



Hans-Ulrich Schmincke

VULKANISMUS



Hans-Ulrich Schmincke

Vulkanismus

Mit 307 Farbabbildungen

4. Auflage



primus  verlag

Impressum

Alle Fotos stammen von Hans-Ulrich Schmincke
soweit nicht anders vermerkt.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig.
Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen,
Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung
durch elektronische Systeme.

4., unveränderte Auflage 2013

© 2010 by WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), Darmstadt

Umschlaggestaltung: Peter Lohse, Heppenheim

Umschlagabbildung: Ausbruch des Tungurahua im Januar 2010
bei Baños City (Ecuador) © picture alliance/dpa

Layout, Illustrationen & Prepress: schreiberVIS, Bickenbach

Die Herausgabe des Werkes wurde durch die Vereinsmitglieder
der WBG ermöglicht.

Besuchen Sie uns im Internet: www.wbg-wissenverbindet.de

ISBN 978-3-534-26245-8

Die Buchhandelsausgabe erscheint beim Primus Verlag

Umschlaggestaltung: Jutta Schneider, Frankfurt a. M.

Umschlagabbildungen: oben: Lavastrom des Ätna auf Sizilien
(2.11.2006) © Martin Rietze (www.mrietze.com);

unten: Lavastrom des Ätna auf Sizilien (30.10.2006)

© picture-alliance/dpa

ISBN 978-3-86312-367-3

www.primusverlag.de

Elektronisch sind folgende Ausgaben erhältlich:
eBook (PDF): 978-3-86312-944-6 (Buchhandel)
eBook (epub): 978-3-86312-945-3 (Buchhandel)

Inhalt

Ke pah'u nei ka honua - Die Erde knallt.

Letzte Worte des Königs von Vulkanesien, bevor die Insel im August 1882 in den Fluten des Pazifik versank.

Vorwort

1 Einleitung

Neptunisten, Vulkanisten, Plutonisten
Kontinentaldrift – Sea Floor Spreading – Plattentektonik
Die Wurzeln der Vulkane
Vulkane und Vulkaneruptionen
Literatur

2 Plattentektonik

Das Förderband der Mittelozeanischen Rücken
Dynamische Gliederung der Erde
Die Verteilung der Vulkane auf der Erde
Zusammenfassung

3 Magma

Was ist Magma?
Einteilung magmatischer Gesteine
Schalenaufbau der Erde
Wo entstehen Magmen?
Wie entstehen Magmen?

Warum steigen Magmen auf?
Magmatische Differentiation
Magmakammern
Zonierte Magmakammern
Zusammenfassung

4 Rheologie, magmatische Gase und Blasenbildung

Rheologie
Schmelzstruktur
Viskosität
Explosive Eruptionen
Magmatische Gase
Gasbudget Kilauea
Blasenbildung
Auslösung von Vulkaneruptionen
Klassifizierung von Vulkaneruptionen
Zusammenfassung

5 Mittelozeanische Rücken

Die Revolution in den Erdwissenschaften
Morphologie und Tektonik
Pillowlaven und Pillowvulkane
Schichtlaven
Pyroklastische Eruptionen in der Tiefsee?
Wie häufig sind submarine Eruptionen?
Magmakammern unter Mittelozeanischen Rücken und ihre Wurzeln
Zusammenfassung

6 Seamounts und Vulkaninseln

Seamounts
Vulkaninseln
Unterschiede Hawaii - Kanaren
Ozeanische Plateaus

Hot Spots und Mantel Plumes
Zusammenfassung

7 Kontinentale Intraplattenvulkane

Riftzonen und Riftschultern
Schlackenkegel
Die quartären Vulkanfelder der Eifel
Der Yellowstone-Plume
Flutbasalte
Zusammenfassung

8 Inselbögen und aktive Kontinentränder

Subduktionszonen
Vulkangürtel
Subduktionsmagmen
Zusammenfassung

9 Vulkanbauten und Vulkanbausteine

Lavaströme
Dome
Tephra und pyroklastische Gesteine
Schlackenkegel
Schlackenkegel Eifel
Stratovulkane
Schuttlawinen
Calderavulkane
Zusammenfassung

10 Strombolianische, hawaiianische und plinianische Eruptionen

Pyroklastische Fragmentierung
Eruptionssäulen
Strombolianische und hawaiianische Eruptionen

Plinianische Eruptionen
Die Eruption des Mt.St. Helens am 18. Mai 1980
Zusammenfassung

11 Pyroklastische Ströme, Glutlawinen und Glutwolken

Forschungsgeschichte
Terminologie
Ignimbrite
Pyroklastische Blockströme und ihre Ablagerungen
Surges
Die Eruption des Laacher-See-Vulkans vor 12.900 Jahren
Zusammenfassung

12 Feuer und Wasser

Magma und Wasser
Explosive Magma-Wasser-Wechselwirkungen
Phreatomagmatische Eruptionen
Maare, Tuffringe und Tuffkegel
Initiale phreatomagmatische Phasen
Feuer und Eis
Zusammenfassung

13 Vulkaneruptionen, Vulkangefahren, Vulkankatastrophen

Terminologie
Vulkangefahren
Der Explosivitätsindex
Können Vulkankatastrophen verhindert werden?
Lehren aus großen Vulkankatastrophen
Nevado del Ruiz
Pinatubo
Vulkaneruptionen und Medien
Zusammenfassung

14 Vulkane und Klima

Die wissenschaftliche Revolution

Gaseinträge in die Atmosphäre

Wie wirken sich die vulkanischen Aerosole in der Stratosphäre aus?

Welche Vulkaneruptionen belasten die Atmosphäre?

Back *f or* the future

The chicken and the egg

Zusammenfassung

15 Mensch und Vulkan: Der Nutzen

Wärme aus der Erde

Heißwasserventile und die Bildung von Erzlagerstätten

Vulkanische Böden

Vulkane als Baustoff- und Werksteinlieferanten

Vulkanlandschaften

Zusammenfassung

Epilog

16 Physikalische Einheiten und Abkürzungen

17 Literaturverzeichnis

18 Stichwörterverzeichnis

Menü

[Buch lesen](#)

[Innentitel](#)

[Inhaltsverzeichnis](#)

[Informationen zum Buch](#)

[Informationen zum Autor](#)

[Impressum](#)

Vorwort

„The object of the following Essay is to throw some light on those phenomena which consist in the development of subterranean activity in the form of Volcanos and Earthquakes, the investigation of which appears to me of primary importance to the progress of Geological science.“

(George Poulett Scrope: „Considerations on Volcanos, the probable causes of their phenomena, their laws which determine their march, the disposition of their products, and their connexion with the present state and past history of the Globe“. London, 1825)

Vulkane sind: schön, erhaben, majestätisch, sinnlich, aufregend, mystisch, gefährlich, bedrohlich und lebensspendend – und damit ein fassbarer, hörbarer, riechbarer Ausdruck einer lebendigen, dynamischen Erde. Für einen Wissenschaftler sind sie jedoch noch viel mehr: ein Fenster in große Erdtiefen, die nicht direkt zugänglich sind und es nie sein werden. Und für den Laien sind sie der sichtbare Gegenstand einer Naturwissenschaft, die viele unterschiedliche Disziplinen in sich vereinigt. Deren Aufgabe ist es einerseits, den sich ständig verändernden, dynamischen Zustand unserer Erde an Punktquellen zu messen und zu überwachen, um Vulkan-Magma-Systeme besser zu verstehen und um bei anstehender Gefahr rechtzeitig Signale geben zu können – damit Katastrophen vermieden werden können.

Andererseits die immensen Wohltaten der Vulkane zu erforschen und sie für den Menschen nutzbar zu machen.

Dieses Buch ist für Menschen geschrieben, die von Vulkanen fasziniert sind und etwas Vorbildung mitbringen. Ich habe versucht, Fachjargon weitgehend zu vermeiden. Leser, die es genauer wissen wollen, finden in den Kapiteln 3, 4, 10 und 11 stärker technisch abgefasste Abschnitte. „Vulkanismus“ ist nicht als ausgewogenes Lehrbuch – sei es didaktischer angelsächsischer oder enzyklopädischer deutscher Prägung – konzipiert, in dem alle Teilgebiete dargestellt werden, sondern als ein Einblick in aktuelle Forschungsthemen, deren logische Abfolge ich in der Einleitung begründe. Lehrbücher mit dem Anspruch, *alle* wesentlichen Aspekte des Fachgebietes abzudecken, gibt es nicht mehr und kann es nicht mehr geben – dazu hat sich die Wissenschaft zu sehr spezialisiert.

Die erste Auflage des vorliegenden Buches erschien 1986 insofern zu einem günstigen Zeitpunkt, als nach der stürmischen oder – um im Bild zu bleiben – explosiven Entwicklung der Vulkanologie in den 1970er- und 1980er-Jahren mit ihren rasanten Paradigmenwechseln und methodisch-analytischen Neuentwicklungen Mitte der 1980er-Jahre ein gewisses Plateau erreicht war: mit der Interpretation von Vulkan-Magma-Systemen im Lichte der Plattentektonik, Glutlawinen, Magma-Wasser-Wechselwirkung, Surges, Debris Avalanches an Land, Klima, Mondlandung, Mt. St. Helens, Tiefseebohrungen usw. Die erste Auflage blieb also für lange Zeit up to date.

Internationale Dekaden haben auch der Vulkanologie neue Impulse gegeben. Das *International Geosphere-Biosphere Program (IGBP)* hat zur Intensivierung der Forschung über die Auswirkungen großer Eruptionen auf Klima und Ozonschicht beigetragen. In der *International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR)* stand auch die Frage im Vordergrund, wie wissenschaftliche Ergebnisse in effektive Handlungsstrategien umgesetzt

werden können - z.B. bei drohenden großen Vulkaneruptionen. Die theoretische und experimentelle Vulkanologie, die geochemische Analytik und die Altersdatierungsmethoden sowie die Interpretation geochemischer Daten sind weiterentwickelt worden. Über den submarinen Vulkanismus und die Tiefenwurzeln der Vulkane (*Manteltomographie*) wissen wir heute erheblich mehr als noch vor 15 Jahren. Auf die vulkanologische Kartierung und Interpretation unserer Nachbarplaneten mit vielen aufregenden Entdeckungen sowie auf weitere Themen kann ich hier aus Platzgründen leider nicht eingehen. Jede große, gut untersuchte Vulkaneruption bedeutet jedoch einen Sprung in unserem Verständnis von vulkanischen Vorgängen. Was für die 1980er-Jahre die Eruption des Mt. St. Helens (1980) war, ist für die 1990er-Jahre die des Pinatubo (Juni 1991) und - was die Naturgefahren betrifft - auch die des Vulkans Unzen in Japan. Aus der Katastrophe von Armero in Kolumbien, wo am 13. November 1985 bei der relativ kleinen Eruption des Vulkans Nevado del Ruiz 23.000 Menschen umkamen, haben wir Wissenschaftler gelernt, unsere Informationsstrategie realistischer zu gestalten: Wir haben ein effektives Video produziert, in dem Vulkangefahren drastisch geschildert werden. Durch die Verteilung vieler Kopien dieses Videos in den Dörfern rings um den Pinatubo im Mai 1991 ließen sich etwa 10.000 Menschen willig evakuieren, deren Verbleib in ihren Siedlungen am 15.6.1991 ihren Tod hätte bedeuten können.

Diesen Entwicklungen hat die umfangreichere zweite Auflage des Buches (2000) mit ausschließlich farbigen Abbildungen, praktisch ein neues Buch, Rechnung getragen - sie ist aber seit Jahren vergriffen. Die englische Ausgabe (*Volcanism*, Springer 2004) sowie die gerade erschienene japanische Ausgabe sind umfangreicher und fachlich stärker spezialisiert, so dass sie in vielen Ländern

als Lehrbuch für einen Grundkurs in Vulkanologie verwendet werden.

Die vorliegende dritte Auflage bietet nach wie vor eine breite Übersicht der wichtigsten Themenbereiche der modernen Vulkanologie. Die Einleitung (Kapitel 1) habe ich neu geschrieben, vor allem um den Systemcharakter der Vulkanologie und ihren Bezug zu vielfältigen Zukunftsproblemen hervorzuheben. Auch wurden einige Fotos und Grafiken ausgetauscht. Die Wissenschaft hat sich natürlich seit dem Jahr 2000 auf vielen Gebieten weiterentwickelt, wie z.B. in der theoretischen und experimentellen Vulkanologie oder in der Fernerkundung mittels Satelliten - aber die wesentlichen Aspekte sind unverändert geblieben.

Viele erdwissenschaftliche Teildisziplinen befassen sich mit Vulkanen. Eine vom Umfang her natürlich nur begrenzt mögliche Darstellung wird daher in ganz besonderem Maße die Interessen ihres Verfassers widerspiegeln. In diesem Buch werde ich, meiner eigenen Forschungsrichtung entsprechend, vorwiegend geologische und petrologische Aspekte diskutieren und dabei vielfach auf die eigenen Erfahrungen und Forschungsergebnisse meiner früheren und jetzigen Mitarbeiter und Kollegen zurückgreifen. Die jungen Vulkanfelder der Eifel und die vulkanischen Ozeaninseln der Kanaren sind seit über 40 Jahren regionale Schwerpunkte unserer Arbeiten, die wir ohne finanzielle Unterstützung nicht hätten durchführen können. Daher geht auch an dieser Stelle mein Dank in erster Linie an die Deutsche Forschungsgemeinschaft und, was die großzügige Förderung ausländischer Gäste betrifft, an die Alexander von Humboldt-Stiftung sowie an die Studienstiftung des deutschen Volkes für die Förderung durch Doktorandenstipendien.

Die unumgängliche Übernahme international gebräuchlicher, ausschließlich englischer Fachausdrücke wie *Seafloor Spreading*, *Mantle Plume*, *Hot Spot* und *Surge*

braucht man heute nicht mehr apologetisch zu diskutieren. Zwei weitere wurden schon in der ersten Auflage entsprechend vereinfacht: *Geotherm* wurde anstatt des umständlichen *geothermischen Gradienten* und *Volatile (volatiles)* anstelle der „flüchtigen Bestandteile“ verwendet. Andere Begriffe wie *debris avalanche* und *debris flow* sind dabei, übernommen zu werden, jedoch verwende ich hier noch die deutschen Begriffe *Schuttlawine* und *Schuttstrom*. In einigen Fällen, in denen die englischen Begriffe zwar klarer sind, aber noch nicht von einer breiteren Allgemeinheit verwendet werden, setze ich sie in Klammern.

Bei der Gestaltung von Diagrammen hat mir vor allem Mari Sumita geholfen. Herr Schreiber hat auch das Layout der dritten Auflage gewohnt souverän durchgeführt – ihm und Herrn Aschemeier, der bei der WBG die dritte Auflage betreut hat, gilt mein herzlicher Dank.

Ich würde mich freuen, wenn sich das Interesse des einen Lesers oder der anderen Leserin auch in kritischen Hinweisen äußern würde.

Hans-Ulrich Schmincke
Lisch, im Mai 2010

Einleitung

„A volcano is not made on purpose to frighten superstitious people into fits of piety and devotion; nor to overwhelm devoted cities with destruction; a volcano should be considered as a spiracle to the subterranean furnace, in order to prevent the unnecessary elevation of land, and letal effects of earthquakes.“

(James Hutton: „Theory of the Earth“. Wheldon and Wesley, Codicote, 1795)

Das System Magma - Vulkan - Mensch

Nach der Verteidigung meiner Dissertation Ende 1964 hatte ich das Gefühl, einen Beitrag zum Nachweis von riesigen Vulkanausbrüchen geleistet zu haben, bei denen im Nordwesten der USA Gebiete von über 20.000 km³ (etwa der Fläche von ganz Nordrhein-Westfalen entsprechend) von gewaltigen Lavamassen überflutet wurden - im Zeitraum zwischen etwa 14 und 17 Millionen Jahren immer wieder und jeweils innerhalb weniger Wochen. Im entbehrlichen Slang des heutigen Medienhype handelte es sich um *Supervulkane*.

Grundlagenwissenschaft, auf Englisch knapper und weniger hochtrabend *basic science*.

In den vergangenen 30 Jahren hat sich die Motivation meiner Doktoranden wesentlich erweitert. Neben die Neugier - nach wie vor Grundvoraussetzung für eine jahrelange Konzentration auf ein enges wissenschaftliches Problem - ist ein diffuses, aber ernsthaftes Bestreben getreten, in ihrer Dissertation auch einen Beitrag zur Gesellschaft und Umwelt im weitesten Sinne leisten zu wollen. Denn Vulkane haben einen direkten Bezug zu großen Zukunftsfragen unserer Zeit: erneuerbare Energien (Geothermik), Klimabeeinflussung durch in die Stratosphäre aufgestiegene SO₂-Gase, fruchtbare Böden, Gefahren für Megastädte in unmittelbarer Umgebung von aktiven Vulkanen - oder für ganz Mitteleuropa wie bei der Eruption des Eyjafjallajökull (s.u.) - sowie zur Neige gehende Erzlagerstätten vulkanischen Ursprungs. Der Elfenbeinturm hat Durchzug bekommen.

Die Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen Vulkanen und dem Menschen kann man anschaulich an drei Themenbereichen verdeutlichen ([Abb. 1.1](#)). Die inneren Kräfte - das *interne Forcing* - in dem System Magma - Vulkan - Mensch umfassen alle planetarischen Aspekte einschließlich der Entstehung der meisten Magmen im Erdmantel. Magmen entstehen dadurch, dass der kristalline Erdmantel in langsamer Bewegung ist, er konvektiert. Nur ein kleiner Teil der Magmen schafft es, je bis zur Erdoberfläche vorzudringen. Vulkane sind sozusagen *Unfälle* auf dem holprigen und meist erfolglosen Weg der Gesteinsschmelzen ans Tageslicht. Vulkane sind, wenn sie denn mal entstehen, überdies äußerst labile Gebilde. Ob, wann und wie sie ausbrechen, hängt nicht nur vom Druck des aufsteigenden Magmas oder der sich aus den Schmelzen nahe der Erdoberfläche lösenden Gase ab. Häufig werden sie auch von äußeren Einwirkungen und

Faktoren - dem *externen Forcing* - wie z.B. von der Wechselwirkung aufsteigender Magmen mit Grundwasser oder von Erschütterungen durch große Erdbeben ausgelöst. Dies sind Kausalketten, die in den Kapiteln 2 bis 8 sowie in Kapitel 12 ausführlicher diskutiert werden.

Vulkan und Mensch: Eine ambivalente Beziehung durch die Jahrtausende

Alle drei Seiten des Systems Magma-Vulkan-Mensch gehören untrennbar zusammen - aus dem einfachen Grund, weil es keine andere Naturerscheinung gibt, die in so vielfältiger Weise mit der Entwicklung der menschlichen Gesellschaft, ihren Grundbedürfnissen, ihren Ängsten und ihren religiösen Gefühlen verwoben ist. Denn wenn Vulkane irgendwann das Licht der Welt erblicken und wachsen und wachsen, ist der Mensch in der einen oder anderen Weise immer unmittelbar betroffen. Kein Wunder, dass alle vier Elemente - Feuer, Wasser, Erde und Luft - auf einen der Urahnen der Vulkanologie, den griechischen Naturphilosophen Empedokles, zurückgehen, der in der Nähe des Ätna lebte.

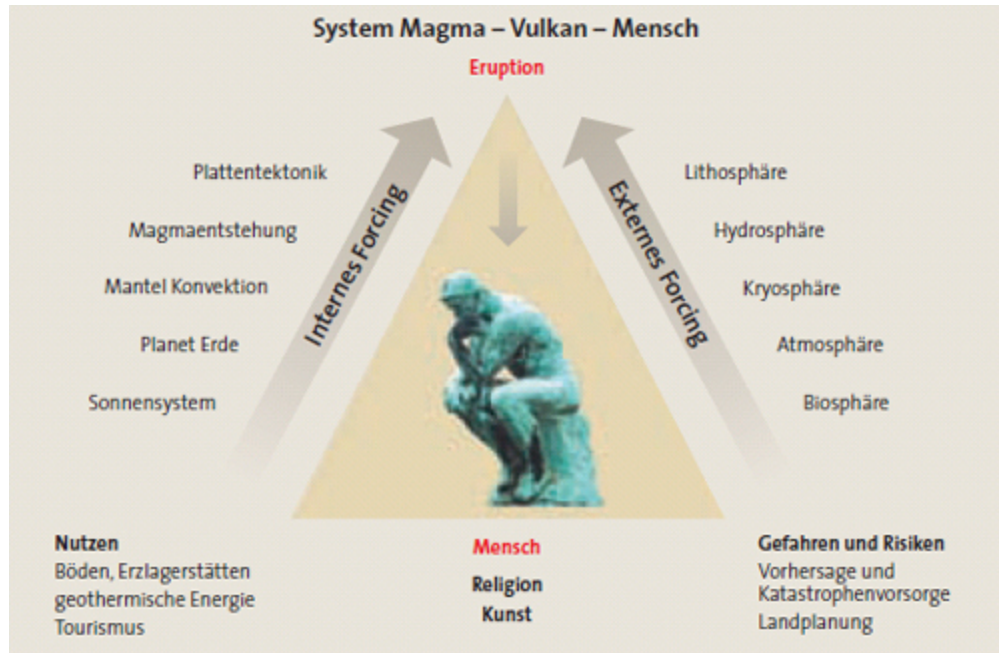


Abb. 1.1: Vulkanausbrüche werden gesteuert durch *internes* (innere Kräfte) und *externes Forcing* (äußere Kräfte). Alle Vulkanausbrüche sind in vielfältiger Weise mit dem Menschen, seiner Kultur und seinen Lebensgrundlagen (z.B. Energie, Rohstoffe, Böden) verzahnt. Gefährdungen durch Vulkanausbrüche entstehen nur dann, wenn der Mensch sich nicht vor ihnen schützt. Vulkangefahren sind aber vernachlässigbar im Vergleich zu dem immensen Nutzen für den Menschen (277e).



Abb 1.2: Aufstiegswege und Pilgerstationen an der Flanke des heiligen Vulkans Mt. Fuji (in Japan Fuji-san, im Westen Fudschijama genannt).

Seit grauer Vorzeit haben Vulkanausbrüche die Menschen in aktiven Vulkangebieten mit Angst und Schrecken erfüllt und sie deshalb immer wieder nach den Ursachen, den Wurzeln dieser Naturgewalten fragen lassen. In vielen Ländern, vom pazifischen Siedlungsraum bis zu den Kulturen des abendländischen Altertums, haben sich unzählige Mythen über Dämonen und Götter in der Tiefe entwickelt. Seit Jahrtausenden wurden und werden Vulkane als Sitz der Götter angesehen, von den Inkas im Norden Chiles bis in das dichteste Vulkangebiet der Erde – die Inselreiche Indonesiens und der Philippinen. Selbst in modernen Gesellschaften wie Japan schlagen die religiösen Kräfte, die Vulkane ausstrahlen, nach wie vor Millionen von Menschen in ihren Bann (Abb. 1.2). Auch den Fegefeuvorstellungen des christlichen Mittelalters liegt

die orientalische Überlieferung eines reinigenden Feuerstroms in der Tiefe zugrunde.

Dass auch Mitteleuropa die geballte Wirkung eines Vulkanausbruchs in über 2000 km Entfernung zu spüren bekommen kann - mit Milliarden Schäden nicht nur für die Fluggesellschaften und Millionen von Flugreisenden, die weder nach Europa zurückkehren noch ausfliegen konnten -, ist eine völlig neue Erfahrung. Der sich seit Ende 2009 durch Erdbeben angekündigte und ab 20.3.2010 ausgebrochene Vulkan Eyjafjallajökull (Island) wurde am 14. April hochexplosiv, weil sich seine Zusammensetzung von basaltisch zu intermediär (d.h. SiO_2 -reich) geändert und sich das Eruptionszentrum in den Zentralschlot des Kraters verlagert hatte. Die bis maximal etwa 9 km aufgestiegenen Eruptionssäulen wurden von starken vorherrschenden NW-Winden nach Europa getrieben und führten zu einer fast vollständigen Schließung der Flughäfen zwischen dem 15. und 20. April ([Abb. 1.3](#)). Auch in den folgenden Wochen kam es immer wieder zu sporadischen Schließungen von Flughäfen, selbst auf den Kanarischen Inseln. Unabhängig von der umstrittenen Frage, ob diese extremen Flugverbote wirklich wissenschaftlich begründet waren, d.h. die Aschenpartikel etwa mehrere $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überstiegen - sie waren es vermutlich im Wesentlichen nicht -, bleibt die Einsicht, dass unsere hoch technisierte moderne Gesellschaft gegenüber Naturereignissen extrem verwundbar geworden ist.



Abb 1.3: Aschenwolke des Vulkans Eyjafjallajökull am 17.4.2010, deren Verdriftung durch starke Winde zur Schließung der Flughäfen in Mittel- und Westeuropa noch in über 2500 km Entfernung führte (Bildausschnitt etwa 800 km). NASA.

Neben der bedrohlichen oder gar lebenszerstörenden Seite wurde allerdings schon in der griechischen Mythologie auch die lebenserhaltende Seite der Vulkangewalten angesprochen: Mit dem Geschenk des Feuers, das er Hephaistos in der Tiefe gestohlen hatte - eine Tat, für die er grausam bestraft wurde -, verhalf Prometheus dem Menschen erst zu seiner wahren Existenz. Diese Ambivalenz charakterisiert bis heute unser Erkenntnisinteresse am Naturphänomen Vulkanismus.

Neptunisten, Vulkanisten, Plutonisten

Die rational basierte, sozusagen naturwissenschaftliche Beschäftigung mit der Natur der Vulkane begann vor ungefähr 2500 Jahren ([Abb. 1.4](#)). Die erste der drei Hauptphasen in der Ideengeschichte der Vulkanologie ging von den Vorsokratikern aus. Zwischen etwa 1780 und 1800 wurden schließlich die Grundsteine der Vulkanologie als Wissenschaft gelegt. Jedoch erst im Rahmen der Plattentektonik, deren Vorstufen Alfred Wegener bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts vorstellte und deren allgemeine wissenschaftliche Anerkennung jedoch erst im Laufe der 1960er- bis 1970er-Jahre erfolgte, konnten Magmen und Vulkane global und geodynamisch als System verstanden werden.

Die Naturphilosophen, von denen einige im damals griechisch besiedelten und vulkanisch aktiven Sizilien lebten, kamen zu dem logischen Schluss, dass unter Vulkanen ein Feuer im Inneren der Erde brennen müsse. Ein Feuer entsteht, wenn zwei Grundvoraussetzungen gegeben sind: eine brennbare Substanz und ein Anfachen. Als brennbare Grundsubstanz nahm man Schwefel an, der auf Sizilien bis ins vorige Jahrhundert hinein abgebaut wurde. Aristoteles postulierte durch die Tiefen der Erde brausende Winde, die das Feuer in Gang halten. Diese Grundvorstellungen über die Natur der Vulkane waren so erfolgreich - oder intuitiv einsichtig -, dass sie sich bis in die Zeit Goethes, also weit über 2000 Jahre lang, hielten.

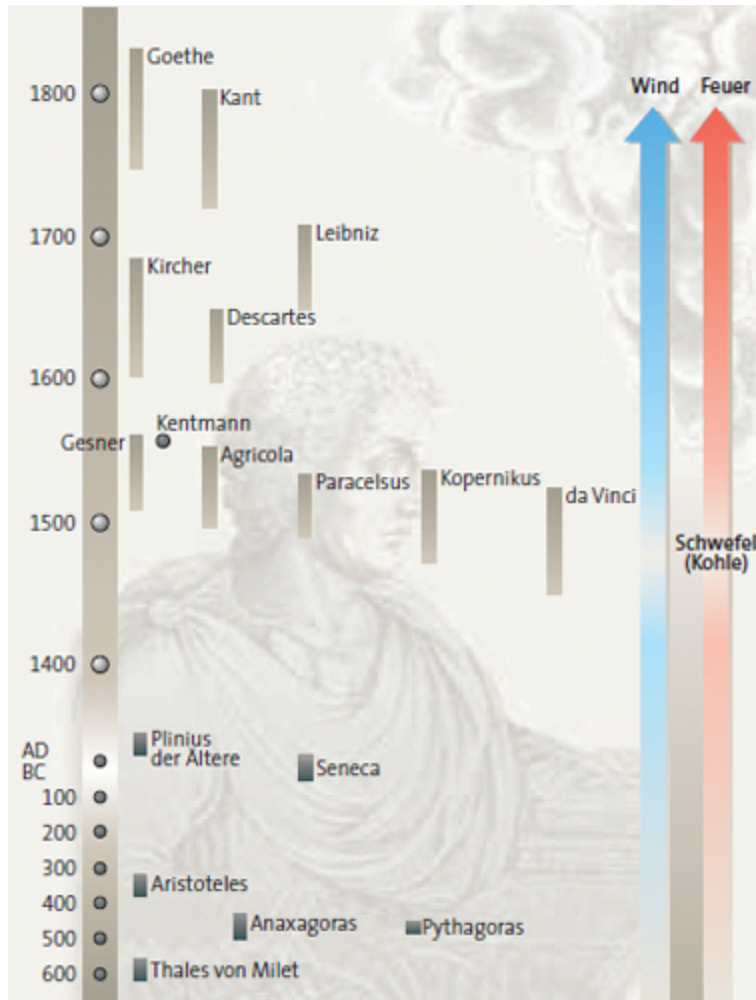


Abb 1.4: Frühe Ideen zum Wesen des Vulkanismus, die sich – von den griechischen Naturphilosophen entwickelt – bis in die Zeit Goethes hielten. Als brennbare Substanzen des im Erdinneren wütenden Feuers nahm man Schwefel an (der in Sizilien, wo die frühen Vorstellungen entwickelt wurden, seit altersher abgebaut wird), später dann Bitumen, Kohle oder oxidierende Erze. Aristoteles entwickelte die Vorstellung von durch die Erde brausenden Winden, die das Feuer entfachen und in Gang halten. Im Hintergrund ist ein Porträt des Naturforschers Plinius der Ältere nach Thenet (1684) zu sehen. Nach Schmincke „Volcanism“ (2004).

In der *neueren* Geschichte der Wissenschaft von der festen Erde, der Geologie, gab es zwei große, insgesamt jeweils etwa ein halbes Jahrhundert währende Auseinandersetzungen. Der erste Streit betraf direkt die Frage nach den Wurzeln der Vulkane, der uralte Antagonismus zwischen Feuer und Wasser stand im

Zentrum. Denn am Ende des 18. Jahrhunderts war die Frage, ob säulig geklüftete Basalte aus Wasser abgeschieden werden oder als heiße Schmelze aus dem Erdinneren treten, das fundamentale Thema schlechthin.

Die sogenannten *Neptunisten*, die den Basalt als aus dem Meerwasser abgeschieden ansahen und sich überwiegend an den Vorstellungen des berühmtesten Erdwissenschaftlers jener Zeit - Abraham G. Werner aus Freiberg in Sachsen - orientierten, standen den *Vulkanisten* gegenüber. Diese interpretierten, fußend auf den Beobachtungen von Nicolas Desmarest (Frankreich) in der Auvergne, säulig abgesonderte, *prismatische* Basalte durch Erstarrung von an der Erdoberfläche eruptierten Gesteinsschmelzen (80, 277a). Beide Schulen allerdings erklärten das Feuer, d.h. die hohen Temperaturen der Vulkane, durch oxidierende Schwefelkieslager oder brennende Kohleflöze im Erdinneren, ähnlich den Vorstellungen der Vorsokratiker. Nach den radikalen, zukunftsweisenden Vorstellungen von James Hutton (1795) jedoch entwickeln sich unter der Erdoberfläche heiße Schmelzherde, aus denen zu jeder Zeit Magmen aufsteigen können - sei es bis an die Erdoberfläche gelangend oder in der Tiefe abkühlend und so grobkörnige, plutonische Gesteine wie den Granit bildend. Anhänger dieser Schule wurden daher *Plutonisten* genannt, nach Pluto, dem Gott der Unterwelt. Es entbrannte ein Streit um die Erstarrung von Lavaströmen aus einer an der Erdoberfläche eruptierten Schmelze, in dem Goethe - ein Freund Werners - generell den Neptunisten zuneigte. Dieser Streit wurde schließlich, was die Quelle der Wärme betraf, zugunsten der Vulkanisten und der Plutonisten entschieden.

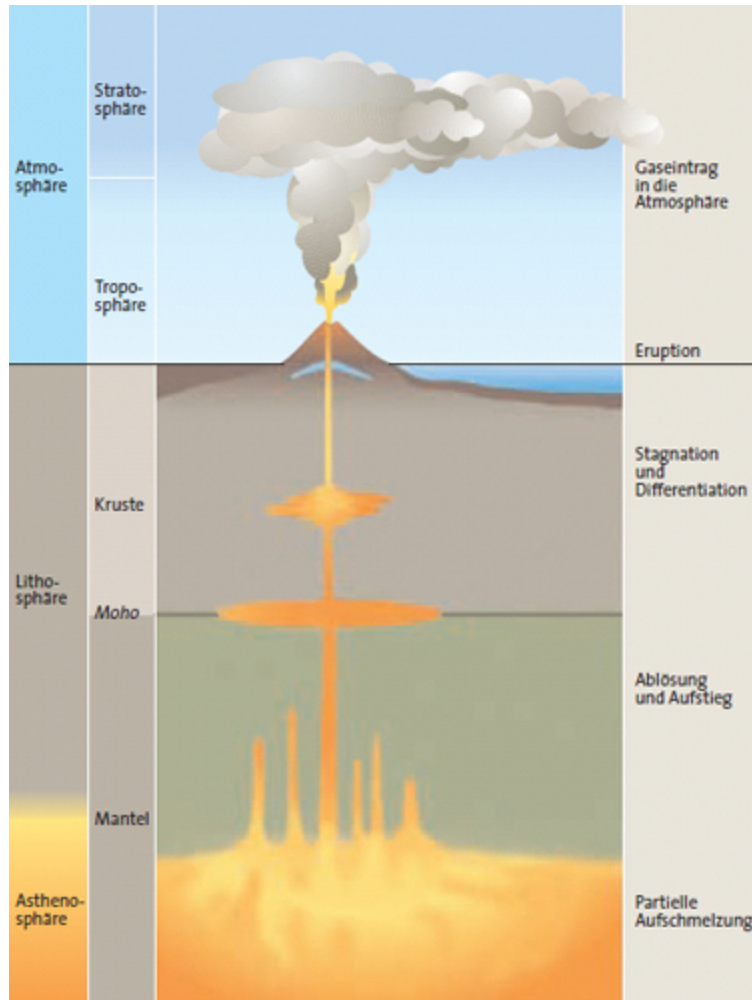


Abb 1.5: Schematisches Vulkan-Magma-System (nach 266).

Kontinentaldrift - Seafloor Spreading - Plattentektonik

Dass Vulkaneruptionen schon in den Anfängen der Entstehung unseres Planeten vor 4,6 Milliarden Jahren begannen, die Erdkruste aufzubauen – die erst später durch Erosion und Sedimentbildung modifiziert und durch Gebirgsbildung, Deformation und Metamorphose verändert wurde –, gehört seit langem zum Grundwissen der Erdwissenschaften. Dass aber auch heute tagtäglich die Erdplatten in den Scheitelzonen der Ozeanbecken aufreißen und durch aufdringende Gesteinsschmelzen

wieder verheilt werden, ist eine vergleichsweise neue Erkenntnis und Kern der zweiten großen Kontroverse in der Geschichte der Erdwissenschaften.

Im Jahr 1912 stellte Alfred Wegener der damals herrschenden Auffassung von der Permanenz der Ozeanbecken und Kontinente seine dynamischen Vorstellungen von auseinanderbrechenden und wandernden Kontinenten entgegen. Diese visionäre Sicht der Erdentwicklung revolutionierte erst in den 1960er-Jahren in der erweiterten Form des *Seafloor Spreading* und der *Plattentektonik* das gesamte Weltbild der Erdwissenschaften. Innerhalb weniger Jahre wurde eine neue Phase in der Erforschung der Vulkane und ihrer Entstehung eingeleitet. Heute kann man Vulkane sinnvollerweise nur innerhalb ihrer unterschiedlichen globalen Rahmenbedingungen interpretieren. Diesen plattentektonischen Rahmen diskutiere ich in Kapitel 2 ausführlicher und die daraus abgeleiteten drei vulkanischen Hauptzonen in den Kapiteln 5 bis 8.

Die Wurzeln der Vulkane aus heutiger Sicht

Ein Geomorphologe wird auf die Frage, was ein Vulkan sei, eine andere Antwort geben als ein Petrologe, ein Geophysiker wiederum wird eine andere Vorstellung über das haben, was eigentlich einen Vulkan ausmacht, als ein Geochemiker. Die immense Vielfalt der vulkanischen Vorgänge erlaubt keine einfache, schlüssige Antwort – eine rundum befriedigende Interpretation der Beobachtungen und eine Erklärung der Kausalzusammenhänge wird für die Forschung immer Ziel- und Wunschtraum bleiben. Dies liegt vor allem daran, dass die Ursprünge der Vulkane – ihre Wurzeln und gewissermaßen ihr Herz, die Magmakammer – in Erdtiefen liegen, die für die direkte Beobachtung unzugänglich sind. Wenn man heute versucht, die Fragen nach der Natur eines Vulkans befriedigend zu

beantworten, muss man – neben dem eigentlichen Vulkan – das tief reichende, viel umfassendere *Wurzelsystem* unter einem Vulkan mit betrachten. Dieses Vulkan-Magma-System habe ich der Einfachheit halber ([Abb. 1.5](#), [1.6](#)) in vier Tiefenzonen unterteilt: partielle Aufschmelzung, Ablösung und Aufstieg, Ansammlung in Magmareservoirs sowie Ausbruch.

Eine Diskussion dieser Wurzelbereiche muss am Anfang stehen, wenn wir verstehen wollen, wie und warum ein Vulkan entsteht – etwa an einer bestimmten Stelle der Erde, zu einer bestimmten Zeit und mit einer bestimmten Magmenzusammensetzung – oder wie er ausbricht, ob ruhig effusiv oder hochexplosiv. Kapitel 3 befasst sich daher mit den Tiefenregionen der Vulkane, mit der Entstehung, Zusammensetzung und Veränderung der Magmen und mit ihrer Kristallisation. Die magmatischen Gase, die rheologischen Eigenschaften der Magmen und ihr Eruptionsverhalten behandle ich in Kapitel 4.

Vulkane und Vulkaneruptionen

Die Form von Vulkanbauten ist zwar kein aktuelles Forschungsgebiet, jedoch sagt uns die Morphologie von Vulkanen eine Menge über die physikalischen Eigenschaften der eruptierten Magmen, über die spezifischen Eruptionsvorgänge und destabilisierenden Ereignisse. Aus diesem Grund und als Ergänzung zu den Kapiteln 5 bis 8 sowie als empirischer Rahmen für die Kapitel 10 bis 12 werden wichtige Vulkantypen und ihre extrusiven und effusiven Ablagerungen in Kapitel 9 vorgestellt.

Die meisten Vulkane brechen überwiegend explosiv aus. Explosive Vulkaneruptionen und ihre Ablagerungen, seit vielen Jahren im Mittelpunkt vulkanologischer Forschung, werden in vier Kapiteln diskutiert: einem allgemeinen (Kapitel 4) und drei speziellen (Kapitel 10 bis 12).

Wenn in den Medien über Vulkanausbrüche berichtet wird, geht es eigentlich immer um die Gefährdung von Menschen und Ansiedlungen und die sozialen Probleme, die sich aus der häufig notwendigen Evakuierung ergeben – d.h. also um die sogenannten Vulkankatastrophen, die eigentlich *gesellschaftliche* Katastrophen sind. Die Hauptgefahren, die von Vulkanen ausgehen, wie man heute Vulkane überwacht und wo man Erfolge in der Vorhersage von Vulkaneruptionen und der rechtzeitigen Evakuierung vor großen Ausbrüchen erzielt hat, sind die Hauptthemen von Kapitel 13.

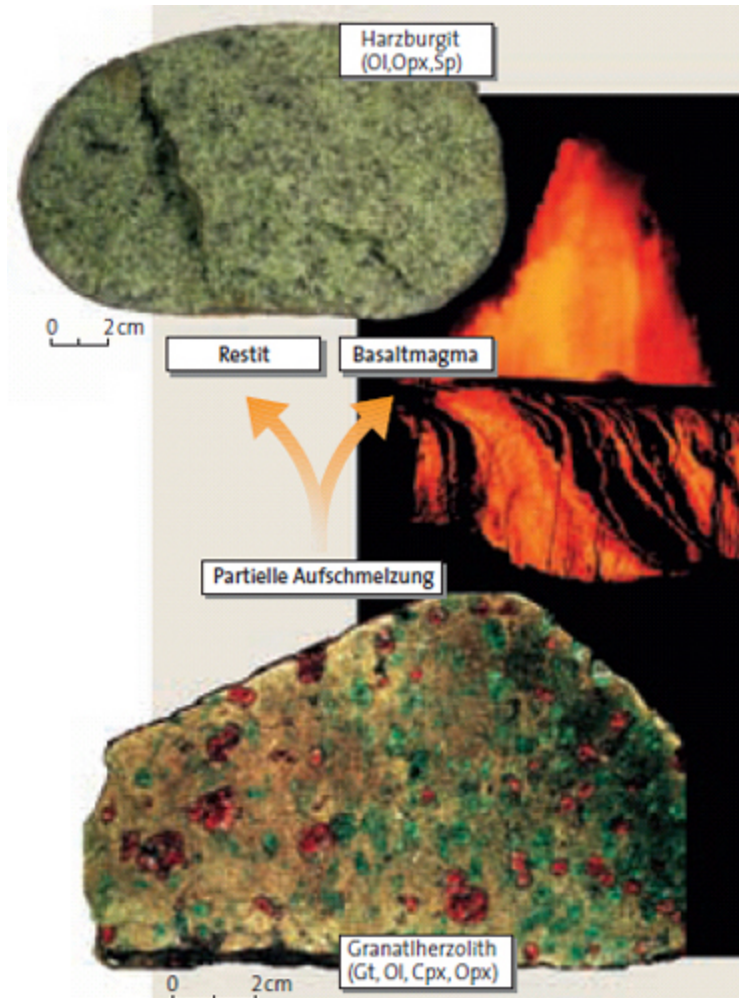


Abb 1.6: Bei der partiellen Aufschmelzung von Mantelperidotit (z.B. Granatlierzolith), dem Hauptmechanismus für die Magmenentstehung, werden einige Mineralphasen wie Granat und Pyroxen zuerst aufgeschmolzen. Der Hauptteil des überwiegend aus Olivin bestehenden Mantelgesteins bleibt kristallin. Dies sind die häufigsten sogenannten Olivinbomben, die in vielen basaltischen Vulkanen wie in der Eifel oder im Westerwald mit an die Erdoberfläche transportiert werden. Die bei der partiellen Aufschmelzung – meist unter 10 % – entstehenden Basaltschmelzen können dann aufsteigen und sich in Zwischenreservoirs im Mantel, an der Basis oder innerhalb der Kruste sammeln. Nur ein kleiner Teil schafft es bis an die Erdoberfläche. Vulkane sind also eigentlich Unfälle im gesamten Vulkan-Magma-Mantel-System. Nach Schmincke „Volcanism“ (2004).

Bei aktuellen Vulkaneruptionen wird häufig nachgefragt, ob die jeweilige Eruption auch das Klima beeinflussen kann – denn alles was mit dem Klima zu tun hat ist heutzutage in der Öffentlichkeit mit Recht zu einem beherrschenden