

7.2 Eis und Vulkane

BIRGER-G. LÜHR

Eis und Vulkane: Die Erde ist ein dynamischer Planet, dessen Oberfläche wie auch innere Struktur einem steten Wandel unterworfen ist. Die Erde als Wärmekraftmaschine erzeugt Materialströmungen im viskosen Erdinneren, die sogenannten Konvektionsströmen. Sie sind Ursache für die plattentektonischen Prozesse an der rigiden Erdoberfläche, die sich u.a. als Erdbeben und Vulkanismus darstellen. Vulkanische Gesteine gehören zu den ältesten Gesteinen auf der Erde. Vulkaneruptionen werden getrieben durch Dichteunterschiede, wobei Volatile und hier insbesondere Wasser bestimmen, ob eine magmatische Eruption sich eher effusiv oder explosiv gestaltet. Vulkane fördern zu allererst Gase, die auch dafür verantwortlich sind, dass die Erde eine Atmosphäre hat. Wasserdampf besitzt dabei mit Abstand den größten Anteil, gefolgt vom Kohlendioxid. Ist ein Vulkan vergletschert oder trifft heiße Lava auf Wasser oder Schmelzwasser, so kann es zu einer phreatomagmatischen Eruption kommen, bei der Lava explosionsartig in kleinste Partikel, die vulkanischen Aschen, fragmentiert wird. Schmelzende Eismassen können dabei gewaltige vulkanische Ablagerungen mobilisieren, die dann als Schlammströme, sogenannte Lahars, das Umfeld eines Vulkans bis in große Entfernungen gefährden. Die Explosionsenergie kann so gewaltig sein, dass Gesteinsblöcke, Aschen und Aerosole bis in die Stratosphäre geschleudert werden, wo sich Aerosole aufgrund geringer Sinkgeschwindigkeiten über Wochen oder gar Jahre aufhalten können und somit Einfluss nehmen auf Wetter und Klima. Vulkaneruptionen können, im Gegensatz zu den meisten anderen Naturgefahren, globale Auswirkungen haben, wie Ereignisse der geologischen Erdgeschichte eindrucksvoll belegen.

Ice and volcanoes: The Earth is a dynamic planet whose surface, as well as internal structure, is subject to constant change. As a powerful heat engine the earth produces material flows in its viscous interior, the so-called convection currents. The convection process is driving the plate tectonic processes of the rigid crust and lithosphere, inter alia represent as earthquakes and volcanic activity. Volcanic rocks are therefore among the oldest rocks we find on Earth. Volcanic eruptions are driven by density differences, in which volatiles and especially water determine whether a magmatic eruption develops rather effusive or explosive. First of all volcanoes are discharging gases which are also responsible for ensuring that the Earth has an atmosphere. By far water vapor has the largest portion, followed by carbon dioxide. If a volcano summit is glaciated or hot lava hits water or melt water it may cause an phreatomagmatic eruption, where lava is explosively fragmented into smallest particles, so called volcanic ashes. Additionally, huge masses of molten water have the possibility to mobilize huge volcanic deposits as mudflows, known as lahars, threaten the environment of a volcano up tens of kilometers. The explosion energy may be so powerful that boulders, ash, and aerosols are thrown up into the stratosphere, where aerosols can stay for weeks or even years, because of low rates of descent and thus influence weather and climate. Thus, in contrast to most other natural hazards volcanic eruptions may have global impact, as the geological history of the earth impressively demonstrates.

Im Juni des Jahres 1912 verdunkelte sich im Ort Kodiak auf der gleichnamigen Insel in Alaska der Himmel. Es fiel ein Ascheregen, der so dicht war, dass nach Augenzeugenberichten (GRIGGS 1928) eine Lampe, die am ausgestreckten Arm gehalten wurde, nicht mehr sichtbar war. Die Menschen rechneten mit dem Weltuntergang. Glücklicherweise war der Spuk nach nur drei Tagen schon zu Ende. Ursache dieses seltsamen Phänomens war der Ausbruch des Vulkans Katmai/Novarupta in 220 km Entfernung von Kodiak, der am 6. Juni 1912 begann. Bei dieser größten Vulkaneruption im 20. Jahrhundert wurde ein Aschenvolumen von ca. 28 km³ in die Atmosphäre geblasen. Nördlich und nordwestlich des Vulkans wurde in fast 300 km Entfernung noch eine Aschenmächtigkeit von 5 bis 6 mm gemessen.

Vulkaneruptionen, Erdbeben und Tsunamis sind Naturereignisse, die zur Dynamik unserer Erde gehören und gehören werden. Unsere Erde ist ein dynamischer Planet, der sich in einer ständigen Umgestaltung befindet. So entstehen Meere und verschwinden wieder, Gebirge wachsen und werden von Wind und Regen

wieder abgetragen. Viele Veränderungen erfolgen so langsam, dass ein Mensch diese in seinem vielleicht 100 Jahre währenden Leben nicht wahrnimmt, denn erst über geologische Zeiträume werden sie sichtbar. Dagegen dauern manche Veränderungen wie Bergstürze, Erdbeben und Vulkaneruptionen nur Sekunden bis Stunden und gestalten dabei die Erdoberfläche für uns Menschen dramatisch um.

Die Erde ist ein Planet, der an seiner Oberfläche wie auch in seinem Inneren einem ständigen Wandel unterworfen ist. Hauptantrieb ist die vorhandene Wärme, die sich aus a) Restwärme von der Zeit der Erdentstehung, b) erzeugter Wärme, u.a. durch radioaktiven Zerfall von u.a. Uran, Thorium und Kalium und c) zu einem geringen Teil aus innerer Reibung, aufgrund der gravitativen Wirkung von Mond und Sonne zusammensetzt. Die zweimal täglich auftretende Aufwölbung und Absenkung durch die Gezeiten erreicht auf Landflächen ein Maximum von fast einem halben Meter, was zu einer radialen Dehnung (Gezeiten-Strain) des Erdkörpers senkrecht zur Rotationsachse in der Größenordnung

von 10^{-8} führt. Die an der Erdoberfläche vorhandene Wärme wird nach außen ins Weltall abgestrahlt, sodass ein permanenter Wärmefluss (um die 60 mW/m^2) von innen nach außen herrscht. Da die Wärmeleitfähigkeit des Erdmaterials begrenzt ist, ergibt sich ein Temperaturgradient (geothermischer Gradient ca. 20°C/km), eine mit der Tiefe zunehmende Temperatur, die im Erdkern Werte von 6.000°C erreicht.

Der Wärmetransport in der Erde geschieht einerseits durch Wärmeleitung, jedoch viel schneller durch Konvektion, d.h. es kommt zu Materialströmen in der Erde, die im äußeren flüssigen Kern der Erde zur Erzeugung des uns schützenden Erdmagnetfeldes führen, aber auch zu Materialströmen im viskosen Erdmantel. Wird ein Material erwärmt, so dehnt es sich aus und verringert seine Dichte, wodurch es leichter wird und anfängt auftriebsbedingt aufzusteigen. Kühlt das Material an der Erdoberfläche ab, so steigt die Dichte und es kann wieder in die Tiefe des Erdmantels absinken und der Prozess beginnt von neuem. Betrachtet man die Erde über Jahrmillionen so verhält sie sich scheinbar wie eine Flüssigkeit. Im Verlauf der Erdgeschichte hat sich das Material der Erde auf diese Weise differenziert, sodass der Erdkern heutzutage aus festen schweren Bestandteilen wie Eisen und Nickel besteht. Die Konvektion im Erdmantel bildet somit den Antrieb für die sogenannten tektonischen Platten an der Oberfläche unseres Planeten. Die Platten selbst setzen sich zusammen aus einem Teil des oberen Mantels, der sogenannten Lithosphäre, und der Erdkruste und bilden somit eine ca. 100 km mächtige Schicht. Die Fließfähigkeit des Gesteinsmaterials in der Erde nimmt zur Oberfläche hin ab. Die hohe Viskosität (Zähigkeit) der Kruste dazu führt, dass in dieser mechanische Spannungen aufgebaut werden, die nur noch über Bruchprozesse abgebaut werden können und die wir als Erdbeben wahrnehmen.

Vulkanbildung

An Nahtstellen wie den sogenannten divergenten (konstruktiven) und konvergenten (destruktiven) Plattengrenzen können aufgrund des Dichteunterschiedes Fluide und Magmen aufsteigen und zu Vulkanismus führen. Dreiviertel der jährlichen Magmaproduktion von geschätzten 30 km^3 pro Jahr erfolgt an den konstruktiven Plattenrändern, den Ozeanischen Rücken, überwiegend untermeerisch und nur an wenigen Stellen der Erde, wie z.B. am Ostafrikanischen Grabenbruch oder auf Island, direkt sichtbar.

An destruktiven Plattenrändern, den sogenannten Subduktionszonen, taucht die dichtere Ozeanische Platte unter die leichtere Kontinentale ab. Hier führt die zunehmende Dehydrierung zur Freisetzung von Fluiden

(MIEDEL et al. 2007, BOLFAN-CASANOVA 2007). Die Entwässerung ist in einer Tiefe um die 100 km maximal. Dort entweichen nicht nur Porenwasser sondern auch in den Mineralen gebundenes Kristallwasser, das aufgrund seiner geringeren Dichte an die Oberfläche drängt. Beim Aufstieg reagieren die Fluide chemisch mit dem Umgebungsmaterial, was zu einer Erniedrigung des Schmelzpunktes führt, sodass nun Fluide und partielle Schmelzen, die durch die Aufnahme von Fluiden ebenfalls eine geringere Dichte als das umgebende Gestein besitzen, an die Erdoberfläche gelangen. Erreichen sie diese, so bauen sie die sogenannten Subduktionszonen-Vulkane auf. Diese findet man als Vulkanketten z.B. rings um den Pazifik, als sogenannten »pazifischer Feuerring«, oder am 5.000 km langen Sundabogen.

Vulkane sind nach Don Dingwell (Vulkanologie an der LMU München) in erster Linie Gasfabriken. Sie entlassen im Mittel:

70 - 80%	H_2O	8 - 12%	CO_2
3 - 5%	N_2	5 - 8%	SO_2

Die ältesten vulkanischen Gesteine, die man auf Grönland gefunden hat, haben ein Alter von $3,8 \text{ Mrd. Jahren}$. Somit ist die Entgasung des Erdinneren über die Vulkane wesentlich verantwortlich dafür, dass die Erde eine Gashülle hat, in der wir leben können. Da der Dichteunterschied zwischen flüssigem Magma und dem Umgebungsgestein nur zu moderaten effusiven Eruptionen führen kann, sind es die Fluide, die insbesondere bei hochviskosen Magmen, wie wir sie an den Vulkanen der Subduktionszonen vorfinden, zu explosivem Vulkanismus führen. Kommt unter geringen Umgebungsdruckbedingungen Wasser mit Magmen oder Laven mit Temperaturen von 800 bis über 1.000°C in Kontakt, so kommt es zu einer explosiven Verdampfungsreaktion. Die schlagartige Expansion des Wasserdampfes führt dazu, dass das heiße Gesteinsmaterial zu feinsten Partikeln, den sogenannten vulkanischen Aschen, fragmentiert wird. Der Explosionsdruck kann so gewaltig werden, dass Material bis in einige Zehner-Kilometer Höhe transportiert wird und damit deutlich über die Wolkengrenze. Wolken bedeuten die Möglichkeit von Niederschlag, der Partikel und Aerosole relativ schnell aus der Atmosphäre auswaschen kann.

Somit kann ein effusiver Ausbruch durch Hinzuführen von Starkregenwasser oder Schmelzwasser explosiv werden. Dies war auch der Grund, weshalb es im geschilderten Fall des Katmai / Novarupta Ausbruches vom Juni 1912 zu dieser enormen Aschenbildung kommen konnte. Derzeit sind 1.560 aktive Vulkane bekannt (Untermeerische sind hierbei nicht berücksichtigt). Als aktiver Vulkan wird klassifiziert, wer nachweislich im Holozän (die letzten 10.000 Jahre) ausgebrochen ist. Davon liegen in den gemäßigten Breiten 421 Vulkane nörd-

lich von 40° N und 70 Vulkane südlich von 40° S, die, in Abhängigkeit von ihrer Höhe, auf entsprechendem Breitengrad das Potential für die Ausbildung einer Schnee- und Eiskappe besitzen.

Fallbeispiel Island

Island liegt auf dem mittelatlantischen Rücken, der Plattengrenze zwischen Europa und Amerika, und hat somit viele sogenannte Rift-Vulkane, die überwiegend aus Spalten effusiv eruptieren. Auf Island findet man jedoch aufgrund seiner nördlichen Lage auch gewaltige Gletscher.

Nach nahezu 200 Jahren der Ruhe und beginnend mit seismischer Unruhe und Krustenintrusion in den 1990er Jahren (STURKELL et al. 2003) brach am 20. März 2010 der Eyjafjallajökull (übersetzt: Inselberg im Gletscher) in Form einer 24 Tage dauernden Spalteneruption auf dem Sattel zwischen Eyjafjallajökull und dem Vulkan Katla aus. In einer zweiten 39-tägigen Ausbruchphase, beginnend am 14. April 2010, kam es zur Eruptionsspaltenbildung unter dem Gletschereis. Die durch den Kontakt mit Schmelzwasser initiierten Explosionen bildeten Aschen, die bis in 10 km Höhe transportiert wurden und sich über eine Fläche von 7×10^6 km² verteilten. Die geförderte Menge an Magma lag bei 0,3 km³, was einem *Volcanic Explosivity Index* (VEI) von 3 bis 4 entspricht (VOLCANOE.SI.EDU). Auf Island führte diese Eruption zur zweimaligen Evakuierung von bis zu 600 Personen (BIRD 2011).

Aufgrund der zu der Zeit ungünstigen Ausrichtung des Jetstreams (starker Höhenwind) wurden die feinkörnigen Aschen Richtung Europa verdriftet und führten damit zur Einstellung des Flugbetriebes über Europa (DLR 2010). Ca. 7×10^{10} kg dieser Aschen hatten eine Partikelgröße von $< 28 \mu\text{m}$ (GUDMUNDSON 2012), mit Sinkgeschwindigkeiten nach dem Stoke'schen Gesetz von wenigen zehnern bis hunderten Metern pro Tag. Die Aschen in der Luft konnten zur damaligen Zeit zwar detektiert werden, es konnten jedoch noch keine Konzentrationsangaben gemacht werden. Vor diesem Ereignis hatten Düsenflugzeuge jede Art von Aschewolke zu meiden. Heutzutage gibt es Regeln zu Zonen mit unterschiedlichen Aschekonzentrationen. Niemals in der Vergangenheit hat ein isländischer Vulkan so einen Einfluss auf das wirtschaftliche Leben in Europa gehabt. Der Flugbetrieb über Nord- und Mitteleuropa war unterschiedlich lange blockiert und betraf Deutschland mit 137 Stunden (DLR 2010). 100.000 Flüge wurden annulliert und 10 Mio. Passagiere waren betroffen. Für die Fluggesellschaften lag der Schaden bei 1,7 Mrd. USD (EUROCONTROL 2010).

Für Island selbst war dieser Ausbruch eher harmlos im Vergleich zur schlimmsten Katastrophe in der isländischen Geschichte. Am 8 Juni 1783 brach der Laki-Vulkan aus und eruptierte bis zum 7. Februar 1784 aus einer 27 km langen Eruptionsspalte. Dieser Ausbruch (VEI = 4) war mit einem Volumen von 14,7 km³ Lava und mit 0,4 km³ Tephra, auch hier war Schmelzwasser wieder mit im Spiel, die zweitgrößte effusive Eruption in historischer Zeit (THORDARSON & SELF 1993, 2003). Sie forderte mit 9.530 Toten weltweit die sechstgrößte Todesopferzahl und damit $> 20\%$ der damaligen isländischen Bevölkerung. Daneben starben 80% der Schafe sowie 50% der Rinder und Pferde zumeist durch vergiftete Futtermittel. Für Europa und das nördliche Amerika brachte dieser Ausbruch neben romantischen Sonnenuntergängen, die die damaligen Künstler inspirierten, eine Abkühlung des Wetters.

Beeinflussung des Klimas durch Vulkanaktivitäten

Infolge der o.g. Eruption des Laki-Vulkans betrug der Temperatur-Abfall im folgenden Winter in den USA 4,8 °C (bezogen auf einen 225-Jahresmittelwert). Benjamin Franklin, der zu dieser Zeit als Botschafter in Paris lebte, untersuchte den Einfluss des »Nebels«, der mit dem Wind über die nördliche Hemisphäre verteilt wurde, auf die Sonneneinstrahlung und damit den klimatischen Effekt (FRANKLIN 1784), der bis zum Sommer 1786 nachweisbar war (THORDARSON & SELF 2003).

Seit dem Ausbruch des El Chichón vom 28. März bis Anfang April 1982 (VEI = 5), bei dem ein Volumen von ca. 1,5 km³ Magma explosiv eruptierte, haben wir verstanden, dass nicht die Aschen, sondern insbesondere das Schwefeldioxid (SO₂), das sich mit Feuchtigkeit zu winzigen Schwefelsäure-Tröpfchen verbindet, den sogenannten Aerosolen, den Klimaeffekt verursacht. Die sauren Aerosole besitzen eine geringere Dichte im Vergleich zu den Aschepartikeln und sinken somit entsprechend noch langsamer ab. Das Wandern der Aerosol-Wolke um den Erdball konnte zum ersten Mal mit Hilfe von Satellitenmessungen verfolgt und damit die Abnahme der Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche unterhalb des Wolkenbandes nachgewiesen werden (MARTI & ERNST 2005).

SIGL et al. (2015) haben Aerosol-Daten aus Eiskernen und Baumringen der Nord- und Südhalbkugel zusammengetragen und konnten nachweisen, dass es in den vergangenen 2.500 Jahren mindestens 40 kalte Jahre und mindestens 12 kalte Dekaden durch Vulkaneruptionen mit globalen Auswirkungen gegeben hat. Die maximale Klimabeeinflussung lag bei 10 Jahren, wobei die ermittelte Temperaturabsenkung im Mittel bis -2,5 °C betrug.



Abb. 7.2-1: Nevado del Ruiz (Kolumbien) - Höhe: 5.321 m. Foto Jose Ivan Cano Marin.



Abb. 7.2-2: Der 3.943 m hohe, Schnee und Eis bedeckte, massive Vulkan Ushkovsky, Zentral-Kamchatka, mit seiner 4.5×5.5 km großen, vergletscherten Caldera (links) und dem 4.108 m hohen Krestovsky Vulkankegel. Als einer von 7 größeren Vulkanen liegt er am NW Ende der Klyuchevskoy Vulkangruppe. Die einzige historisch belegte Aktivität des Ushkovsky war eine explosive Eruption im Jahr 1890 am Gipfel. Fotoaufnahme von Osten blickend im August-2014 vom Sattel zwischen dem 4.585 m hohen Kamen und 4.835 m hohen Klyuchevskoy Vulkan (Foto: Birger Lühr).

Weitere Gefahren aus vergletscherten Vulkanen

Schmelzwässer führen bei Vulkaneruptionen jedoch nicht nur zur Fragmentierung des eruptierten Materials. Gewaltige Wassermengen können auch gewaltige Gesteinsmassen mobilisieren, die als vulkanische Schlammlawine, sogenannter Lahar, die Vulkanhänge hinunter fließen.

Der Nevado del Ruiz (*Abb. 7.2-1*) ist ein breiter, vergletschertes Vulkan in Zentral-Kolumbien, der eine Fläche von mehr als 200 km² bedeckt. Er ist mit seinen 5.321 m Höhe der zweithöchste Vulkan der Nordhalbkugel und baute sich seit dem Pleistozän aus eruptierten andesitisch-dazitischen Laven sowie pyroklastischem Material auf. Historisch belegt sind Eruption bis ins 16. Jahrhundert zurück, bei denen das Schmelzen der Eiskappe zur Bildung zerstörerischer Lahars führte. So kam es auch 1985 zur tödlichsten Eruption von Südamerika. Die Eruption (VEI = 3) begann am 13. Novem-

ber 1985 und förderte letztendlich ca. 35×10⁶ t Material. Die dabei am Gipfel austretende heiße Lava schmolz so viel Eis und Schneemassen, dass die entstandenen Schmelzwässer gewaltige Lahare aus Wasser, Schlamm, Asche und Gesteinsschutt ausbilden konnten, die sich mit Geschwindigkeiten von 20 bis 30 km in der Stunde die Hänge herabwälzten. Diese mehrere tausend Kubikmeter umfassenden sturzflutartigen Massen erreichten ca. zwei Stunden später die 45 km entfernt gelegene Stadt Armero, die schon auf älteren Lahars errichtet worden war, und begruben sie unter bis zu 40 m mächtigen Ablagerungen. Nach Angaben kam jeder zweite Bewohner der Stadt in den Schlammmassen ums Leben. Die Opferzahl schwankt zwischen 25.000 bis 31.000 Toten.

Erderwärmung und Vulkaneruptionen

Da Vulkaneruptionen u.a. auch durch Auflastdrücke gesteuert werden, zeigen neuerdings auch Belege, dass auch die Erderwärmung die tektonische Aktivität und

damit das Eruptionsverhalten von Vulkanen langfristig beeinflussen kann. Untersuchungen von Aschelagen im Meeresboden vor der mittelamerikanischen Pazifikküste (KUTTEROLF et al. 2013) erlauben einen Blick in die Geschichte der dortigen Vulkanausbrüche für die letzten 460.000 Jahre. Ein Vergleich mit der Klimageschichte ergab dabei eine verblüffende Übereinstimmung: Phasen hoher vulkanischer Aktivität folgten jeweils mit leichter Verzögerung auf schnelle, weltweite Temperaturanstiege und damit verbundene schnelle Eisschmelzen. Folgt man den natürlichen Klimazyklen der letzten 460.000 Jahre, so befinden wir uns aktuell am Maximum der Warmphase. Der Milutin-Milanković-Zyklus lässt für die weitere Zukunft wieder einen Temperaturabfall um ca. 4-8 °C erwarten. Untersuchungen des GEOMAR-Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel, an Bohrkernen aus dem gesamten zirkumpazifischen Raum bestätigen für die letzten Million Jahre die vor Amerika gefundenen Ergebnisse, dass klimabedingte Auflaständerungen auch die vulkanische Aktivität global beeinflussen.

Schlussbetrachtung

Naturereignisse wie z.B. Vulkanausbrüche, Erdbeben, Hangrutsche und Tsunamis stellen für unsere hochkomplexen Gesellschaften eine Gefährdung dar, die, wenn sich Individuen und Gesellschaften nicht auf die damit verbundenen Risiken einstellen, zur Ausbildung von Katastrophen führen können. Wir können diese Phänomene, die uns zeigen, dass wir auf einem dynamischen Planeten leben, nicht verhindern und müssen deshalb einen Weg finden, mit ihnen zu leben. Die mit Naturgefahren verbundenen Risiken können nur dann wirkungsvoll klein gehalten werden, wenn auf der einen Seite Naturgefahren als solche richtig erkannt und in ihren Ursachen und Auswirkungen verstanden werden, auf der anderen Seite aber auch die gesundheitliche, soziale und ökonomische Verwundbarkeit von Individuen und Gesellschaft gegenüber diesen Gefahren erkannt und minimiert wird. Nur durch eine effektive Risikominderung, zu der auch eine entsprechend gute Vorbereitung auf ein mögliches Ereignis inklusive einer umfassenden Aufklärung der betroffenen Bevölkerung bis hin zur Einrichtung von Frühwarnsystemen zählen, lassen sich die Auswirkungen von Naturereignissen begrenzen. Diese Aufgabe ist jedoch leider keine einmalige, da Gesellschaften sich in einem stetigen Wandel befinden. Eine wachsende Weltbevölkerung lebt in einer zunehmenden Zahl immer größerer Ballungsräume und Megacities mit ebenfalls zunehmend komplexerer

Infrastruktur überwiegend im küstennahen Bereich und damit auch in besonders durch Naturgefahren bedrohten Gebieten. Deshalb muss auch die Strategie der Risikominderung stetig den sich verändernden Gegebenheiten angepasst werden, um wirkungsvoll zu bleiben..

Literatur

- BIRD, D.K., GÍSLADÓTTIR, G. & D. DOMINEY-HOWES (2011): Different communities, different perspectives: issues affecting residents' response to a volcanic eruption in southern Iceland, *Bulletin of Volcanology* 73:1209-1227.
- BOLFAN-CASANOVA, N. (2007): Fuel for Plate Tectonics. *Science* 315 (5810), 338-339. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1137738>.
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) (2010): Warum ist Vulkanasche gefährlich für Flugtriebwerke? In: <http://www.dlr.de/desktop/default.aspx/tabid-6449/12560_read-23960/>, 22.04.2010.
- EUROCONTROL (2010): Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic STATFOR/Doc394 (Brussels: Eurocontrol).
- FRANKLIN, B. (1784): Meteorological imaginations and conjectures, *Manchester Literary and Philosophical Society Memoirs and Proceedings*, 2, 122.. [Reprinted in *Weatherwise*, 35, p. 262, 1982.].
- GRIGGS, R. (1928): Das Tal der zehntausend Dämpfe.
- GUDMUNDSSON, M. T., THORDARSON, T., HÖSKULÐSSON, A., LARSEN, G., BJÖRNSSON, H., PRATA, F. J., ODDSSON, B., MAGNÚSSON, E., HÖGNADÓTTIR, T., PETERSEN, G. N., HAYWARD, CH., STEVENSON J. A. & I. JONSDÓTTIR (2012): Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Scientific Reports* 2:572.
- KUTTEROLF, S., JEGEN, M., MITROVICA, J. X., KWASNITSCHKA, T., FREUNDT, A. & P. J. HUYBERS (2013): A detection of Milankovitch frequencies in global volcanic activity *Geology*, 41 (2), pp. 227-230. DOI 10.1130/G33419.1.
- MIERDEL, K., KEPPLER, H., SMYTH, J. R. & F. LANGENHORST (2007): Water solubility in aluminous orthopyroxene and the origin of Earth's asthenosphere. *Science* 315 (5810), 364-368.
- MARTI, J. & G. G. J. ERNST (eds) (2005): *Volcanoes and the Environment*. 471 pp., Cambridge University Press. doi:10.1017/S0016756808005621.
- SIGL, M., M. WINSTRUP, J. R. MCCONNELL, K. C. WELTEN, G. PLUNKETT, F. LUDLOW, U. BÜNTGEN, M. CAFFEE, N. CHELLMAN, D. DAHL-JENSEN, H. FISCHER, S. KIPFSTUHL, C. KOSTICK, O. J. MASELLI, F. MEKHALDI, R. MULVANEY, R. MÜSCHELER, D. R. PASTERIS, J. R. PILCHER, M. SALZER, S. SCHÜPBACH, J. P. STEFFENSEN, B. M. VINTHER & T. E. WOODRUFF (2015): Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. - doi:10.1038/nature14565.
- STURKELL, E., SIGMUNDSSON, F. & P. EINARSSON (2003): Recent unrest and magma movements at Eyjafjallajökull and Katla volcanoes, Iceland. *J. Geophys. Res.* 108, 2369.
- THORDARSON, T. & S. SELF (1993): The Laki (Skaftár Fires) and Grímsvötn eruptions in 1783-1785. *Bulletin of Volcanology*, 55, 233-263.
- THORDARSON T. & S. SELF (2003): Atmospheric and environmental effects of the 1783-1784 Laki eruption: A review and reassessment, *J. Geophys. Res.*, 108 (D1), 4011, doi:10.1029/2001JD002042.
- VOLCANO.SI.EDU: <http://www.volcano.si.edu>.

Kontakt:

Dr. Birger Lühr
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam
ase@gfz-potsdam.de

Lühr, B. (2015): *Eis und Vulkane*. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 257-261. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.39