

ZWERGE

**UND
MONSTER**

ZWERGE UND MONSTER

AUS DER TIEFE DER ERDE

AXEL SCHMITT

Zu den heißesten Naturereignissen auf der Erde gehört glutflüssige Lava: Mit einer Temperatur von etwa 1.200 Grad Celsius tritt sie aus Erdspalten oder in Feuerfontänen aus – als Ergebnis von Vorgängen, die sich in kilometerweiter Tiefe im Erdinneren abspielen. Mithilfe einer an deutschen Universitäten bisher einzigartigen Ionensonde rekonstruieren Heidelberger Forscher anhand von Kristallen aus vulkanischen Gesteinen deren magmatische Vorgeschichte, die sich über Tausende bis manchmal sogar Millionen von Jahren abgespielt hat.

S

Schätzungsweise 20 Prozent der Weltbevölkerung leben im Gefahrenbereich von Vulkanen. Vulkanologen kategorisieren diese etwas willkürlich als aktiv, wenn sie innerhalb der letzten 10.000 Jahre ausgebrochen sind. Von den weltweit insgesamt etwa 1.500 so eingestuften Vulkanen befinden sich allerdings gegenwärtig nur etwa 20 im Zustand eines Ausbruchs. Die Herausforderung ist es, vorherzusagen, welcher der vielen momentan nicht eruptierenden Vulkane möglicherweise wieder zum Leben erwachen könnte. Dabei gilt es, die entscheidenden Fragen zu beantworten: Ist unter dem Vulkan noch heißes und eruptierbares Magma vorhanden oder ist es bereits zu festem Gestein abgekühlt? Und wenn noch Gesteinsschmelze vorhanden wäre, wie schnell könnte diese mobilisiert und zu einer gefährlichen Magmablase zusammengeführt werden?

Heißes Magma, kalter Pluton

Glutflüssige Lava, die mit circa 1.200 Grad Celsius aus Spalten oder in Feuerfontänen austritt, zählt zweifelsohne zu den heißesten Naturereignissen auf der Erdoberfläche. Solche vulkanischen Phänomene, wie sie sich beispielsweise auf Hawaii zwischen Mai und August 2018 abspielten, sind allerdings eher ein Unfall: ein selten auftretender, aber nichtsdestoweniger für den Menschen oft katastrophaler „Schluckauf“ während des ansonsten friedlichen Abkühlens von Magma in der Tiefe. Denn in der Regel erstarrt in der Tiefe aufgeschmolzenes Gestein bei seinem Aufstieg noch weit unterhalb der Erdoberfläche und bildet dabei Tiefengesteine oder Plutone, die das mächtige Fundament der Erdkruste bilden. Vulkanismus auf der Erde tritt jedoch klar zeitlich und räumlich begrenzt auf. Dabei verstecken sich die meisten (und in der angegebenen Zahl von 1.500 aktiven Vulkanen nicht mit eingeschlossenen) Vulkane in den Tiefen der Ozeane entlang ausgedehnter Bruchzonen, die sich untermeerisch über Tausende von Kilometern erstrecken. Auch an Land sind Vulkane in bestimmten Bereichen der Erdkruste konzentriert, nämlich überwiegend in vulkanischen Inselbögen oder Gebirgsketten, die die Grenzen zwischen zwei sich aufeinander zubewegenden tektonischen Platten nachzeichnen. Die oberste, im Durchschnitt etwa 100 Kilometer mächtige, feste Gesteinshülle der Erde ist in solche Platten zerbrochen. Diese liegen auf einer weichen, aber dennoch festen Schicht des Erdmantels auf und verschieben sich relativ zueinander mit Geschwindig-



PROF. DR. AXEL K. SCHMITT leitet seit 2015 die Forschungsgruppe „Isotopengeologie und Petrologie“ am Institut für Geowissenschaften der Universität Heidelberg. Nach dem Studium der Mineralogie an der Universität Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum war er zwischen 2000 und 2002 Postdoktorand an der University of California Los Angeles (USA) und der Australian National University in Canberra (Australien). Zwischen 2003 und 2015 forschte und lehrte er an der University of California Los Angeles, wo er eine nationale Großforschungseinrichtung in der Ionensondenanalytik betreute. Die Entwicklung geochemischer und geochronologischer Anwendungen der Ionensonde ist auch im seit 2014 bestehenden Heidelberger Ionensonden-Labor ein Schwerpunkt seiner Forschung. Axel Schmitt ist Fulbright-Preisträger und seit 2014 Ehrenmitglied der Mineralogical Society of America.

Kontakt: axel.schmitt@geow.uni-heidelberg.de

keiten von etwa einem Millimeter pro Woche, was ungefähr mit dem Wachstum von Fingernägeln vergleichbar ist. Dort, wo sich eine Platte unter die andere schiebt, entstehen Schmelzen in sogenannten Subduktionszonen. Noch seltener liegen Vulkane innerhalb einer Platte, wie es beispielsweise für Hawaii oder die Eifel zutrifft. Allerdings nimmt die Verwundbarkeit durch vulkanische Ereignisse aufgrund von Globalisierung und Vernetzung selbst in nicht direkt gefährdeten Regionen stetig zu.

Direkt nach meiner Promotion, also vor fast 20 Jahren, hatte ich Gelegenheit, an meiner ersten größeren Forschungstagung teilzunehmen, dem Treffen der American Geophysical Union in San Francisco. Noch aufregender als die Tagung erschien mir die Möglichkeit, im Anschluss ein paar Tage freizunehmen, um mit dem Mietauto den kalifornischen Westen zu erkunden. Nach stundenlanger Fahrt erreichte ich endlich die Sierra Nevada, deren Kern durch einen der ausgedehntesten und am besten zugänglichen Plutone der Erde gebildet wird. Die Granite dieses Plutons entstanden in einer ehemaligen Subduktionszone im Zeitraum zwischen Jura und Kreidezeit, also vor etwa 120 bis 90 Millionen Jahren, und gelangten im Laufe der Jahrmillionen durch Hebung und Abtragung an die Oberfläche. Wahrscheinlich lag es an der Monotonie des Fahrens entlang schier endloser, in den Eiszeiten durch Gletscher glatt geschliffenen Granitflächen im und um den Yosemite-Nationalpark, aber in meiner Einbildung verwandelte sich mein treuer Dodge Stratus in eine Art gut isoliertes Unterseeboot, mit dem ich den unterirdischen Magmasee eines längst vergangenen Vulkankomplexes gewaltigen Ausmaßes erkundete. Der Gedanke erschien mir faszinierend und gleichzeitig abenteuerlich abwegig: Kann es wirklich solche sich über Hunderte von Kilometern erstreckenden glutheißen Magmablasen geben, wie es die Ausdehnung der Sierra Nevada suggeriert? Ich hatte in meiner Dissertation vulkanische Eruptionen in den chilenischen Anden untersucht, ein Beispiel einer heute noch aktiven Subduktionszone. Könnten die kalifornischen Plutone sozusagen das Gegenstück zu den großvolumigen Supereruptionen der Anden darstellen? Oder entstanden diese Plutone doch womöglich anders, nämlich aus vielen kleinen Magmaschüben, die sich nach und nach äußerlich ununterscheidbar miteinander vermengt haben, etwa so, wie ein Omelett aus mehreren Eiern hervorgegangen ist und nicht aus einem einzigen Superei?

Beim Versuch, eine Beziehung zwischen Vulkanen an der Oberfläche und Plutonen in der Tiefe herzustellen, landet man schnell bei einem Dilemma: Die sich im Inneren einer Subduktionszone bildenden Magmen und Gesteine befinden sich bei aktiven Vulkanen in unerreichbarer Tiefe. Dagegen sind bei heute an der Oberfläche anstehenden Plutonen ehemaliger Subduktionszonen die vormals aufliegenden vulkanischen Gesteine längst abgetragen. Eine

Lösung dieses Dilemmas liegt in den Gesteinen selbst verborgen, nämlich in Kristallen, die sich in der Tiefe gebildet haben und dann während einer vulkanischen Eruption an die Oberfläche transportiert wurden. Einem Kreuzverhör entsprechender analytischer Methoden unterzogen, können diese Kristalle Vorgänge bezeugen, die sich einst kilometertief unter einem Vulkan zugetragen haben.

Kristalle aus 5.000 Meter Höhe

Kristalle, deren Anteil an vulkanischem Gestein von unter einem Prozent bis fast zur Hälfte reichen kann, wachsen in der Schmelze vor der Eruption, und ihre Zusammensetzung spiegelt die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Magmas wider. Ein ganz besonderer Kristall ist der Zirkon, chemisch Zirconium-Orthosilikat mit der Formel $ZrSiO_4$. Der Clou beim Zirkon ist, dass er in geringen Mengen das in Gesteinsschmelzen vorhandene Uran und Thorium einbaut und diese Elemente dabei stark anreichert. Beide Elemente sind radioaktiv, und aus den Verhältnissen der Ausgangsisotope zu ihren Zerfallsprodukten kann verlässlich ermittelt werden, zu welchem Zeitpunkt sich Zirkon im Magma gebildet hat. Die Zirkonkristalle sind darin vergleichbar mit einem Flugdatenschreiber: Während ihres Wachstums zeichnen sie alle Veränderungen der wichtigen Parameter eines Magmas auf, darunter Temperatur, Kristallanteil und Schmelzzusammensetzung. Das Auslesen dieser „Blackbox“ ist allerdings nicht ganz einfach: Zirkonkristalle sind sehr klein und haben in der Regel einen Durchmesser, der demjenigen eines menschlichen Haares entspricht. Einzelne Wachstumszonen innerhalb eines Zirkonkristalls sind sogar noch winziger und umfassen nur wenige tausendstel Millimeter. In Heidelberg verwenden wir für die Analyse von Zirkon eine Ionensonde: eine Art von Teilchenbeschleuniger, bei dem durch einen mikroskopisch fokussierten energetischen Ionenstrahl Atome aus einem Feststoff herausgeschlagen und die darin enthaltenen Isotope in einem Massenspektrometer nachgewiesen werden. Dieses vier Millionen Euro teure Gerät wurde als erstes und bislang einziges an einer deutschen Universität 2014 im Institut für Geowissenschaften aufgestellt. Eine der besonderen Stärken der Ionensonde ist es, die wenigen Uran- und Thoriumatome aus einer Teilchenwolke verlässlich herausfiltern zu können, um daraus hoch aufgelöst die Zeitdauer des magmatischen Zirkonwachstums zu rekonstruieren.

Im Jahr 2009 kehrte ich mit meinem Kollegen Shanaka de Silva von der Oregon State University und einem Team hoch motivierter Doktoranden und Masterstudierenden in die Anden zurück. Im Hochplateau des Altiplano und der angrenzenden Puna befinden sich einige der größten vulkanischen Einbruchstrukturen der Erde: ausgedehnte Calderen – also kessel- oder beckenförmige Einbruchstrukturen über einer Magmakammer –, die bequem den

Rhein-Neckar-Kreis umschließen würden. Jede dieser Calderen ist das Ergebnis einer supervulkanischen Eruption, bei der 1.000 Kubikkilometer und mehr an Magma ausgeschleudert wurden. Diese Auswurfmassen, hypothetisch im Rhein-Neckar-Kreis abgeladen, würden diesen mit einer mehr als einen Kilometer mächtigen Schicht aus Bims und Asche begraben. Allerdings hatten wir unser Auge nicht auf die Calderen gerichtet, sondern auf vergleichsweise kleine Lavadome – kuppelförmige Gebilde aus

„Der Austritt
glutflüssiger Lava ist
ein selten auf-
tretender ‚Schluckauf‘
während des
ansonsten friedlichen
Abkühlens von
Magma in der Tiefe.“

Lava über einem Vulkanschlot –, die sich zwischen diesen Rieseneruptionen gebildet hatten. Interessanterweise scheint es zeitliche Häufungen in den gewaltigen vulkanischen Explosionen zu geben, die die Calderen hinterließen, während dann wieder Pausen von ein bis zwei Millionen Jahren einsetzten, während derer nur hin und wieder relativ geringe Mengen an Lava austraten. Wahrscheinlich befinden sich die zentralen Anden momentan in einer solchen Ruhephase.

„Zirkonkristalle sind vergleichbar mit einem Flugdatenschreiber: Sie zeichnen alle Veränderungen der wichtigen Parameter eines Magmas auf.“

Heidelberger Ionensonden-Labor

Das Ionensonden-Labor an der Universität Heidelberg mit einer hochauflösenden Ionensonde zur Bearbeitung geowissenschaftlicher Forschungsfragen wurde Ende 2014 als nationales Labor für Sekundärionen-Massenspektrometrie eingerichtet. Es wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und wurde in der Anfangsphase von einem wissenschaftlichen Beirat mit Experten aus Großbritannien, Schweden, Dänemark und Deutschland begleitet. Mit dem Forschungsgrößgerät können Isotopendatierungen und die Messung von Spurenelementen in extraterrestrischen und terrestrischen Gesteinen hochpräzise mit einer räumlichen Auflösung im Mikrometerbereich durchgeführt werden. Bearbeitet werden Forschungsvorhaben aus den Bereichen Kosmo- und Geochemie, Isotopengeologie, Klimatologie, Umweltstudien und Archäologie.

Geländearbeit auf mehr als 5.000 Meter Höhe ist mühsam, und während unser Team nach jedem Molekül Sauerstoff schnappend die Flanken von Lavaströmen mit Hunderten von Metern Mächtigkeit hinaufstolperte, kam es uns ironisch vor, dass diese Monster von Lavadomen eigentlich nur die kleinen Brüder ihrer supervulkanischen Calderen-Schwestern waren. Schon im Gelände war auffällig, dass in den Laven die gleichen Kristalle wie in den Auswurfmassen der Calderen auftraten, aber in Anzahl und Größe weit über jene hinausgehend. Die Lavadome und die Calderen hatten also tatsächlich die gleichen Magmaguellen, nur war den Kristallen aus den Lavadomen anscheinend mehr Zeit zum Wachstum gegönnt.

Zirkonalter und Magmamodelle

Zurück im Labor erhielten wir die ersten Ergebnisse der Zirkonmessungen. Manche Zirkone waren etwa 100.000 Jahre alt, was dem erwarteten Eruptionsalter dieser Laven entsprach. Dann wiederum gab es Zirkone, die viel älter waren, und zwar um fast zwei Millionen Jahre. Das Bemerkenswerteste war allerdings, dass wir eine fast ununterbrochene Reihe von Zirkonaltern zwischen diesen beiden Endpunkten gemessen hatten. Diese überraschende Altersspanne war ein eindeutiger Beleg, dass Zirkon in der Tiefe über einen extrem langen Zeitraum wachsen konnte, ohne dass es zwischendurch zu einem Ausbruch kam. Da sich Zirkon fast ausschließlich im Magma bildet, bedeutete dies, dass auch in den scheinbaren Ruhephasen immer etwas Magma unterhalb der späteren Lavadome vorhanden war. Mit meinem Kollegen Oscar Lovera von der University of California Los Angeles haben wir versucht, dieses Phänomen besser zu verstehen. Oscar entwickelte ein Computermodell, das berechnete, wie viel Magma von unten in eine Magmakammer nachströmen muss, um der Abkühlung der Kammer in wenigen Kilometern Tiefe unterhalb des Vulkans entgegenzuwirken. Die sich aus den Zirkonaltern herleitende Bedingung war, dass immer genügend Schmelze zwischen zwei Magmaschüben verweilen musste, damit Zirkon über einen langen Zeitraum wachsen konnte. Die Berechnungen ergaben, dass während des fast zwei Millionen Jahre andauernden Zirkonwachstums durch zahllose Magmaschübe ein Pluton gewaltigen Ausmaßes entstanden sein musste, dessen Volumen um etwa das 75-Fache über das hinausging, was an Magma in der Eruption vor 100.000 Jahren letztendlich an der Oberfläche austrat.

Oscars Modell erlaubte es uns auch, unterschiedliche Mengen des aus der Tiefe aufsteigenden Magmas zu simulieren. Wenn man im Modell die Zufuhr von heißem Magma aus der Tiefe nur etwas erhöhte, dann hielten sich Aufheizung und Abkühlung nicht mehr die Waage. Stattdessen kam es zu einem dramatischen Anwachsen der Schmelzmenge unter dem Modellvulkan. Nach wenigen 100.000 Jahren war die Magmablase dann

DWARVES AND MONSTERS

FROM THE DEPTHS OF EARTH

AXEL SCHMITT

Processes in subvolcanic magma reservoirs are critical in controlling the chemical and physical properties of eruptible magma, yet they are difficult to observe directly because of the large time scales involved in magma accumulation and storage and the inaccessible depths at which magma pools prior to volcanic eruptions. In fact, only a small fraction of the magma generated on earth erupts, while the larger part cools and solidifies beneath the surface to form plutonic rocks. Only about 20 volcanoes worldwide are currently erupting, while a total of 1,500 are classified as active. Volcanologists must therefore determine which of these presently dormant volcanoes could reawaken and which ones have gone completely cold.

At Heidelberg University, we investigate volcanic crystals that formed in magma and thus encode a record of the magma's thermal and compositional evolution. Zircon is particularly useful in this regard because it contains naturally occurring radioactive isotopes of uranium and thorium that can be dated. Zircon can thus yield a reliable record of how key magmatic parameters such as temperature, composition and crystallinity changed over time prior to an eruption. To reconstruct these parameters from micrometre-sized growth bands in tiny zircon crystals, we use an energetic ion beam generated in an ion microprobe.

Zircon results from the central Andes have revealed that magma accumulated steadily even during eruptive lulls of one to two million years' duration between episodes of supervolcanic activity. This suggests that plutons amalgamate from small magma increments, whereas voluminous magma pools are ephemeral and contribute little to pluton formation. Zircon from smaller volcanic systems such as the Laacher See volcano in the German Eifel region indicates much faster magma accumulation prior to eruption, but the build-up still extends over many millennia. Such a magma presence should be detectable and provide early warning of future eruptions. ●

PROF. DR AXEL K. SCHMITT has been heading the "Isotope Geology and Petrology" research group at Heidelberg University's Institute of Earth Sciences since 2015. He studied mineralogy at the University of Gießen and earned his PhD at the Helmholtz Centre Potsdam – German Research Centre for Geosciences, then worked as a post-doctoral researcher at the University of California Los Angeles (USA) and the Australian National University in Canberra (Australia) between 2000 and 2002. From 2003 to 2015 he held a teaching and research position at the University of California Los Angeles, where he was responsible for a national major research institution in the field of ion probe analytics. Developing geochemical and geochronological applications for the ion probe continues to be a focal point of his research in the Heidelberg ion probe lab, which was inaugurated in 2014. Axel Schmitt is a Fulbright Scholar and in 2014 became a Fellow of the Mineralogical Society of America.

Contact: axel.schmitt@
geow.uni-heidelberg.de

**“Volcanism on earth occurs
within clear limits
of time and location.”**

derart angewachsen, dass sie nur noch in einer gewaltigen Explosion platzen konnte. Interessanterweise scheint nicht viel zu fehlen, damit ein System vom Zustand eines weitgehend friedlich in der Tiefe wachsenden Plutons in eine Phase chaotisch platzender Magmablasen umschlägt. Auf einem Küchenherd mit zehn Heizstufen entspräche das in etwa, den Schalter von „2“ auf „3“ zu drehen. Auch wenn das noch in ferner Zukunft liegt: Eine erneute supervulkanische Phase in den zentralen Anden ist daher nicht auszuschließen.

Unsere Untersuchungen in den Anden haben ergeben, dass sich ausgedehnte Plutone in der Regel während vulkanischer Ruhephasen bilden. Große Ansammlungen von Magma tragen wahrscheinlich erstaunlich wenig zum Wachstum eines Plutons bei, sondern neigen wegen ihrer Instabilität zur vulkanischen Entleerung, die in der Tiefe nur wenige Spuren hinterlässt. Mein phantastischer Magma-pool in der Sierra Nevada hat daher wahrscheinlich nie so existiert. Warum der Magmanachschub in den Anden anscheinend im Laufe von Millionen Jahren schwankte, bleibt allerdings noch ungeklärt. Veränderungen in der Geometrie oder Zusammensetzung der in einer Subduktionszone abtauchenden Platte könnten den Magma-nachschub beeinflussen.

Heiß oder kalt vor der Haustür

Vulkane in der Eifel sind Zwerge im Vergleich zu denen der zentralen Anden, und bis in die 1970er-Jahre hinein galten die Eifelvulkane als erloschen. Erst durch die zahlreichen von dem Vulkanologen Hans-Ulrich Schmincke (Universität Bochum und Leibniz-Institut für Meereswissenschaften Kiel) und auch von dem Heidelberger Geochronologen Hans Joachim Lippolt in den 1980er- und 1990er-Jahren initiierten Datierungen wurde klar, dass der quartäre Eifelvulkanismus über seine circa 700.000 Jahre andauernde Aktivität immer wieder längere Pausen einlegte. Betrachtet man diese Datierungsergebnisse, so ergibt sich kein Grund, die vulkanische Aktivität in der Eifel für beendet zu erklären.

Eine der größten Eruptionen in der Eifel war diejenige vor circa 12.900 Jahren, die den Laacher See zurückgelassen hat und weite Bereiche Mitteleuropas mit einer Schicht aus vulkanischer Asche bedeckte. Auch hier stellt sich die Frage, was eigentlich vor diesem Ausbruch in der Tiefe vorging und wie lange es dauerte, bis sich die immerhin etwa 15 Kubikkilometer Magma angesammelt hatten, aus denen sich der Ausbruch des Laacher Sees speiste. Auch für die Gesteine des Laacher Sees kamen Zirkon und die Heidelberger Ionensonde zum Einsatz. Zirkon-Datierungen zeigten, dass sich bereits vor 30.000 Jahren in ersten Schüben das Laacher-See-Magma ansammelte, der Zustrom aus der Tiefe sich aber während einiger Tausend Jahre vor der Eruption stark intensivierte. Auch hier kam es unseres Wissens während dieser Vorlaufzeit zu keinen Eruptionen.

„Es gibt keinen Grund, die vulkanische Aktivität in der Eifel für beendet zu erklären.“

Im Vergleich zu den Anden aber sind diese Zeiträume für die Bildung einer Magmakammer sehr kurz. Es ist dennoch beruhigend zu wissen, dass auch Vulkane wie der Laacher See eine in historischen Zeiträumen gemessene längere Vorgeschichte haben. Es ist daher zu erwarten, dass sich die allmähliche Platznahme von Magma in der Tiefe durch Erdbeben, intensivierten Gasaustritt oder Deformation an der Oberfläche ankündigt. Bei kleineren Eifelvulkanen wie den basaltisch zusammengesetzten Maaren steigt Magma allerdings direkt aus viel größeren Tiefen auf, als es bei den im Vergleich zu Basalt silizium-reicheren Magmen des Laacher-See-Vulkans der Fall war. Ausbrüche von Maarvulkanen haben daher vermutlich nur eine sehr kurze Vorwarnzeit. Auch in der Eifel könnte es in Zukunft also wieder heiß hergehen. ●