

Vulkanseismologie – ein Blick ins Innere der Vulkane

Torsten Dahm, Eleonora Rivalta, Thomas R. Walter, Sebastian Heimann, Birger-Gottfried Lühr, Philippe Jousset
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Volcanic activity involves different processes on different scales at depth and at the surface. Many of them generate seismic signals, ranging from tiny, earthquake-like signals to increased continuous vibrations to significant ground motion events before and during volcanic eruptions. A range of modern tools of volcano seismology is nowadays used to monitor changes in the volcanic activity and volcanic unrest. Additionally, advanced seismology is able to image the deep volcanic structures at high resolution and to map the depth and size of magmatic reservoirs beneath volcanoes. Although seismology is a key technology for volcano research and the assessment of volcanic hazard, novel concepts of volcano monitoring combine seismology with different types of multi-parameter sensors to characterize the processes accompanying volcanic unrest. GFZ is developing advanced approaches for volcano monitoring and volcano modeling involving a broad scale of instruments and disciplines. The article focuses mainly on two examples from volcanoes in South America and Iceland showing how large magmatic reservoirs are slowly filled over periods of decades and abruptly depleted over periods of months during volcanic eruptions.



Vulkanismus ist das Ergebnis einer Kette von Prozessen im Untergrund. Fluide bewegen sich in der Tiefe, Magmen werden gebildet und Spannungen können sich aufbauen, lange bevor sich an der Oberfläche eine Eruption manifestiert. Die Vulkanseismologie erlaubt Einblicke in die Tiefe, insbesondere durch die Registrierung von Bruchprozessen, Spannungsfeldbestimmungen und tomographische Abbildungsverfahren.

Nahezu jedes Vulkanobservatorium betreibt Seismometer und seismische Netze. Moderne Observatorien kombinieren ihre Seismometernetze mit einer Vielzahl unterschiedlicher Sensoren und Messverfahren und entwickeln bzw. verbessern fortlaufend ihre Auswerte- und Modellierungsverfahren. Die Seismologie spielt dabei eine wichtige Rolle, da sie eine der wenigen Disziplinen ist, die hochauflösende Abbildungen von geologischen Strukturen und Aktivitäten im Vulkaninnern ermöglichen, auch in Echtzeit und selbst aus sicherer Entfernung und unabhängig von den Witterungsbedingungen.

Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ wird die Vulkanseismologie in enger Verbindung zur Erdbebenseismologie weiterentwickelt. Neue Ansätze der Erdbebenforschung lassen sich auf Vulkane übertragen und umgekehrt. Die vielfältigen Signale, die an Vulkanen gemessen werden, sind häufig Anstoß und Motor für neue Entwicklungen und erweitern das Verständnis von Fluidprozessen im Erdinneren. Im Folgenden werden zwei Beispiele der seismologischen Forschung am GFZ vorgestellt, die den Zusammenhang zwischen der Entwicklung und Aktivität von Vulkanen und überregionalen Effekten verdeutlichen.

Seismische Signale an Vulkanen

Im Vergleich zu tektonischen Erdbeben zeigen seismische Signale an Vulkanen eine vielfältigere und komplexere Charakteristik und werden durch verschiedene Quellmechanismen, die bis dicht unter die Erdoberfläche reichen, generiert. Neben klassischen „tektonischen“ Scherbrüchen unter Vulkanen findet man Signale, die durch Fluid- und Magmabewegungen, Kollapsereignisse im Untergrund, Geröll- und Schlammlawinen

und Einschläge vulkanischer Gesteinsbomben ausgelöst werden. Die gemessenen Signale sind sehr unterschiedlich und reichen von Seismogrammen mit langperiodischen (LP) und impulsiven Ausschlägen der Primär- (P-) und Sekundär- (S-)Wellen (vulkantektonische Erdbeben, VT), über hochkomplexe Multiphasensignale bis zu multi- und monofrequenten Tremorsignalen, die über Minuten bis Tage andauern können. LP-Signale und Tremore werden als Anzeichen für Fluid- und Magmenbewegung interpretiert (Jousset *et al.*, 2013). Allerdings trägt die heterogene Struktur eines Vulkans, der aus unterschiedlichen Lagen kompakter Laven, feinkörniger Aschen, Sanden und grobkörniger Block- und Geröllmaterialien besteht, zur Komplexität der Aufzeichnungen bei. Ein pulsartiges Signal wandelt sich innerhalb von wenigen hundert Metern Laufweg durch diese Lagen in ein zeitlich ausgedehntes Signal mit schwachen Ersteinsätzen um. Eine Klassifizierung der seismischen Signale an Vulkanen kann helfen, diese Daten zu interpretieren.

Dabei spricht jeder Vulkan seine eigene seismische Sprache. An dem Vulkan Galeras in Kolumbien treten z. B. vor einem Ausbruch nahezu monofrequente, schraubenförmige Signale mit abklingenden Amplituden, sogenannte Tornillos auf. Für die Klassifizierung und Einordnung solcher Signale müssen Vulkane über mehrere Jahre mit seismischen Überwachungsnetzen beobachtet werden. Klassifizierte Signale können wichtige Hinweise zum Aktivitätszustand eines Vulkans liefern, die in die Alarmstufen-Setzung einfließen und so zur Risikominderung beitragen. Komplexe Multiphasensignale aus geringer Tiefe an steilen Schichtvulkanen zeigen beispielsweise an, dass der Lavadom wächst und eventuell ein gefährlicher pyroklastischer Strom bevorsteht. Der Anstieg der Energie der kontinuierlichen Bodenbewegung wird häufig als Aktivitätsmaß an Vulkanen verwendet und dient u. a. zur Festlegung und Erweiterung von Evakuierungsbereichen (Jousset *et al.*, 2013).

Seismische Untersuchungen liefern zudem Informationen über den Unterbau eines Vulkans. So helfen z. B. groß angelegte Experimente, die seismischen Geschwindigkeiten abzubilden (Tomographie) und damit die Aufstiegszonen von Fluiden und die Einlagerung von partiellen Schmelzen in der Kruste zu lokalisieren. Die Geschwindigkeitserniedrigungen können in solchen Zonen bis zu 30 % betragen. Das Verhältnis von P- zu S-Wellengeschwindigkeiten erlaubt Abschätzungen zum Volumen fluider und gasförmiger Bestandteile im Gestein (Dahm und Fischer, 2014). Anhand tomographischer Methoden konnte für Vulkane wie den Merapi in Indonesien gezeigt werden, dass sich partielle Schmelzen von rund 100 km Tiefe bis nahe unter den Vulkan abbilden (Lühr *et al.*, 2013).

Links: Blick von Norden auf den Vulkan Lastarria am nördlichen Rand des Lazufre-Vulkankomplexes (Foto: T. R. Walter, GFZ)

Left: View from north on the Lastarria volcano at the northern tip of the Lazufre volcanic complex



Kontakt: T. Dahm
(torsten.dahm@gfz-potsdam.de)

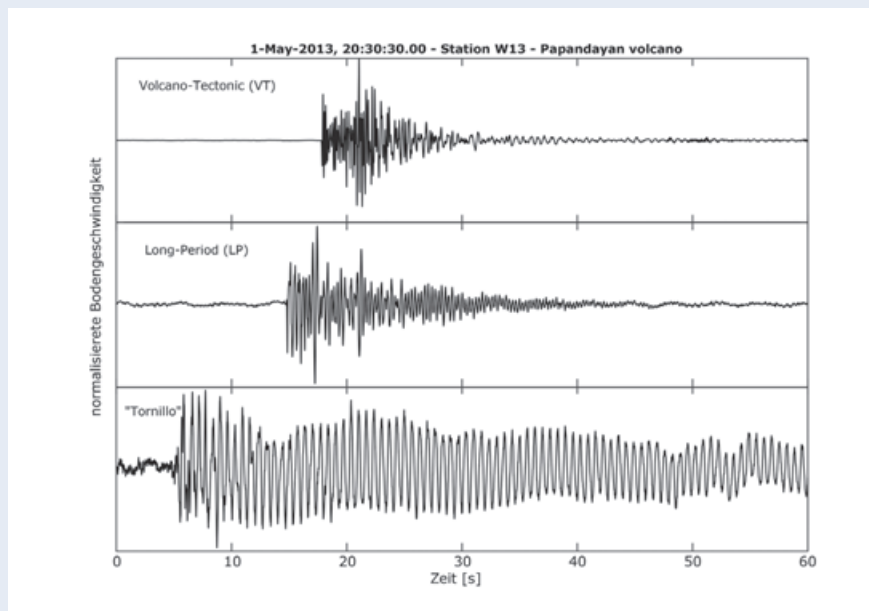


Abb. 1: Beispiele für Seismogramme von vulkantektonischen (VT) und lang-periodischen (LP) Ereignissen sowie eines tremorähnlichen Tornillo-Ereignisses am Vulkan Papandayan in Indonesien

Fig. 1: Seismogram examples of a volcano-tectonic (VT), a long-period (LP) and tremor-like Tornillo event at Papandayan volcano in Indonesia

Riesige Magmakammern im Untergrund

In der Region des Lazufre-Vulkankomplexes an der chilenisch-argentinischen Grenze in den Anden zwischen den Vulkanen Lastarria (Abb. 2) im Norden und Cordon del Azufre im Süden wurde vor einigen Jahren durch Satellitendatenauswertungen eine gigantische Aufwölbung der Erdoberfläche entdeckt. Seit 1997 hat ein Gebiet von etwa 2000 km² begonnen, sich kontinuierlich mit einer Rate von etwa 3 cm/Jahr aufzuwölben (Abb. 3; vgl. auch Beitrag *Walter et al., System Erde (2011) 1, S. 30-35*). Die Ursachen sind magmatische und hydrothermale Prozesse in der Erdkruste. Unter dem Lazufre füllt sich möglicherweise eine riesige Magmakammer, die sich in Zukunft in einem großen Ausbruch entleeren könnte. Aber wie sehen die Reservoirs vor Supereruptionen aus und wie entwickeln sie sich? Und in welcher Tiefe liegen diese?

Deformationsmessungen mit Hilfe von Satelliten können hierauf keine eindeutige Antwort geben. Das GFZ hat daher zusammen mit Partneruniversitäten aus Chile und der Universität Hamburg im Jahr 2008 ein temporäres seismisches Netz am Lazufre installiert (Abb. 3) und konnte unter Verwendung von Daten aus einer zweiten Messkampagne der Universität von Alaska Fairbanks zwischen 2011 und 2013 tomographische Abbilder der magmatischen Reservoirs unter der Lazufre-Region erstellen. Für die Auswertung der hochkomplexen Signale wurden unterschiedliche, moderne Ansätze der Seismologie verwendet.

Die Oberflächenwellentomographie aus der Korrelation der Bodenunruhe zeigt, dass es unter dem Lastarria (Abb. 3c, A und B) am nördlichen Rand der sich hebenden Region zwei kleine Anomalien gibt, die wahrscheinlich magmatischen Ursprungs sind (*Spica et al., 2015*). Die untere Anomalie hat eine horizontale Ausdehnung von etwa 4 km und liegt in 3 bis 6 km Tiefe. Sie wird als kleines Magmareservoir gedeutet. Die darüber liegende Anomalie in etwa 1 km Tiefe ist kleiner und vermutlich hydrothermalen Ursprungs.

Mit der Oberflächenwellentomographie konnten nur Strukturen in den obersten 7 km der Kruste untersucht werden. Das für die großflächige Hebung der Lazufre-Region verantwortliche Reservoir liegt jedoch tiefer. Seine Dimension und Ausdehnung konnte durch die teleseismische Analyse der Wellen von regionalen und weit entfernten Erdbeben, welche den Krustenraum unter dem Vulkan durchstrahlen, abgeschätzt werden. Diese Raumwellentomographie bildet tatsächlich ein imposantes magmatisches Reservoir in einer Tiefe von etwa 7 bis 15 km ab, dessen laterale Ausdehnung etwa 10 x 20 km beträgt (Abb. 3c, C). Wellen, die durch diese Zone laufen, werden um bis zu 30 % verlangsamt.

Die Daten aus Chile legen den Schluss nahe, dass große Magmareservoirs innerhalb weniger Jahre oder Jahrzehnte entstehen können. Diese Erkenntnis ist alarmierend, da dies be-

deutet, dass es schwer prognostizierbar ist, wo in Zukunft ein derartiges Reservoir entsteht. So wurde nur zufällig am Vulkan Laguna del Maule, unweit des Lastarria in Chile, eine nochmals deutlich stärkere Aufwölbung registriert, die sogar die Dimensionen des Yellowstone-Supervulkans übersteigt. Nur durch systematische und globale Vermessungen der Vulkanregionen weltweit lassen sich fundierte Aussagen über die Häufigkeit derartiger großvolumiger Magmenreservoirs treffen. Solange die genaue Lage und Geometrie großer Reservoirs nicht bekannt sind, werden Kalderen auch weiterhin überraschend und ohne Vorwarnung an der Oberfläche entstehen.

Kalderen – Zeugen großer Magmakammern

Immer wieder werden Magmakammern durch Eruptionen oder Intrusionen geleert. Ausbrüche treten auf, wenn das Magma durch eine Öffnung oder einen Riss an der Oberfläche in die Atmosphäre fließt, entweder effusiv oder, in Abhängigkeit von Viskosität und Gasgehalt, in verschiedenen Explosionsgraden. Intrusionen hingegen sind spaltenförmige Einlagerungen im Gestein. Die Magmen dringen entweder senkrecht oder waagrecht in die Kruste und durchbrechen dabei das intakte Gestein (Rivalta *et al.*, 2015). Beispielsweise trat zwischen August 2014 und Februar 2015 am isländischen Vulkan Bárðarbunga eine große Gangintrusion auf, der ein effusiver Ausbruch und ein Kaldera-Kollaps am Zentralvulkan folgten (Abb. 4).

Der Kaldera-Kollaps betraf eine elliptisch geformte Region des Hauptkraters mit einem Durchmesser von 10 bis 14 km, die innerhalb von sechs Monaten um mehr als 66 m einsackte. Der Ausbruch förderte insgesamt $2 \pm 0,4 \text{ km}^3$ vulkanisches Gestein und war damit der größte Ausbruch auf Island seit der Laki-Eruption von 1783/84. Weltweit gab es in den letzten 100 Jahren nur sechs bestätigte Kollapsereignisse an Vulkanen.

Der erhöhte Grad an Seismizität wies im August 2014 auf ein Anwachsen der Spannungen unterhalb des Vulkans hin. Die Entstehung und Ausbreitung einer seitlichen, vertikalen Intrusion konnte während der ersten zwei Wochen anhand einer wandernden Seismizitätswolke verfolgt werden. Ausgehend vom östlichen Bereich der Kaldera bewegte sich das Beben-Cluster zuerst nach Osten, dann nach Nordosten und zeigte damit an, dass sich ein Gang über eine Länge von etwa 40 km ausbreitete (Abb. 4). Bei Holuhraun, nördlich des Bárðarbunga, brach die Gangausbreitung ab, die Erdoberfläche wurde durchschnitten und es kam zur effusiven Eruption. Die Gangintrusion und der Ausbruch leerten das Magmareservoir unterhalb der Kaldera solange, bis die Sogwirkung auf das Dach der Magmakammer zu groß wurde und die Kaldera abzusinken begann. An der Kaldera-Ringstörung traten während des Kollaps' Hunderte von Erdbeben mit Magnituden >4 auf (Abb. 4).

Die Bárðarbunga-Intrusion und der Ausbruch werden derzeit mit einer breiten Palette seismologischer und anderer Modellierungstechniken erforscht und mit früheren, großen Intrusionsereignissen verglichen. Die Seismizität folgte der Front des Magmakörpers während der Gangintrusion. Durch die genaue Lokalisierung der Mikrobeben konnte bestätigt werden, dass die durch Tektonik und den Vulkanbau verursachten Spannungen den krummen und segmentierten Intrusionspfad gesteuert haben, wie es bereits vorab in theoretischen Arbeiten postuliert worden ist (Rivalta *et al.*, 2015). So kann aufgrund morphologischer Änderungen oder durch eine Wechselwirkung mit aktiven Störungen die Ausbreitung einer magmatischen Intrusion gestoppt werden (Maccaferri *et al.*, 2016). Umgekehrt erzeugen große Intrusionen Spannungsänderungen in der Kruste, die das Muster der Mikrobebenaktivität verändern und selbst große Erdbeben auslösen oder die seismische Aktivität an Verwerfungen über Jahre abbauen können. Auch sind am Bárðarbunga in nächster Zeit weitere Intrusionen wahrscheinlich, da diese, ähnlich wie dies für Erdbeben gilt, typischen Häufigkeitsverteilungen genügen, wobei kleinere Intrusionen den größeren oft folgen (Passarelli *et al.*, 2015).

Seismologisch auffällig ist die induzierte Seismizität entlang der Kaldera-Randstörung während der sechsmonatigen Einsturzphase. Herdmechanismen wurden mit modernen Inversionsverfahren aus der Anpassung von synthetisch erzeugten an die beobachteten Raum- und Oberflächenwellenformen der Seismogramme verschiedener Stationen modelliert. Sie zeigen Mischbrüche an, also z. B. eine Scherverschiebung bei gleichzeitiger Volumenreduktion. Weitergehende Arbeiten sollen mittels seismologischer Modellierung dieser Mischbrüche Rückschlüsse auf das Volumen und die physikalischen Eigenschaften des Magmareservoirs ermöglichen. Ebenso auffällig



Abb. 2: Schwefelfelder unterhalb des Lastarria-Kraters in rund 5000 m Höhe (Foto: T. R. Walter, GFZ)

Fig. 2: Fumarole fields at the base of the crater of Lastarria volcano in approx. 5000 m elevation

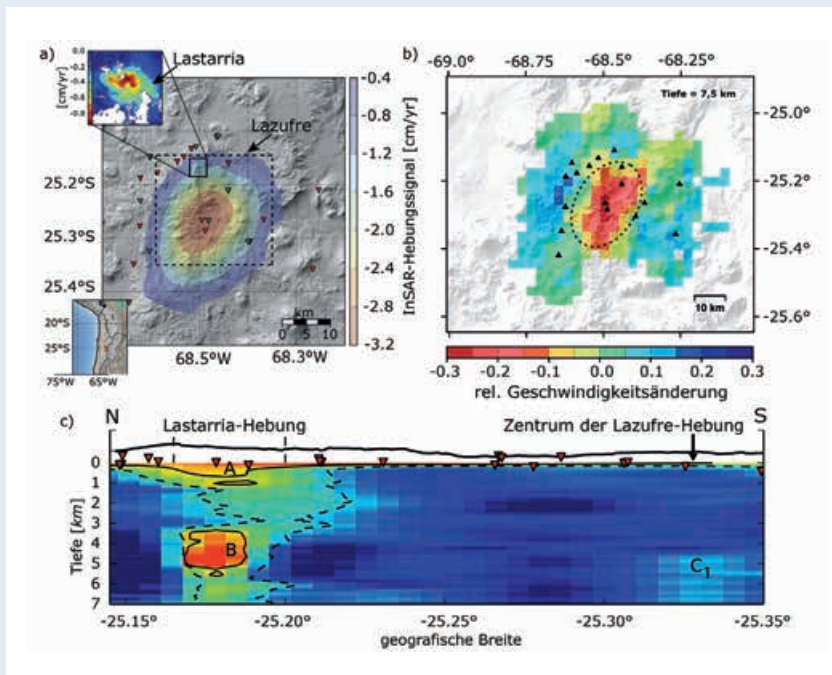


Abb. 3: (a) Stationsnetz (Dreiecke) und Hebungsraten (farbige Konturen) am Lazufre-Vulkankomplex in Chile; (b) Ausdehnung der Zone anomaler P-Wellengeschwindigkeit (in %) in etwa 7,5 km Tiefe (aus Raumwellentomographie); (c) Tiefenschnitt der obersten 7 km unter dem Vulkan mit den Zonen A, B und C anomaler S-Wellengeschwindigkeit (Oberflächenwellentomographie)

Abb. 3: (a) Seismic stations (triangles) and uplift rates (colored contours) at the Lazufre volcanic complex; (b) Extension of the anomalous zone of P-wave velocities (%) in 7.5 km depth (body wave tomography); (c) Depth section of the uppermost 7 km beneath the volcano with zones A, B and C of anomalous S-wave velocities (surface wave tomography)

ist die Abfolge von 77 Erdbeben mit Magnituden >5 . Die Wiederkehrzeiten und die Verteilung der Bebenstärken passen zu einem Seismizitätsmodell, das man für tektonische Erdbeben seit langem postulierte, aber bisher nur selten bestätigen konnte – ein gelungenes Beispiel dafür, wie sich Vulkaneismologie und Erdbebenforschung ergänzen.

Ausblick

Die Vulkaneismologie ist eine etablierte Methodik, weltweit Vulkane und deren Bruchprozesse im Untergrund zu überwachen. Auch können andere assoziierte Prozesse, wie Gerölllawinen, Glutlawinen und Dampfgas-Explosionen präzise und in Echtzeit registriert werden. Allerdings zeigte sich in der Praxis, dass die Komplexität von vulkaneismologischen Signalen die Erfassung physikalisch unabhängiger Daten erfordert. Eine erfolgreiche Vulkanüberwachung basiert daher auf einer Multiparameter-Observierung, bei der Seismologie, Deformationsmessung, Temperatur- und Gasüberwachung ineinandergreifen; nur bei Änderungsdetektionen an mehreren dieser Sensoren werden Warnstufen angehoben und die Bevölkerung informiert. Somit sind Vulkane ideale Labore, an denen neue Methoden entwickelt und erprobt werden.

Ähnlich wie der erste Seismograph am Vesuv 1876 zunächst testweise zum Einsatz kam, werden heute neue Beobachtungsmethoden an Vulkanen erprobt. Das Spektrum der neuen Ver-

fahren lässt dabei Arbeitsfelder der Chemie und Physik mit modernen Ingenieurwissenschaften verschmelzen. Massenverlagerungen können durch hochgenaue Schwerfeldmessungen, aber auch durch präzise Atomuhren entdeckt werden. Europäische Satelliten liefern aus über 600 km Höhe Daten, aus denen millimetergenaue Muster der Bodenbewegung erstellt werden. Auf Grundlage dieser Daten kann zukünftig die Relevanz von Supervulkanen neu bewertet werden. Unbemannte Fluggeräte ermöglichen Überflüge und Messungen an Vulkangipfeln, wo das Arbeiten für Vulkanologinnen und Vulkanologen riskant wäre. Insbesondere durch die Verfahren moderner Kommunikation und Sensorik steigt derzeit die verfügbare Datenmenge enorm an. Darüber hinaus werden auch Analysemethoden revolutioniert: so lassen beispielsweise tausende von Computerprozessoren über Cloud-Rechenoperationen für Modellierungen zu, die bislang undenkbar waren.

Diese neuen technischen Möglichkeiten der Vulkaneismologie bilden die Basis für eine bessere Risikobewertung vulkanischer Aktivitäten und tragen dazu bei, mögliche Schäden für Infrastrukturen und die Bevölkerung gefährdeter Regionen zu minimieren.

Danksagung

Die graphische Bearbeitung aller Abbildungen erfolgte durch Regina Milkereit, GFZ.

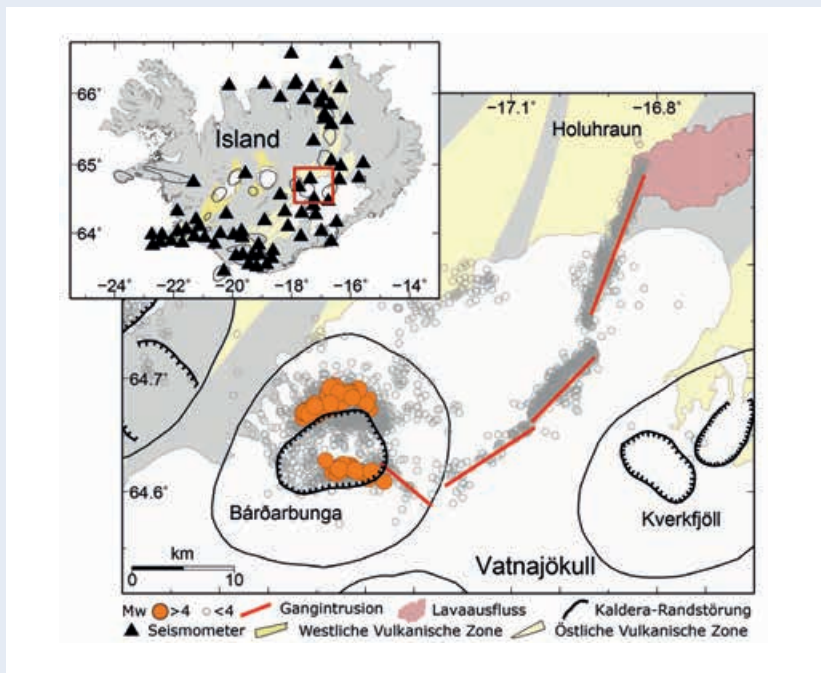


Abb. 4: Vulkanische Aktivität am Vulkan Bárðarbunga (Island) zwischen 2014 und 2015. Die Erdbeben mit Magnituden $M \geq 4$ an der Kaldera-Randstörung sind durch farbige Kreise hervorgehoben. Die segmentierte Gangintrusion (rote Linien) wurde von tausenden von Mikrobeben begleitet (offene Kreise). Der Lavafluss bei Holuhraun ist eingezeichnet.

Fig. 4: Volcanic activity at the Bárðarbunga volcano (Iceland) between 2014 and 2015. Earthquakes with $M \geq 4$ at the caldera ring-fault are indicated by coloured circles. The segments of the dike intrusion (red lines) were accompanied by thousands of micro-earthquakes (open circles). The lava flow at Holuhraun is indicated.

Literatur

- Dahm, T., Fischer, T. (2014): Velocity ratio variations in the source region of earthquake swarms in NW Bohemia obtained from arrival time double-differences. - *Geophysical Journal International*, 196, 2, pp. 957–970.
- Jousset, P., Budi-Santoso, A., Jolly, A. D., Boichu, M., Surono, Dwiyo, S., Sumarti, S., Hidayati, S., Thierry, P. (2013): Signs of magma ascent in LP and VLP seismic events and link to degassing: An example from the 2010 explosive eruption at Merapi volcano, Indonesia. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261, pp. 171–192.
- Lühr, B.-G., Koulakov, I., Rabbel, W., Zschau, J., Ratdomopurbo, A., Brotopuspito, K. S., Fauzi, P., Sahara, D. P. (2013): Fluid ascent and magma storage beneath Gunung Merapi revealed by multiscale seismic imaging. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261, pp. 7–19.
- Maccaferri, F., Rivalta, E., Passarelli, L., Aoki, Y. (2016): On the mechanisms governing dike arrest: Insight from the 2000 Miyakejima dike injection. - *Earth and Planetary Science Letters*, 434, pp. 64–74.
- Passarelli, L., Rivalta, E., Cesca, S., Aoki, Y. (2015): Stress changes, focal mechanisms and earthquake scaling laws for the 2000 dike at Miyakejima (Japan). - *Journal of Geophysical Research*, 120, 6, pp. 4130–4145.
- Rivalta, E., Taisne, B., Bungler, A. P., Katz, R. F. (2015): A review of mechanical models of dike propagation: Schools of thought, results and future directions. - *Tectonophysics*, 638, pp. 1–42.
- Spica, Z., Legrand, D., Iglesias, A., Walter, T. R., Heimann, S., Dahm, T., Rogier, J.-L., Rémy, D., Bonvalot, S., West, M., Pardo, M. (2015): Hydrothermal and magmatic reservoirs at Lazufre volcanic area, revealed by a high-resolution seismic noise tomography. - *Earth and Planetary Science Letters*, 421, pp. 27–38.