



*Vulkanisches Schwefelfeld  
(Foto: Thomas R. Walter, GFZ)*

# Vulkanische Risiken in Europa

Dr. Thomas R. Walter

## Der lange Weg des Magmas bis an die Oberfläche

Wir wissen heute, dass verschiedene Faktoren für die Bildung von vulkanischen Schmelzen wichtig sind, insbesondere die Zusammensetzung, der Volatilanteil, der Druck, sowie die Temperatur. Während der geologischen Vergangenheit sind verschiedene Kombinationen dieser Faktoren nachweisbar, wodurch auch die Art und Ausprägung des Vulkanismus an der Erdoberfläche geprägt wird. Gebildet wird das Magma zumeist in Tiefen des oberen Erdmantels und der unteren Erdkruste. Je nach tektonischer Lage kann Magma in 10 bis deutlich über 50 km Tiefe liegen. In tektonischen Spreizungszonen, wie etwa auf Island direkt zu beobachten, werden Magmen durch Dehnung und Audünnung der Kruste und einhergehender Druckentlastung des oberen Mantels gebildet. In Italien sind Magmen zumeist Ergebnis zweier konvergierender tektonischer Platten. In der Eifel hingegen wird davon ausgegangen, dass Magmen ihre Ursache in einem möglicherweise tief im Mantel verwurzelten Hotspot haben und dass sie infolge der Dekompression weiter verflüssigt sind.

Die lange Reise des Magmas in Richtung Erdoberfläche geschieht in größeren Tiefen zunächst in Tropfen- oder Diapirform. In geringeren Tiefen geschieht der Aufstieg entlang von Brüchen (Abb. 1). Anders ausgedrückt, steigt das Magma entlang von Schwächezonen auf, wobei diese entweder ältere und reaktivierte geologische Strukturen sind, oder aber durch den magmatischen Druck neu gebildete Dehnungsbrüche.

Geologen unterscheiden zwei Klassen magmatischer Gesteine, die sogenannten Pluto-

nite und die Vulkanite. Plutonite entstehen bei Kühlung und Kristallisation von geschmolzenem Gestein tief unter der Erdoberfläche. Vulkanite hingegen beschreiben ebene jene Gesteine, die durch Vulkanismus an die Erdoberfläche gefördert werden. Plutonite zeigen deutliche und grosse Kristalle und keine Gasblasen, Vulkanite zeigen eher kleinere oder keine Kristalle, jedoch deutliche Gasblasen. Einige Zwischenformen belegen die Komplexität des Magmenaufstiegs.

Der weitaus größte Anteil von Magma, das sich in Richtung Erdoberfläche bewegt, erreicht diese niemals. Untersuchungen an Plutoniten und Vulkaniten von Ozeaninseln, z. B. der Kanarischen Inseln, konnten zeigen, dass über 95 % solcher Intrusionen niemals zu Vulkaneruptionen geführt haben. In diesem Sinne scheint die Aktivität eines Vulkanes eher ein seltenes, außergewöhnliches Ereignis zu sein. Auch auf Island, am Ätna in Italien oder anderswo in Europa verbleibt der Großteil magmatischer Aktivität im Untergrund. Es ist noch immer nicht gänzlich verstanden, warum viele der Magmenbewegungen scheinbar plötzlich wieder „einfrieren“. Gängige Erklärungsmodelle sind hier das Nachlassen des magmatischen Überdrucks, thermische oder mechanische Barrieren in der Kruste, durch die das Magma nur schwer hindurchdringen kann, oder das Nachlassen der Auftriebskraft des Magmas: Ist die Dichte des Magmas ähnlich oder gar höher als die Dichte des umgebenden Gesteins, wirken einfache und plausible physikalische Gesetze gegen ein weiteres Aufsteigen des Magmas. Dieses „Level of neutral buoyancy“ ist zumeist in ca. 4 bis 5 km Tiefe zu finden, kann aber aufgrund von Spannungen in der Kruste und anderen Komplexitäten jedoch auch deutlich tiefer oder höher liegen.

*Dr. Thomas R. Walter  
Helmholtz-Zentrum  
Potsdam - Deutsches  
GeoForschungsZentrum  
GFZ, Sektion 2.1.  
„Erdbebenrisiko und  
Frühwarnung“*

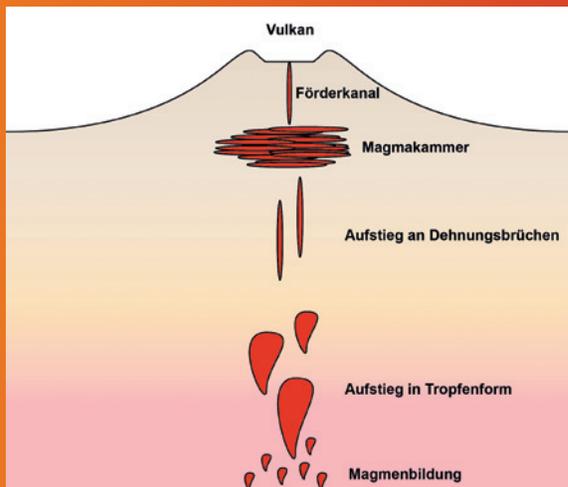


Abb. 1: Anatomie eines Vulkanes. An einem Beispielvulkan bilden sich in ca. 60 km Tiefe die Schmelzen. Der Aufstieg vermag anfangs aufgrund der verformbaren Umgebung in Tropfenform geschehen, später dann entlang von Dehnungsbrüchen. Wird ein Niveau erreicht bei dem die Dichte des heißen Magmas in etwa gleich der Dichte des Umgebungsgesteins ist, so bildet sich eine Magmakammer, in etwa 5 km Tiefe. Veränderungen in dieser sind durch Monitoringverfahren erkennbar.

### Was löst Vulkaneruptionen aus?

Häufig bleibt Magma auf seinem langen Weg nahe der Erdoberfläche, in nur vier Kilometer Tiefe in der Kruste stecken und bildet dort eine Magmakammer (vgl. Abb. 1). Derartige flache Magmakammern sind in Europa nicht ungewöhnlich; für ältere Eruptionen konnten sie bereits am Ätna, am Vesuv und den Phleg-räischen Feldern, auf Teneriffa, Gran Canaria, unter zahlreichen Vulkanen auf Island sowie unter dem Laacher See in der Eifel nachge-wiesen werden.

Was bewirkt nun den Ausbruch des Vulkans an der Erdoberfläche? Die Auslöser bewir-ken, vereinfacht gesagt, einen Anstieg des „Level of neutral buoyancy“ oder der Mobi-lität der Magma. Diese Auslöser („trigger“) lassen sich in drei Kategorien unterteilen: sie können von unterhalb der Magmakammer wirken, etwa in Form von neuem und hei-seren Magma, welches aus noch größeren Tiefen aufsteigt und sich mit der Magma-kammer vermengt. Zweitens können Trigger innerhalb der Magmakammer wirken, etwa in der Art, dass während der Kristallisation eines Teils der Schmelze neue Energie (Kris-

tallisationswärme) entsteht, und ein Teil des Magmas weiter verflüssigt und aufsteigen kann. Trigger können drittens oberhalb oder in größeren lateralen Entfernungen der Magmakammer auftreten. Es gibt zahlreiche Beispiele die zeigten, dass Vulkanausbrüche direkt an die Erdzeiten gekoppelt sind, andere sind – wie auf Island – an Perioden größter Schneeschmelze gekoppelt, und wie-der andere an tektonische Erdbeben.

Wie groß bzw. wie gering Druckveränderun-gen auf eine Magmakammer sein können, um Eruptionen zu fördern, zeigt das Beispiel des Stromboli in Italien. Die Stärke der Explosio-nen am Stromboli korreliert nicht nur mit der Windstärke, sondern sogar mit der Windrich-tung. Das gängige Erklärungsmodell hierfür ist, dass der Krater des Vulkans ähnlich ei-nem Schornstein bei Wind eine Sogwirkung entfaltet, die sich je nach meteorologischer Lage und topographischer Gegebenheit stär-ker oder schwächer auswirken kann.

Zweifelsohne lässt sich nicht bestätigen, dass derartig geringe Druckveränderungen wirklich zu Eruption führen können oder nur einen Eruptionsverlauf beeinflussen, und

es ist wohl eher von einer Verkettung von Triggern auszugehen. Die Suche nach dem Eruptionstrigger gestaltet sich bei vielen Vulkanen als eine äusserst schwierige Aufgabe, und verdeutlicht möglicherweise einmal mehr, wie wenig die wirkenden Prozesse wirklich verstanden sind.

### Vom Prozessverständnis zum Monitoring und umgekehrt

Die Eruption des Eyjafjallajökull im Jahre 2010 konnte prognostiziert werden. So konnte die Bevölkerung zeitig evakuiert werden, dennoch wurden die europaweiten Auswirkungen dramatisch spürbar. Auch andere Vulkaneruptionen zeigen zwar die prinzipiellen Möglichkeiten wie Grenzen der Vorhersage, jedoch sind die Probleme der Verkettung von Ereignissen mit einzubeziehen: 2010 wurde an den Flanken des Merapi Vulkanes in Indonesien nur einen Tag vor dem Hauptausbruch etwa eine Viertelmillion Einwohner evakuiert. Große Teile des dicht

besiedelten Bereiches am Fuße des Merapi wurden komplett verwüstet. Trotz dieser Massnahmen wurde aber der Luftverkehr am nahe gelegenen Flughafen und auch in Jakarta (worüber die Aschewolke verdriftete) nicht unmittelbar eingestellt.

Das richtige Deuten von Veränderungen an einem Vulkan setzt voraus, dass die wirkenden Prozesse und Verkettungen weitgehend verstanden sind. So kann mittlerweile als sichere Annahme gelten, dass große Vulkanausbrüche von Magmakammern ausgehen, die sich vor den Ausbrüchen ausdehnen. Dies geht oftmals einher mit der Erzeugung neuer Brüche im Gestein, oftmals nur wenige Dezimeter oder Meter lang. Magma entgast, zum Teil bereits in großen Tiefen unterhalb der Magmakammern, oder zum Teil erst in den letzten Kilometern. Diese Erkenntnisse haben ermöglicht, ein Messsystem zur Erfassung der Verformung, der Seismizität, und der Entgasung an Vulkanen zu entwickeln. Nur die Kombination dieser Messreihen und nur die Datenerfassung über einen längeren



Zeitraum („Monitoring“) erlaubt, auch ein kleineres Rumpeln von echten vulkanischen Krisen zu unterscheiden, und als Vorboten bevorstehender Ausbrüche zu erfassen. Auf der anderen Seite erlauben insbesondere diese Zeitreihen an gut vermessenen Vulkanen, die Prozesse wiederum besser zu verstehen und das Messsystem zu optimieren. Somit konnte bereits Wochen vor dem Ausbruch des Eyjafjallaköull 2010 eine deutliche Zunahme der Hebungsrate, einhergehend mit vulkantelektischen Erdbeben, registriert werden. Die Messtationen wurden dahingehend umplatziert, dass die Eruption mit der bestehenden Infrastruktur bestmöglich messbar wurde. Derzeit konzentrieren sich auf Island zahlreiche Forschungsaktivitäten auf Vulkane nahe grosser Eisschilde (Abb. 3). Die Wechselwirkung zwischen Vulkanen und Eis, bzw. Feuer und Wasser hat das Potenzial, den Luftverkehr Europas stark zu beeinträchtigen.

### Der Einfluss von Vulkaneruptionen auf Mitteleuropa

Der Ausbruch des isländischen Vulkanes Eyjafjallajökull hatte immense Folgen nicht nur für die deutsche oder mitteleuropäische Luftfahrt, sondern prinzipiell auch auf die Wissenschaft und Entscheidungsträger. Die Fragedabei nist nicht, ob es einen nächsten Vulkanausbruch geben wird, sonder nur wann und wie stark.

Global betrachtet sind etwa 1500 Vulkane als potentiell aktiv zu definieren. Einige hiervon vermögen Vulkanausbrüche mit der Magnitude 5 (gemessen als Volcano Explosivity Index VEI) oder größer zu erzeugen (Tab. 1), und damit nicht nur regionale, sondern globale Schäden zu verursachen, also auch in Mitteleuropa. Das Problem dabei ist das nicht-systematische Monitoring der Vulkane: von den 560 Vulkanen, die in den vergangenen 500 Jahren eruptierten, sind nur etwa 170 mit Instrumenten überwacht, die meisten davon

eher schlecht als recht. Dies liegt daran, dass Vulkane sich insbesondere Entwicklungs- und Schwellenländer finden, die technisch aufwändige Überwachung für diese schlicht zu kostspielig ist. Jedes Jahr eruptieren 60 bis 70 Vulkane, aufgrund fehlender Instrumentierungen viele hiervon ohne Vorwarnung. Zu Beginn der Aktivität auf der Kanareninsel El Hierro vor wenigen Jahren existierte kein dezidiertes Monitoringsystem auf der Insel.

Allein in Europa ereigneten sich seit dem Jahr 1800 über 250 bestätigte Eruptionen. Alle 0,8 Jahre geschieht in Europa ein Ausbruch (Tab. 2). Bezieht man die Häufigkeit auf die VEI-Magnitude, so nimmt die Anzahl der Eruptionen mit der Magnitude zwar ab. Dennoch ereignete sich in Europa im Mittel alle vier Jahre ein Ausbruch mit Magnitude größer 3, d. h. mit einer Magnitude, die durchaus mit jener des Isländischen Vulkanes Eyjafjallajökull vergleichbar ist. Eine Beeinträchtigung des internationalen Flugverkehrs Europas ist nicht aussergewöhnlich, wie beispielsweise die Jahre 1991, 2000, 2001 und 2002 sowie 2010 zeigten. Dabei sind die explosivsten und höchsten Vulkanausbrüche keineswegs auf Island zu erwarten, vielmehr sollte das Augenmerk hier eher Italien oder Griechenland gelten: So wölbte sich in den Jahren 2011/2012 die Insel Santorini dramatisch auf, es wurden zahlreiche Erdstösse und Entgasungen gemessen – alles Vorboten eines Ausbruches. Eine Eruption des Santorini-Vulkans wird als für das Ende der Minoischen Kultur verantwortlich angesehen. Diese Aktivitätsanzeichen auf Santorini beruhigten sich im April 2012 genauso schnell, wie sie gekommen waren. In ähnlicher Weise wölbt sich derzeit, im Frühjahr 2013, die Campi Flegrei-Caldera just nördlich von Neapel auf. Vorangegangene Ausbrüche eben dieser Flegreischer Felder erzeugten Eruptionen der Magnitude von 5 oder gar 6 (somit ist das Volumen der ausgeworfenen Asche bis zu drei Dimensionen größer als bei Eyjafjallajökull 2010). Die potentiellen Auswirkungen auf Europa sind bislang nicht Gegenstand wissen-

schaftlicher Auseinandersetzungen gewesen – hier ist dringender Handlungsbedarf.

Auch die Eifel in Westdeutschland ist relativ wenig erforscht und überwacht, und könnte somit durchaus für Überraschungen sorgen. Zwar liegt die letzte Eruption bereits über 8000 Jahre zurück, am Laacher See mit Ascheablagerungen noch im Berliner Raum, sogar 12000 Jahre, doch zeigten stratigraphische Untersuchungen, dass in der Eifel derartige Ruhephasen von einigen Jahrtausenden völlig normal sind. Geologen sind sich einig, dass die Vulkane der Eifel noch aktiv sind. Mehr noch: jüngste petrologische Untersuchungen zeigten, dass die Magmakammer, die zur Laacher See-Eruption führte, über 30000 Jahre eine aktive Magmakammer war, d.h. gefüllt mit heissem und fließfähigem Magma. Ob es derzeit noch aktive Magmenkammern in der Eifel gibt, ist nicht bekannt und bedarf dringend der Untersuchung. Eine Bewertung der Gefährdung und des Risikos

ist mit gegenwärtigen Daten schlicht nicht möglich, wäre aber mit Unterstützung nationaler Förderträger durchaus realisierbar.

### Wiederkehrende Ereignisse

Für die Wiederkehr von Ereignissen spricht man bei Vulkanen man nicht, wie bei Erdbeben, von Rekurrenz. Zur Charakterisierung vulkanischer Aktivität eignet sich eher die Dauer von Ruhephasen (Hiatus). Dies liegt daran, dass die Ereignisdauer bei Vulkaneruptionen Monate oder gar Jahre betragen kann. Bei Vulkanen sind die Ruhephasen, also die Perioden zwischen Ende einer Eruption und Beginn der folgenden Eruption von Aussagekraft. Obgleich nicht alle Vulkane regelmäßige wiederkehrende Eruptionen haben, lassen sich die meisten Vulkane mit einem kleinsten Zeitintervall zwischen Eruptionen ( $T_{\min}$ ), welches proportional zu dem Volumen einer Magmakammer ist, beschreiben.



*Abb. 3: Die Eruption des Vulkans Bárðarbunga auf Island begann im September 2014. Das Foto zeigt den Spaltenausbruch bei Holuhraun, im Nordosten Bárðarbungas. Derzeit ist noch völlig unklar, ob diese Eruption demnächst wieder aufhört oder noch über Monate andauert. Bereits jetzt gilt die Eruption mit ca. 1 km<sup>3</sup> Lava als eine der größten Eruptionen des Bárðarbunga seit Jahrhunderten. Die Auswirkungen auf Europa und den Luftverkehr wären gänzlich anders gewesen, wenn die Eruption unter dem nahen Vatnajökull-Gletscher stattgefunden hätte.*

Auch wurde ein Beziehung des Hiatus zur Energie, die bei explosiven Eruptionen frei wird, postuliert. Eine einfache empirische Relation besagt:  $\log \text{hiatus (in Jahren)} = \log \text{Magma volumen (in km}^3) + 2,5$ .

Bei den Ruhephasen vulkanischer Aktivität gilt daher die Faustregel, dass nach besonders großen und voluminösen Ausbrüchen mit einer ausgedehnteren Ruhephase gerechnet werden kann. Insbesondere die größten dokumentierten Eruptionen ereigneten sich aber an bis dato unbekanntem Vulkanen (21 der 25 größten Eruptionen). Das heisst, dass insbesondere jene Vulkanausbrüche, die Überregionale oder gar globale Auswirkungen haben, von Vulkanen ausgehen, die womöglich gar nicht als aktiv bekannt sind. Genau darin liegt die grosse Unsicherheit, potentielle Einflüsse von grossen und explosiven Ausbrüchen korrekt einzuschätzen.

### Forschungsbedarf

Die Eruption des Eyjafjallajökull zeigte auf sehr eindrucksvolle Weise, wie vulnerabel die technische Zivilisation Mitteleuropas geworden ist. Dass auch Deutschland die Auswirkungen einer vulkanischen Aktivität spürte, beruhte nicht zuletzt auf dem gewaltigen monetären Schaden durch den faktischen Stillstand des Luftverkehrs. Nach mehrere Beinaheabstürzen in Indonesien wurde 1987 der International Airways Volcano Watch (IAVM) gegründet, der sehr deutlich die notwendigen vier Kernpunkte definiert, die zur Luftsicherheit bei vulkanischen Gefährdungen beitragen: (1) Vulkanobservatorien zum Monitoring vor Vulkaneruptionen, (2) Meteorologische Büros, die offizielle Warnungen herausgeben, (3) Area control centres zur Kontrolle des Luftraums, und (4) Volcano ash advisory centers (VAAC), die sich – basierend auf Datenerhebungen und Vorwärtssimulationen – auf Prognosen von Asche und Dispersionsmodellen spezialisierten.

Nicht zuletzt aufgrund der immensen wirtschaftlichen Interessen besteht der Bedarf, dass sich Deutschland in jedem der obigen vier Kern-Arbeitsfelder aktiv einbringt. Bereits seit 2010 hat hier eine Entwicklung stattgefunden, die aber dringlichst ausgebaut werden muss. So müssen beispielsweise Grenzwerte für die erlaubte Konzentration von Asche nicht nur festgelegt, sondern wissenschaftlich und technologisch begründet und erforscht werden.

Aber auch besteht Forschungsbedarf in Hinsicht auf den derzeit ruhenden Vulkanismus in Deutschland. Die Möglichkeit eines Ausbruchs liegt nur unwesentlich über dem sogenannten Restrisiko, wird aber schon heute durch die Versicherungsindustrie durchaus ernst genommen. Dies sollte mehr als Ansporn sein, auch die Eifel im Hinblick auf die Bodenbewegungen, Seismizität, und Entgasung kontinuierlich und hochauflösend zu überwachen, nicht zuletzt um aus diesen Daten ein genaueres Bild des Untergrundes der Eifel zu erzielen, und auch mögliche Auslöser besser zu kennen. Verdrängung und Unwissenheit schützt nicht vor Naturgefahren – die beste Möglichkeit Naturrisiken zu mindern, ist vorbereitet zu sein und die Prozesse des Systems zu verstehen.

Tabelle 1: Volcano Explosivity Index und Einordnung der 2010 Eyjafjallajökull Eruption. Tephra ist alles an feinkörniges (fragmentiertes) Material.

VEI	0	1	2	3	4	5	6
Volumen Tephra [m <sup>3</sup> ]	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>11</sup>
Eruptionshöhe [km]	<0,1	<1	<5	<15	<25	>25	>35

Eyjafjallajökull

Tabelle 2: Häufigkeit der Vulkaneruptionen in Europa seit 1800.

VEI > 0	256 Eruptionen	Alle 0,8 Jahre
VEI > 2	157 Eruptionen	Alle 1–2 Jahre
VEI > 3	49 Eruptionen	Alle 4 Jahre
VEI > 4	6 Eruptionen	Alle 30 Jahre