



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: AGUST GUÐMUNDSSON

Warum sind Vulkanausbrüche so selten?

Ein Vulkan bricht aus, wenn ein mit Magma gefüllter Bruch im Gestein – ein Gang – bis zur Erdoberfläche vordringt. Neuen Untersuchungen zufolge werden die meisten solchen Gänge jedoch auf dem Weg nach oben gestoppt; anderenfalls gäbe es viel mehr Eruptionen. Was ist der Grund dafür?

Von Agust Gudmundsson
und Sonja L. Philipp

Nach aktuellen Schätzungen schwebt über 500 bis 600 Millionen Menschen das Damoklesschwert eines Vulkanausbruchs. Demnach sind etwa zehn Prozent der Menschheit durch aktive Feuerberge in ihrer näheren Umgebung bedroht – von der ökonomischen und sozialen Infrastruktur in den betreffenden Gebieten ganz abgesehen.

Das zeigt, wie wichtig es ist, drohende Vulkanausbrüche vorherzusagen zu können. Nur dann lässt sich rechtzeitig Vor-

◀ Hier stoppte vor 600 Jahren in Südwestisland durch einen Spalt aufsteigendes Magma nur fünf Meter unter dem Boden – an der Grenze zwischen einer Tuffschicht (beige) und einem Lavastrom (bläulich). So wurde im letzten Moment ein Vulkanausbruch verhindert. Viele »Gänge«, die von einer Magmakammer emporführen, bleiben wegen ungünstiger Spannungsverhältnisse stecken.

sorge treffen. Richtige Prognosen können aber nur dann gelingen, wenn wir das Verhalten der Feuerberge im Detail verstehen.

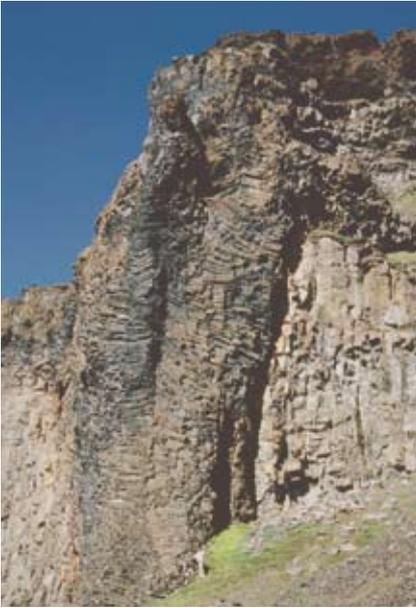
Ein Beispiel einer dicht bevölkerten Region in Europa, in der sich jederzeit eine Vulkankatastrophe ereignen kann, ist die Bucht von Neapel samt ihrer Umgebung. Mehrere Millionen Menschen leben hier in unmittelbarer Nähe von zwei großen, sehr gefährlichen Vulkanen: dem Vesuv und den Phlegräischen Feldern.

Bedrohliche »aktive« Feuerberge – das heißt solche, deren letzte Eruption weniger als 10 000 Jahre zurückliegt – gibt es aber auf allen Kontinenten. Jedes Jahr brechen etwa fünfzig bis sechzig von ihnen aus. Diese Zahl bezieht sich freilich nur auf Eruptionen oberhalb des Meeresspiegels, die als subaerisch bezeichnet werden. Die meiste vulkanische Aktivität – schätzungsweise achtzig Prozent – findet weitgehend unbemerkt auf dem Meeresboden statt, vor allem an mittelozeanischen Rücken.

Die Zahl von fünfzig bis sechzig Vulkanausbrüchen im Jahr mag viel erschei-

nen. Sie relativiert sich jedoch, wenn man bedenkt, dass es weltweit mindestens 1500 bis 1600 aktive große Vulkane gibt, die in kürzeren oder längeren Abständen immer wieder ausbrechen. Vermutlich noch einmal so viele scheinen zwar inaktiv, sind aber, da Feuerberge oft eine Lebensdauer von mehreren Millionen Jahren haben, nicht wirklich erloschen; es gab nur zufällig innerhalb der letzten 10 000 Jahre keine Eruption mehr oder sie wurde nicht entdeckt. Hinzu kommt eine unbekannte, aber sicherlich große Zahl von Vulkanen, die überhaupt nur ein einziges Mal Feuer speien.

Zu bedenken ist auch, dass unter großen Teilen der Erdoberfläche in der so genannten Asthenosphäre enorme Mengen geschmolzenen Gesteins lagern. Dieses Magma beschränkt sich also keinesfalls, wie von Laien oft angenommen, auf Kammern unter Vulkanen, sondern kommt fast überall in einer bestimmten Tiefe in der Erde vor. Wenn wir all das berücksichtigen, verwundert die Zahl von fünfzig bis sechzig jährlichen Eruptionen



◀ **Im Gegensatz zu dem Gang auf dem Foto auf S. 52 hat dieser inzwischen durch Erosion freigelegte, acht Meter breite Schlot die Oberfläche erreicht und vor 6000 Jahren einen Ausbruch in Nordisland gespeist.**

Damit erhebt sich die Frage: Warum sind Vulkanausbrüche so selten? Die Antwort spielt eine entscheidende Rolle für die Vorhersage solcher Eruptionen und die Risikoabschätzung. Zugleich hat sie große Bedeutung für das allgemeine Verständnis, wie Vulkane funktionieren – naturgemäß eines der Hauptziele der Vulkanologie.

Eines ist klar: Damit ein Vulkanausbruch stattfindet, muss ein mit Magma gefüllter Riss, das heißt ein Gang, in der Erdkruste bis an die Oberfläche vordringen. Deshalb können wir unsere Frage konkreter formulieren: Warum enden so viele Gänge innerhalb der Erdkruste und warum schaffen es einige wenige dennoch, sich bis zur Erdoberfläche fortzusetzen? Welche Bedingungen müssen also erfüllt sein, damit Magma durch einen Bruch ins Freie gelangen kann?

Die Suche nach der Antwort führt uns in den Bereich eines neuen Spezialgebiets der Geowissenschaften: der Vulkantektonik. Diese Disziplin konzentriert sich auf die physikalischen Prozesse, die innerhalb von Vulkanen auftreten, und untersucht, wie sich diese in den Vorgängen an der Oberfläche widerspiegeln. Dabei strebt sie nach einem Verständnis des Geschehens auf der Basis der Materialeigenschaften unter Rück-

griff auf Prinzipien der Mechanik sowie der Physik von Fluiden und Feststoffen.

Als fruchtbar haben sich in diesem Zusammenhang Konzepte aus der Materialwissenschaft erwiesen. Bedeutende Fortschritte brachte insbesondere der Vergleich von Vulkanen mit Verbundwerkstoffen. In diesen sind mehrere Materialien mit sehr unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften kombiniert. In ähnlicher Weise bestehen auch Vulkane oft aus vielerlei Gesteinsschichten sehr unterschiedlicher Härte, Elastizität und Bruchfestigkeit. Wenn man dies berücksichtigt, lassen sich viele Eigenarten der Feuerberge erklären – darunter auch, warum sie nur so selten ausbrechen.

Die Rolle der Magmakammer

Die meisten Zentralvulkane, also solche mit einem charakteristischen Kegel, werden von Magma aus einer Kammer in der Erdkruste unter ihnen gespeist. Dort sammelt sich Gesteinsschmelze, die aus einer tieferen Quelle im Erdmantel aufgestiegen ist. Wenn der Druck in der Kammer zu groß wird, zerreißt deren Dach. Es bilden sich Spalten, durch die das Magma weiter nach oben gedrückt wird. Diejenigen Gänge, welche die Oberfläche erreichen, fungieren dann als Förderkanäle, durch die vulkanisches Material in die Umgebung austritt. Dort bildet sich der Zentralvulkan. Ohne Magmakammern in der Kruste würden keine solchen charakteristischen Kegelberge entstehen, und der Vulkanismus wäre wesentlich gleichmäßiger über die Erdoberfläche verteilt.

Die unterirdischen Magmareservoire, die sich in relativ geringen Tiefen von ein bis zehn Kilometern befinden, sammeln aber nicht nur Gesteinsschmelze aus dem Erdmantel, sondern trennen sie auch chemisch-mineralogisch auf. Vor allem eine bestimmte Fraktion steigt dann jeweils durch Gänge oder andere Förderkanäle weiter auf – bis zur Austrittsstelle an der Oberfläche, wo sich nach und nach der Vulkankegel bildet.

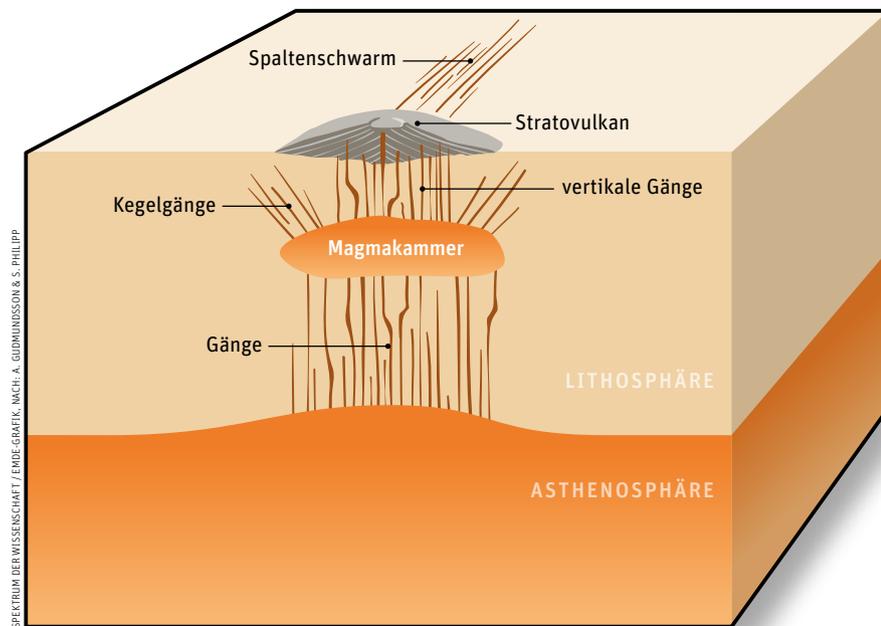
Die Bewegung der Schmelze in der Tiefe erzeugt Erdbeben sowie Landhebungen oder -senkungen. An diesen Signalen lässt sich erkennen, wo sich aktive Magmakammern befinden, und abschätzen, wie groß sie sind. Meist haben sie ein Volumen von 5 bis 500 Kubikkilometern, was bei Kugelform einen Durchmesser zwischen zwei und acht Kilometern bedeutet. Einige Magma-

▷ tionen nicht mehr – im Gegenteil: Vor diesem Hintergrund überrascht es eher, dass Vulkanausbrüche nicht viel häufiger auftreten.

Das Erstaunen wächst noch, wenn man sich vor Augen hält, dass Unruheperioden in Vulkanen – Zeiträume, in denen Magma aufsteigt, der Boden answillt und Erdbeben auftreten – wesentlich häufiger sind als eigentliche Ausbrüche. Dies aber bedeutet nichts anderes, als dass in den meisten Fällen eine sich anbahnende Eruption schließlich doch nicht stattfindet. Selbst Unruheperioden, bei denen nachweislich Gesteinsschmelze durch Gänge gepresst wird, enden überwiegend nicht in einem Ausbruch.

In Kürze

- ▶ Aus dem Erdmantel **empordringendes Magma** sammelt sich meist zunächst in einer Kammer im Untergrund eines Vulkans. In deren Dach können sich bei steigendem Druck Brüche bilden, die als **Gänge** für den weiteren Aufstieg der Gesteinsschmelze fungieren.
- ▶ Brüche breiten sich entlang der Richtung der **maximalen Druckspannung** im Gestein aus. Wechselt diese Richtung an einer Schichtgrenze abrupt, stoppt der betreffende Gang in vielen Fällen.
- ▶ Dadurch findet nur jeder vierte bis zehnte **Vulkanausbruch**, der sich anbahnt, auch tatsächlich statt.
- ▶ Unter bruchmechanischem Aspekt ähneln viele Vulkane **Verbundwerkstoffen**. Ihr Eruptionsverhalten lässt sich daher analog zur Rissausbreitung in Kompositmaterialien am Computer modellieren.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / FENDE GRÄTIC, ILLUSTR. A. GUÐMUNDSSON & S. PHILIPP

Unter der festen äußersten Schale der Erde, der Lithosphäre, befindet sich eine etwa 200 Kilometer dicke Schicht, die zum Teil geschmolzen ist und Asthenosphäre genannt wird. Von dort steigt an einzelnen Stellen durch vertikale Spalten – die Gänge – Magma empor. Es sammelt sich in der Erdkruste, dem oberen Teil der Lithosphäre, zunächst in Kammern und verändert sich dort durch Reaktion mit dem Umgebungsgestein, wobei ein Teil auskristallisiert. Die restliche Schmelze bahnt sich wiederum durch Spalten, darunter auch schräg verlaufende Kegelgänge, den weiteren Weg aufwärts und gelangt so manchmal bis zur Oberfläche, wo sie austritt und einen Vulkan bildet.

kammern sind jedoch größer. Bei den gewaltigsten explosiven Eruptionen in der Vergangenheit wurden 1000 bis 5000 Kubikkilometer vulkanisches Material ausgestoßen. Im Fall einer kugelförmigen Magmakammer hätte deren Durchmesser bei 12 bis 21 Kilometern gelegen.

In der Realität dürfte die Kugelform jedoch kaum vorkommen, vielleicht nur bei kleinen Reservoiren am Ende ihrer Lebensdauer. Öfter bilden sich mehr oder weniger verzerrte Ellipsoide. Einige ehemalige solche Kammern lassen sich auf Island als Plutone – in der Tiefe erstarrte Magmakörper, die durch Erosion an der Oberfläche freigelegt wurden – zu Fuß erkunden.

Die meisten Magmakammern sind aber wohl flach wie Münzen. Das gilt insbesondere für diejenigen an den mittelozeanischen Rücken. Münzenförmig waren vermutlich auch die Magmareservoire, aus denen sich die größten explosiven Eruptionen in der Erdgeschichte speisten. Dabei entstanden riesige Calderen, deren horizontale Ausdehnung den Abmessungen der Magmakammer entsprechen haben dürfte. Die größten solchen Einsturzkessel sind etwa achtzig Kilometer lang und dreißig Kilometer breit, nehmen also eine Fläche von mehr als 2000 Quadratkilometern ein. Bei 5000 Kubikkilometern an ausgestoßenem Material muss die Mächtigkeit oder vertikale Ausdehnung der Kammer demnach zwei bis drei Kilometer betragen haben.

Wie aber gelangt die Gesteinsschmelze aus dem unterirdischen Reservoir an die Oberfläche? Spaltenvulkane, deren Kraterreihen die häufigsten Oberflächenerscheinungen von Vulkanausbrüchen sind, werden durch lange, rissartige Gänge mit Magma versorgt. Das gilt aber auch für den größten Teil der anderen Feuerberge. Viele Zentralvulkane entwickeln zwar zusätzlich röhrenartige Förderkanäle. Diese bilden sich jedoch meist erst nachträglich durch Erosion aus spaltenförmigen Brüchen – und das auch nur verhältnismäßig dicht unter der Oberfläche.

Die meisten Gänge verlaufen fast vertikal oder zumindest sehr steil. Ausnahmen finden sich allerdings in einigen Zentralvulkanen, wo Kegelgänge schräg nach außen ziehen. In tief erodierten Gebieten auf Island lässt sich direkt beobachten, wie Förderkanäle von ihrer erloschenen Magmakammer wegführen.

Je nach der Größe der Magmakammer und dem darin herrschenden Druck kann das Gesteinsvolumen, das ein einzelner Gang an die Oberfläche befördert, stark variieren. Zum Beispiel hat der größte irdische Lavastrom aus historischer Zeit, Laki in Südisland, ein Volumen von etwa 14 Kubikkilometern; der mächtigste Lavastrom der letzten 10000 Jahre, Thjorsarhraun in Südisland, kommt sogar auf zwanzig bis dreißig Kubikkilometer. Im erdgeschichtlichen Vergleich ist das jedoch immer noch wenig. So umfasst ein basaltischer Lavastrom des Columbia-River-Plateaus in den

westlichen USA, der vor 640000 Jahren austrat, mindestens 700 Kubikkilometer. Noch ältere Flutbasalte haben geschätzte Volumina von 2000 bis 3000 Kubikkilometern; das entspricht in etwa den Gesteinsmengen, die bei den größten explosiven Eruptionen ausgeworfen wurden.

Gestoppte Gänge

Kämen alle Gänge, die von Magmakammern ausgehen, bis an die Oberfläche, wären Vulkanausbrüche ungefähr vier- bis zehnmals so häufig, wie sie es tatsächlich sind. Somit gäbe es statt 50 bis 60 etwa 200 bis 600 subaerische Eruptionen pro Jahr. Offenbar breiten sich die meisten Brüche, die von Magmakammern ausgehen, nur ein Stück weit aus und stoppen dann. Das zeigen Aufzeichnungen von Erdbeben, geodätische Vermessungen aktiver Vulkane und Untersuchungen an Gängen in tief erodierten erloschenen Feuerbergen. Demnach dringen im langfristigen Durchschnitt nur rund 10 bis 25 Prozent aller von einer Magmakammer wegführenden Gänge bis zur Erdoberfläche vor und liefern Magma für einen Ausbruch.

Ein dramatisches Beispiel stammt aus Südwestisland nahe der Hauptstadt Reykjavik. Hier machte vor 600 Jahren ein basaltischer Gang nur fünf Meter unter der Oberfläche Halt (Bild auf S. 52). Das 1100 Grad Celsius heiße Magma gelangte also bis dicht unter die Füße der damals dort lebenden Menschen. Sicherlich gab es Erdbeben und das umgebende Grundwasser verdampfte.



▲ An erloschenen, stark erodierten Zentralvulkanen lässt sich deren innere Struktur unmittelbar erkennen. Die erstarrte Magmakammer erscheint dann als so genannter Pluton aus einem Tiefengestein wie Granit oder Gabbro. Die ehemaligen Gänge bilden Adern aus verfestigtem Magma. In dem hier gezeigten Slaufudalur-Pluton im Südosten Islands sieht man, wie solche Gänge vom Dach der Kammer ausgehen.



▲ Die zwei Haupttypen von Gängen sind auf diesem Foto zu sehen: ein vertikaler Gang (unten) und ein horizontaler Lagergang (Mitte).

▷ Doch welche Bedingungen im Boden führten dazu, dass das aufsteigende Magma nur fünf Meter unter der Oberfläche noch stecken blieb? Oder allgemein gefragt, welche Umstände oder Prozesse hindern Gänge am weiteren Vordringen und unterbinden so eine Eruption? In diesem Zusammenhang gibt es eine interessante Beobachtung: Bei basaltischen Vulkanen wie den Hawaii-Inseln im Pazifik und La Réunion im Indischen Ozean kommt es im Allgemeinen sehr viel häufiger zu Eruptionen durch Gänge als bei typischen Schichtvulkanen wie dem Fuji in Japan oder dem Vesuv in Italien. Woran liegt das?

Den Schlüssel zur Beantwortung dieser Fragen liefert die Feststellung, dass Gänge das Ergebnis von Brüchen sind. Ein Bruch wird nur gebildet und breitet sich aus, wenn der Spannungszustand im Material, in dem er stattfindet, einen bestimmten Grenzwert überschreitet.

Die mechanische Spannung ist definiert als die Kraft, die pro Flächeneinheit an einem Festkörper angreift oder in ihm wirkt. Damit entspricht sie dem Druck in Flüssigkeiten. Doch gibt es einen wichtigen Unterschied: Anders als in Flüssigkeiten kann die Spannung in Festkörpern in verschiedenen Richtungen unterschiedlich groß sein.

In der Erde werden Spannungen unter anderem durch den Auftrieb von Magma in der Tiefe oder durch das Gewicht eines Krustenblocks hervorgerufen. Übersteigen sie die Festigkeit des umgebenden Gesteins, kommt es zum Bruch, der sich als großräumiger Riss fortpflanzt. Sobald dieser Riss eine Grenzfläche oder eine Gesteinsschicht erreicht, in der ein anderer Spannungszustand herrscht, wirken neue Kräfte auf ihn ein. Dann kann es passieren, dass er seinen Weg ändert oder gestoppt wird. All das gehört zu den Prinzipien der Bruchmechanik und betrifft die Bruchentwicklung in jeder Art von Feststoff – gleich ob Metall, Verbundwerkstoff oder Gestein.

Damit sich ein Gang durch eine Gesteinsschicht in einem Vulkan ausbreiten kann, muss die minimale Druckspannung in dieser Schicht senkrecht und die maximale parallel zu ihm ausgerichtet sein. Stößt zum Beispiel ein vertikaler Bruch bei seiner Fortpflanzung auf ein Gesteinspaket, in dem die maximale kompressive Spannung horizontal verläuft, bestehen zwei Möglichkeiten: ▷

VULKANTYPEN



Der 9000 Jahre alte Skjaldbreiður im Südwesten Islands ist ein typischer Lavaschild.

ALLGEMEIN GESPROCHEN IST EIN VULKAN eine Stelle oder Öffnung an der Erdoberfläche, an der geschmolzenes oder zertrümmertes Gestein in Verbindung mit heißen Gasen austritt. Zugleich bezeichnet der Ausdruck den Hügel oder Berg, zu dem sich die ausgestoßenen Materialien anhäufen. Geschmolzenes Gestein wird, solange es sich im Erdinneren befindet, Magma und nach dem Austritt Lava genannt. Die festen Auswurfprodukte – je nach Teilchengröße handelt es sich um Asche, Lapilli oder Bomben – heißen Tephra oder pyroklastisches Gestein.

Feuerberge lassen sich nach der Häufigkeit ihrer Ausbrüche und ihrer internen Struktur in zwei Haupttypen unterteilen: monogene Vulkane, die sich bei nur einem, teils jahrzehntelangen Ausbruch bilden und dabei in erster Linie basaltische Magmen fördern, und polygene Zentralvulkane, die im Verlauf einer Vielzahl von Eruptionen Materialien verschiedener Zusammensetzung und Eigenschaften ausstoßen.

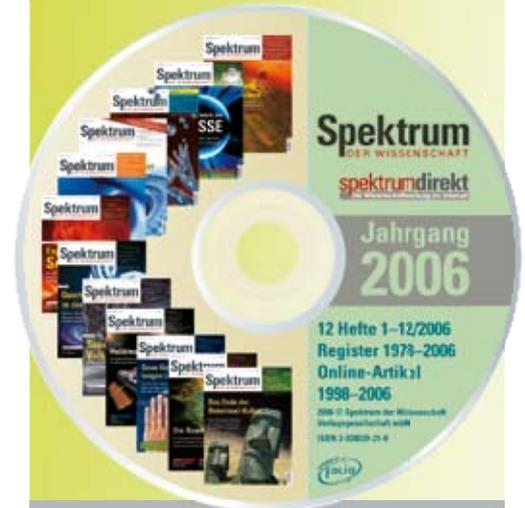
MONOGENE VULKANE SIND DER HÄUFIGERE TYP. Sie umfassen unter anderem Lavaschilde, Kraterreihen (Spaltenvulkane) und Maare (wie sie in der Eifel häufig sind). Ihre genaue Anzahl kennt man nicht, und oft ist es eine Ermessensfrage, was man als eigenen Vulkan bezeichnet oder welche Einzelkrater zu einem größeren Komplex zusammengefasst werden.

Die 1500 bis 1600 aktiven subaerischen Feuerberge auf der Erde, von denen etwa 550 in historischer Zeit ausgebrochen sind, gehören überwiegend zu den polygenen Zentralvulkanen. Diese fördern nicht nur Lavaströme, sondern sind auch berüchtigt für explosive Eruptionen, bei denen sie pyroklastische Gesteine auswerfen. Ihrer Entstehung und äußeren Erscheinung nach unterscheidet man drei Typen: Schicht- oder Stratovulkane, Schildvulkane und Calderen. Zu den erstgenannten zählen einige der berühmtesten Feuerberge wie der Fuji in Japan, der Vesuv in Italien, der Merapi in Indonesien, der Mayon auf den Philippinen und die Hekla in Island. Stratovulkane bilden einen relativ steilen Kegel und sind aus verschiedenartigen Gesteinsschichten aufgebaut; meist wechseln erstarrte Lavaströme und pyroklastische Lagen miteinander ab.

Schildvulkane steigen sanfter an, sind aber dennoch die größten Vulkane der Erde – als Paradebeispiel kann der Mauna Loa auf Hawaii gelten, der sich vom Meeresboden aus 9000 Meter hoch erhebt. Auch sie werden in einer Vielzahl von Eruptionen aufgebaut, wobei jedoch meist nur basaltische Lava auströmt und erstarrt.

VIELE STRATO- UND SCHILDVULKANE ENTWICKELN IRGENDWANN CALDEREN. Dies sind kreis- bis ellipsenförmige, kesselartige Senken mit einem Längsdurchmesser von mehr als zwei Kilometern. Sie entstehen, wenn die Decke der Magmakammer einbricht. Das größte bekannte Exemplar auf der Erde ist die Toba-Caldera auf Sumatra (Indonesien). Sie bildete sich vor etwa 75 000 Jahren bei einer enormen explosiven Eruption und hat einen Längsdurchmesser von 80 bis 100 Kilometern.

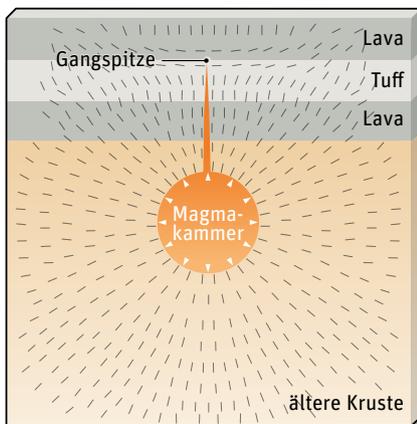
EIN STARKER JAHRGANG ...



... ist die CD-ROM 2006 von **Spektrum der Wissenschaft**. Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt-Archiv** mit über 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgang-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland). Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

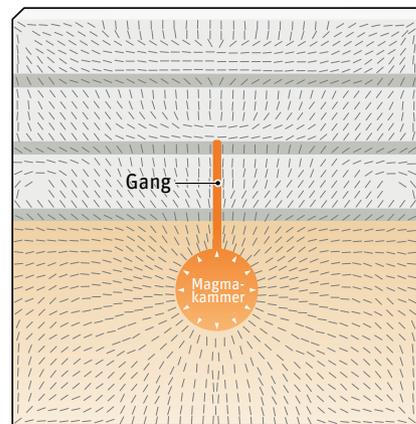
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: A. GUDMUNDSSON & S. PHILIPP

Im Computermodell lässt sich reproduzieren, wie ein Gang an der Grenze zwischen einer relativ weichen Tuffschicht aus Asche und einem steifen Lavaström darüber gestoppt wird. Die Richtung der maximalen Druckspannung, ist durch kurze graue Linien angedeutet.

Statt an der Grenze zu einer undurchdringlichen Schicht zu stoppen, kann ein Gang auch in die Horizontale schwenken – zum Lagergang werden – und dort, wo die Spannungsverhältnisse dies wieder erlauben, den Weg nach oben fortsetzen.



▷ Er knickt ab und wird zum horizontalen Lagergang, wobei er unter geeigneten Bedingungen nach einer gewissen Strecke wieder nach oben abbiegen kann, oder

▷ er bleibt stecken und kommt zum Stillstand.

Beide Fälle sind aus Geländebeobachtungen gut bekannt. Welcher davon eintritt, hängt von der Art des Kontakts zwischen den Gesteinsschichten, der Tiefe unter der Erdoberfläche und dem Magmadruck im Gang ab. Meist jedoch stoppt der Bruch, wenn eine solche Situation eintritt, und es kommt zu keiner Eruption.

Um die Wahrscheinlichkeit dafür abzuschätzen, ob ein Gang während einer vulkanischen Unruhephase die Oberfläche erreicht oder zum Stehen kommt, verwenden wir in der Abteilung Strukturgeologie und Geodynamik der Universität Göttingen numerische Modelle. Diese erlauben uns, den Spannungs-

stand in allen Schichten des Vulkans grob zu berechnen. Daraus wiederum können wir abschätzen, welchen Weg ein Bruch wahrscheinlich nehmen wird.

Damit ein Vulkan ausbrechen kann, muss sich, wie gesagt, mindestens ein durchgehender Gang von der Magma-kammer bis zur Oberfläche bilden. Das aber setzt voraus, dass jede Schicht und jede Grenzfläche, die der Bruch passiert, einen Spannungszustand aufweist, der seine Ausbreitung begünstigt. Mit anderen Worten: Die Spannung im Vulkankegel muss möglichst homogen sein. Nach unseren Simulationen trifft das bei Stratovulkanen, die aus verschiedenartigen Gesteinsschichten aufgebaut sind und einen relativ steilen Kegel bilden, nur selten zu.

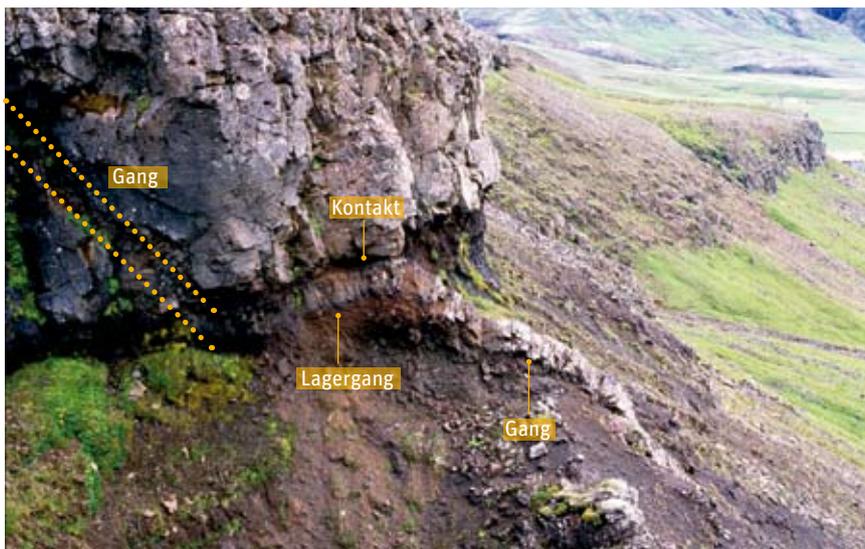
Das deckt sich mit den Beobachtungen. Viele Stratovulkane brechen ausgesprochen selten aus. Zum Beispiel wurden in den letzten 200 Jahren insgesamt 16 große explosive Eruptionen re-

gistriert. Elf davon ereigneten sich an Feuerbergen, von denen es keine Berichte über frühere Ausbrüche gab – weshalb ihre vorletzte Eruption in prähistorischer Zeit stattgefunden haben muss, also einige Jahrtausende zurückliegt. In allen elf Fällen mit derart großem Abstand zwischen den jüngsten Ausbrüchen handelte es sich um Stratovulkane oder Calderen.

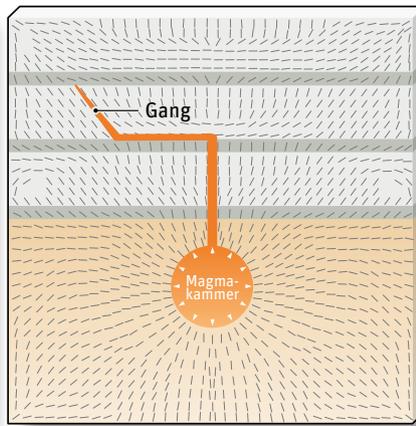
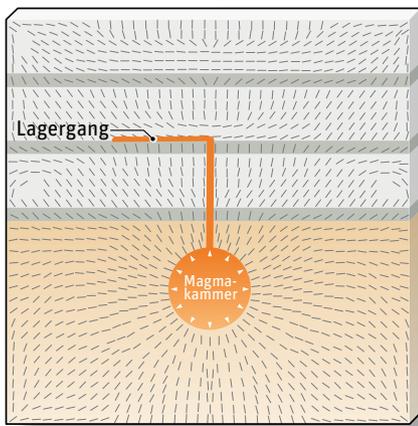
Neben diesen elf explosiven gab es in den letzten zwei Jahrhunderten auch jährlich ein bis zwei nichtexplosive Eruptionen ohne vorhergehende historisch belegte Aktivität. Die meisten davon ereigneten sich ebenfalls an Stratovulkanen. Offenbar haben diese demnach lange Ruhezeiten zwischen einzelnen Ausbrüchen.

Ganz anders verhalten sich die großen basaltischen Schildvulkane, die weniger steil und weit gehend homogen sind. Einige von ihnen brechen erstaunlich oft aus. So gab es in den vergangenen fünfzig Jahren im Mittel alle fünfzehn Monate eine Eruption des Piton de la Fournaise auf Réunion. Davor lag die Ausbruchshäufigkeit zwar etwas niedriger, war aber gleichwohl außergewöhnlich hoch. Seit dem 17. Jahrhundert hat der Vulkan 170-mal Lava gespien, also alle zwei bis drei Jahre. Dies zeigt, dass über Jahrhunderte hinweg die meisten Gänge bis zur Oberfläche vorgedrungen sind.

Ähnliches gilt für den Ätna auf Sizilien, den größten Vulkan Europas. Auch



Wie in der obigen Computersimulation biegt dieser Gang in Westland an der weichen Kontaktschicht zwischen zwei Lavaströmen ab, wird zum horizontalen Lagergang und verläuft wenig später wieder schräg aufwärts.



er ist in den letzten Jahrzehnten sehr häufig ausgebrochen. Seine Basis bildet ein großer basaltischer Schild, dem mehrere kleinere Stratovulkane aufsitzen. In historischer Zeit waren seine Lavaströme ausnahmslos basaltisch und damit siliziumarm, doch enthält der Ätna auch siliziumreichere Schichten von früheren Ausbrüchen, bei denen glühende Aschewolken vermischt mit größeren Gesteinsbrocken als so genannte pyroklastische Ströme den Hang herabtrast. In den letzten drei Jahrzehnten gab es im Mittel eine Eruption im Jahr, wobei das Magma in der Regel durch Gänge aufstieg. Diese können die Oberfläche des Ätna demnach leicht erreichen.

Auch der Mauna Loa auf Hawaii, der größte Vulkan der Erde, ist ein basaltischer Schildvulkan. Seit 1843, als die detaillierte Aufzeichnung seiner Aktivität begann, wurden 38 Ausbrüche gezählt. Demnach ist in diesem Zeitraum durchschnittlich alle vier Jahre ein Gang bis zur Oberfläche des Mauna Loa vorgebrungen.

Was Vulkane und Verbundwerkstoffe gemeinsam haben

Warum werden in Stratovulkanen anscheinend mehr Gänge gestoppt als in ihren Gegenstücken aus Basalt? Wie unsere Computersimulationen ergaben, liegt die Antwort im Aufbau dieser Vulkane aus verschiedenartigen Gesteinen wie Pyroklasten, Sedimenten, Lavaströmen und Intrusionen. Diese haben teils sehr unterschiedliche Eigenschaften. Manche sind ziemlich weich, andere ausgesprochen steif. Daraus ergeben sich große Unterschiede in den lokalen Spannungen. Deshalb ist es schwierig für einen Gang, einen Weg durch all diese Schichten und Schichtgrenzen zu finden.

Immer wieder stößt er auf neues Gestein, und manchmal herrscht die größte Druckspannung eben senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung oder weiche Lagen fangen Spannungen durch plastische Verformung ab.

Ein Schildvulkan hingegen setzt sich fast völlig aus basaltischen Lavaströmen mit sehr ähnlichen mechanischen Eigenschaften zusammen. Deshalb ist es für einen Gang hier wesentlich einfacher, eine Route nach oben zu finden, an der entlang die Spannungen überall günstig orientiert sind. Dieser Unterschied erklärt auch, warum Calderen in basaltischen Vulkanen viel häufiger entstehen und sich weiterentwickeln als in Stratovulkanen. Aber das ist eine andere Geschichte.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass unsere Untersuchungen vor allem eines gezeigt haben: Stratovulkane verhalten sich ähnlich wie Verbundwerkstoffe. Das ist auch nicht weiter verwunderlich, denn wie diese sind sie aus unterschiedlichen Materialien aufgebaut. In der Natur kommen Verbundwerkstoffe verbreitet in der Biologie vor. Bäume, Knochen und Muskeln sind nur einige Beispiele. Im technischen Bereich gehören so bekannte, häufig verwendete Materialien wie Beton oder Sperrholz zu dieser Stoffklasse. Vor allem geschichtete Verbundwerkstoffe wie Sperrholz werden in der Industrie heute vielfach in Flugzeugen, Raumfähren, Automobilen, Schiffen und Sportartikeln – zum Beispiel Skiern – eingesetzt. Meist sind sie relativ leicht und vor allem ziemlich fest, sodass sich Brüche nur sehr schlecht darin ausbreiten können.

Das hat denselben Grund wie die schwierige Gangausbildung in Stratovulkanen: Wechselnde lokale Spannun-

gen an Kontakten zwischen den verschiedenen Schichten behindern oder stoppen die Ausbreitung von Brüchen. Übrigens werden Stratovulkane im Englischen oft als *composite volcanoes* bezeichnet und damit auch begrifflich in die Nähe der Verbundwerkstoffe gerückt, die *composite materials* heißen.

Um das Ausbruchrisiko von Vulkanen besser abschätzen zu können, dürfte es sich jedenfalls empfehlen, in Zukunft auch Spannungsmessungen im Untergrund durchzuführen. Dabei kann man sich zunächst auf die gefährlichsten Feuerberge beschränken. Mittels einer oder mehrerer Bohrungen lassen sich dort die Spannungen in verschiedenen Tiefen ermitteln. Die erhaltenen Daten sollten dann Aufschluss darüber geben, ob ein Gang, der sich in einer Unruheperiode gebildet hat und einer Magmakammer entspringt, höchstwahrscheinlich die Oberfläche erreicht und folglich ein Ausbruch droht. Zeigt sich dagegen, dass er durch wechselnde lokale Spannungen vermutlich unterwegs gestoppt wird, kann Entwarnung gegeben werden. ◁



Agust Gudmundsson hat nach Professuren am Nordischen Vulkanologischen Institut in Reykjavik und an der Universität Bergen (Norwegen) seit 2003 den Lehrstuhl für Strukturgeologie und Geodynamik an der Universität Göttingen inne. 2002 wurde er zum Mitglied der Academia Europaea gewählt. **Sonja L. Philipp** hat in Jena Geologie studiert und in Bergen promoviert und ist seit Juli 2005 Juniorprofessorin an der Universität Göttingen. Sie befasst sich mit Bruchausbreitung und Fluidtransport, wobei sie Geländestudien mit Computersimulationen kombiniert.

How local stress fields prevent volcanic eruptions. Von A. Gudmundsson und S. L. Philipp in: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Bd. 158, S. 257, 2006

How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes. Von A. Gudmundsson in: *Earth-Science Reviews*, Bd. 79, S. 1, 2006

How mechanical layering affects local stresses, unrests, and eruptions of volcanoes. Von A. Gudmundsson und S. L. Brenner in: *Geophysical Research Letters*, Bd. 31, L16606, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874890.