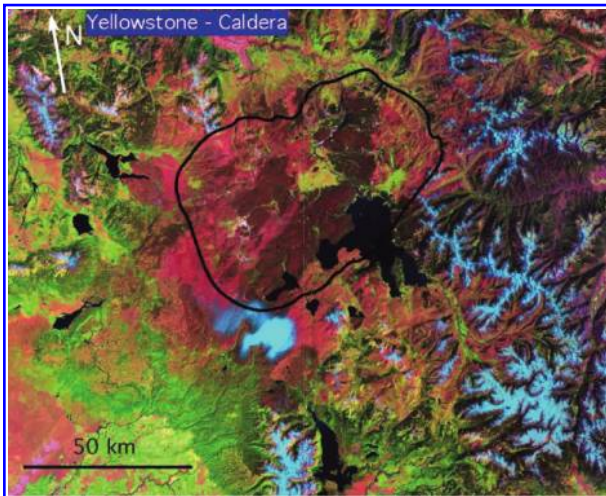


Abbildung 6: Satellitenbild und Umriss der Yellowstone-Caldera. Aus diesem Einbruchskrater wurden in den letzten ca. 2 Millionen Jahren in drei großen Eruptionen jeweils Magmenvolumina von 280 bis 2500 km^3 gefördert. Die Yellowstone-Caldera liegt über einer noch immer aktiven Magmakammer, die durch den Yellowstone-Plume im Erdmantel gespeist wird. Mit weiteren Eruptionen ähnlichen Ausmaßes ist jederzeit zu rechnen

nologen kein Zweifel daran, dass eine Eruption dieser Größenordnung im Grunde jederzeit wieder möglich ist, nicht nur am Yellowstone-Vulkan. Die sozioökonomischen Folgen eines solchen Ereignisses sind schwer abzuschätzen, man kann jedoch vermuten, dass Transport, Handel, Kommunikation und Ernährung weltweit in ganz erheblichem Maße betroffen oder sehr eingeschränkt sein oder gar ganz zum Erliegen kommen würden. Abbil-

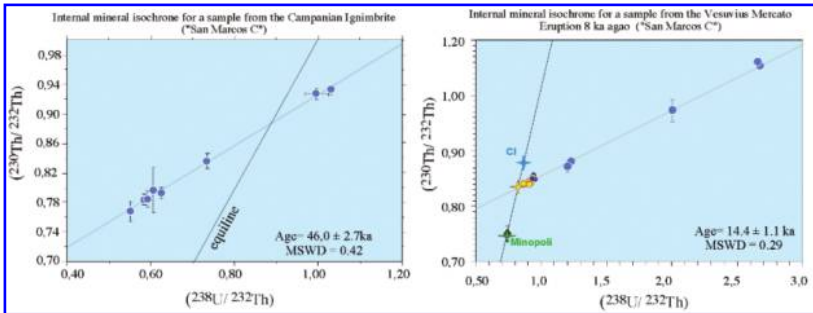


Abbildung 8: So genannte „Mineralisochronen“ von Eruptionsprodukten des Campanischen Ignimbrits und der Mercato-Bimsablagerung des Vesuv. Diese Isochronen basieren auf massenspektrometrischen Analysen von kurzlebigen Isotopen der U-Zerfallsreihe und erlauben die Datierung des Alters von Mineralen im Vulkangestein. Diese Altersdaten können dann verglichen werden mit dem tatsächlichen Eruptionszeitpunkt, der mit der Ar-Ar- bzw. ^{14}C -Methode datiert wird. Eine Altersdifferenz reflektiert das Alter des Magmas zum Zeitpunkt der Eruption und beträgt in diesen Beispielen etwa 6.000 Jahre (aus unseren eigenen Arbeiten in Göttingen: Scheibner et al, 2008).

Supervulkane sind nicht die einzige Bedrohung, der wir und unsere Zivilisation unterliegen. Neben Erdbeben und Vulkanausbrüchen und den von ihnen ausgelösten Tsunamis müssen wir jederzeit mit weiteren schwerwiegenden Ereignissen rechnen, die sich auf unserer Erde immer wieder ereignen werden (McGuire, 2005). Meteoriteneinschläge sind nur ein, wenn auch, relativ gesehen, unwahrscheinliches Szenario. Vor nur 7.000 Jahren rutschte vom Kontinentalschelf vor Norwegen eine Gesteinsmasse in die Tiefsee und löste durch diesen „Storega-Kollaps“ auf den Shetlands, in Nordost-Schottland, Island und Grönland einen verheerenden Tsunami aus. Auch die Flanken von vulkanischen Ozeaninseln sind instabil, können riesige Bergrutsche und Tsunamis auslösen. Die Inseln des kanarischen Archipels, Hawaii und andere zeigen Kollapsstrukturen und entsprechende Rutschmassen in der umgebenden Tiefsee mit Volumina von bis zu 5.000 km^3 (e.g. Moore et al., 1994; McGuire, 1996; Carracedo et al., 1999; Masson et al., 2002; Krastel et al., 2001)

Die Schlussfolgerungen aus dem geologischen Befund sind eindeutig: Geologische Ereignisse wie die Eruption von Supervulkanen oder der Kollaps ganzer Vulkan-Inselflanken gehören zum ganz normalen Gang in der Geschichte der Erde, sie treten etwa alle 50.000 Jahre auf und haben schon in der Vergangenheit die Entwicklung und die Geschichte der Menschheit begleitet und geprägt. Es ist also damit zu rechnen, dass solche Ereignisse erneut auftreten und unsere Zivilisation und alles, was diese trägt, Han-

del, Verkehr, Transport und Kommunikation, schwer treffen und damit zur Katastrophe werden. Es gibt keinen Schutz vor solchen Ereignissen.

Literatur

- Ambrose SH (1998) Late Pleistocene human population bottlenecks, volcanic winter, and differentiation of modern humans. *Journal of Human Evolution* 35: 115–118.
- Carracedo JC, Day SJ, Guilou H, Pérez-Torrado FJ (1999) Giant Quaternary landslides in the evolution of La Palma and El Hierro, Canary Islands. *J Volcanol geotherm res* 94: 169–190.
- Harpending HC, Sherry ST, Rogers AR, Stoneking M (1993). The genetic structure of ancient human populations. *Curr. Anthropol.* 43: 483–496.
- Jones GS, Gregory JM, Stott PA, Tett SFB, Thorpe RB (2005) An AOGCM simulation of the climate response to a volcanic supereruption. *Cimate Dynamics* 25: 725–738.
- Krastel S, Schmincke HU, Jacobs CL, Rihm R, LeBas TP, Alibés B (2001) Submarine landslides around the Canary Islands. *J Geophys res* 106(B3): 3977–3998.
- Mason BG, Pyle DM, Oppenheimer C (2004) The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth. *Bull Volcanol* 66: 735–748
- Masson DG, Watts AB, Gee MJR, Urgeles R, Mitchell NC, LeBas TP, Canals M (2002) Slope failure on the flanks of the western Canary islands. *Earth Sci Rev* 57: 1–35.
- McGuire (2005) Catastrophes to come: Global geophysical events and their impacts. UKELA Conference 2005. <http://www.ukela.org/rte.asp?id=88>
- McGuire WJ (1996) Volcano instability: a review of contemporary themes, in „Volcano Instability on the Earth and other Planets“, McGuire WJ, Jones AP, Neuberg J (eds) *Geol Soc London Spec Pub* 110: 1–23.
- Molzahn M, Reisberg L, Wörner G (1996) Os, Sr, Nd, Pb, O isotope and trace element data from the Ferrar flood basalts, Antarctica: evidence for an enriched subcontinental lithospheric source. *Earth Plane Sci Lett* 144: 529–546
- Moore JG, Normak WR, Holcomb RT (1994) Giant Hawaiian landslides. *Ann Rev Earth Planet Sci* 22: 119–144.
- Rampino (2001) Late Permian Extinctions. *Science* 291: 1530–1533
- Rampino MR und Self S (1993) Bottleneck in human evolution and the Toba eruption. *Science* 24: 262
- Rampino MR, Ambrose SH (2000) Volcanic winter in the Garden of Eden: The Toba supereruption and the late Pleistocene human population crash. *Geological Society of America, Special Paper* 345: 71–82.
- Rampino MR, Self S (1992) Volcanic winter and accelerated glaciation following the Toba super-eruption. *Nature* 359: 50–52
- Rampino MR, Stothers RB (1988) Flood basalt volcanism during the past 250 million years. *Science* 241: 663–668.
- Reichow MK, Pringle MS, Al’Mukhamedov AI, Allen MB, Andreichev VL, Buslov MM, Davies CE, Fedoseev GS, Fitton GS, Inger S, Medvedev AY, Mitchell C, Puchkov VN, Safonova IYu, Scott RA, Saunders AD (2009) The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis. *Earth Planet Sci Lett* 277: 9–20

- Scheibner B, Wörner G, Civetta L, Stosch HG, Simon K, Kronz A (2007) Rare earth element fractionation in magmatic Ca-rich garnets. *Contrib. Mineral. Petrol.* 154, 55–74
- Scheibner B, Heumann A, Wörner G, Civetta L (2008) Crustal residence times of explosive phonolite magmas: U–Th ages of magmatic Ca-Garnets of Mt. Somma-Vesuvius (Italy) *Earth Planet Sci Letters* 276: 293–301
- Self S, Blake S, Sharma K, Widdowson M, Sephton S (2008) Sulfur and chlorine in Late Cretaceous Deccan magmas and eruptive gas release. *Science* 319: 1654–1657
- Self S, Widdowson M, Thordarson Th, Jay AE (2006) Volatile fluxes during flood basalt eruptions and potential effects on the global environment: A Deccan perspective. *Earth Planet Sci Lett* 248: 517–531.
- Zielinski GA, Mayewski PA, Meeker LD, Whitlow S, Twickler MS (1996) Potential atmospheric impact of the Toba mega-eruption 71,000 years ago. *Geophysical Research Letters* 23: 837–840