

In Teufels Küche – Bohrungen ins Innere von Vulkanen

Thomas Wiersberg, Samuel Niedermann, Martin Zimmer
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Volcanoes fascinate both scientists and the general public alike. Their hazard risk, their capability to provide unique samples from depth, and their geothermal potential renders them important targets for scientific drilling. To date, a total of seven ICDP volcano drilling projects have been in operation or completed, while several others are in planning. Here we report on the Hawaii Scientific Drilling Project HSDP (USA), the Unzen Scientific Drilling Project USDP (Japan) and the Campi Flegrei Deep Drilling Project CFDDP (Italy). The primary objective of the HSDP was to improve our knowledge of the processes within mantle plumes feeding hotspot volcanoes such as Hawaii or Yellowstone. Noble gas isotope studies on olivine from drill core samples revealed important information on the evolution of the Hawaii plume in time and space. USDP has addressed fundamental scientific questions on the structure and growth history of the Unzen volcano and aimed to clarify the eruption mechanism. Online gas monitoring during drilling into the magma conduit has demonstrated that degassing and fluid circulation in the magma conduit are major factors governing the eruptions of Unzen. The substructure of the Campi Flegrei caldera is the target of CFDDP. This project aims to better understand volcanism associated with large calderas and to study the interaction between magmatic and geothermal systems as well as the role of fluids in the generation of seismic unrest, ground uplift and eruptions.



Vulkane faszinieren Laien wie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gleichermaßen und sind wichtige Forschungsobjekte für unterschiedliche wissenschaftliche Untersuchungen. Vulkanausbrüche können je nach Art und Stärke Auswirkungen auf unseren Lebensraum und das Klima von regionaler bis globaler Skala haben, jedoch ist unser Wissen zur Vorhersagbarkeit von Vulkanausbrüchen begrenzt und hängt vom Vulkantyp und letztendlich vom einzelnen Vulkan ab. Vulkane fördern Material aus großen Tiefen an die Erdoberfläche, das sonst nicht der Wissenschaft zugänglich wäre. Es liefert wertvolle Informationen zum Aufbau und zur Entwicklung von Vulkanen sowie der Lithosphäre, Asthenosphäre und ggf. auch des tiefen Mantels. Die häufig an vulkanische Gebiete angeschlossenen hydrothermalen Reservoirs sind zudem für Untersuchungen zur geothermischen Energiegewinnung von Interesse.

Die Vulkanforschung beschäftigte sich in der Vergangenheit vor allem mit Untersuchungen von und an der Erdoberfläche. Magmenbildung und Magmenaufstieg, d.h. Prozesse, welche zur Entstehung sowie zum Ausbruch eines Vulkans führen, laufen jedoch in der Tiefe ab. Letztlich kann ein besseres Verständnis dieser Prozesse, welches auch die Grundlage für eine mögliche Vorhersagbarkeit von Ausbrüchen darstellt, nur durch Untersuchungen in und an Proben aus der Tiefe gewährleistet werden. Das am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ angesiedelte Internationale Kontinentale Wissenschaftliche Bohrprogramm ICDP hat daher Vulkane als ein wichtiges Untersuchungsziel wissenschaftlicher Bohrkampagnen identifiziert. Bohren in aktive Vulkane kann aufgrund des erhöhten thermischen Gradienten eine Herausforderung sowohl an Bohrwerkzeug und Messgeräte als auch an die Bohrspülung darstellen. Die Bohrspülung zirkuliert während des Bohrens im Bohrloch (vgl. Artikel von Harms in diesem Heft), um Bohrwerkzeug und Messgeräte zu kühlen und kann sich im Extremfall so stark erhitzen, dass sie auf dem Weg zur Erdoberfläche zu sieden beginnt. Sie muss dann an der Oberfläche kondensiert und gekühlt werden. Sollte beim Bohren in Vulkane flüssiges Magma angetroffen werden, so muss die Bohrung unterbrochen werden. Es ist jedoch sehr unwahrscheinlich, dass dadurch ein Vulkanausbruch ausgelöst wird. Einen Risikofaktor stellt der unkontrollierte Zutritt von

gespannten Fluiden und Gasen in das Bohrloch dar, welcher jedoch mithilfe einer Bohrspülung hoher Dichte sowie sogenannter „Blowout-Preventer“, d.h. Absperrventile direkt über dem Bohrloch, kontrolliert werden kann.

Bis heute wurden im Rahmen von ICDP-Projekten sieben Bohrungen in bzw. an Vulkanen niedergebracht (Abb. 1), weitere sind in Planung. Im Folgenden werden drei Beispiele von wissenschaftlichen Bohrungen in Vulkane näher vorgestellt, an denen das GFZ beteiligt ist: Mauna Kea auf Hawaii (USA) als Vertreter des sogenannten Hotspot-Vulkanismus, Unzen (Japan), ein Schichtvulkan des pazifischen Feuerrings, sowie Campi Flegrei (Italien), ein Calderavulkan 20 km westlich von Neapel.

ICDP Hawaii Scientific Drilling Project

Die Vulkankette der Hawaii-Inseln ist das klassische Beispiel für Intraplatten-Vulkanismus, der durch den Aufstieg basischer Schmelzen aus dem tiefen Erdmantel verursacht wird. Geophysikalische und geochemische Untersuchungen legen nahe, dass die Quelle dieses sogenannten „Mantel-Plumes“ im unteren Erdmantel liegt. Da sich hier die Pazifische Platte über den stationären Plume hinwegbewegt, verschiebt sich dessen relativer Austrittspunkt auf der Platte im Lauf der Jahrmillionen, was zur Bildung einer Inselkette mit von Südosten nach Nordwesten zunehmendem Alter geführt hat. Aktuell konzentriert sich die vulkanische Aktivität auf die Hauptinsel von Hawaii und dort insbesondere auf die Vulkane Mauna Loa (Abb. 2) und Kilauea sowie den unter der Meeresoberfläche befindlichen Loihi Seamount. Der im Norden der Hauptinsel gelegene Mauna Kea hat die Hauptphase seiner Aktivität bereits beendet; sein letzter Ausbruch fand vor etwa 4500 Jahren statt.

Um die zeitliche Entwicklung eines Hawaii-Vulkans im Detail zu untersuchen und mehr über die Eigenschaften des Hawaii-Plumes sowie von Mantelplumes allgemein zu erfahren, wurde im Jahr 1993 in der Nähe der Stadt Hilo auf der Hauptinsel Hawaii eine 1056 m tiefe Pilotbohrung niedergebracht. Die dicht daneben abgeteufte ICDP-Hauptbohrung erreichte im Jahr 1999 3109 m und wurde zwischen 2003 und 2007 auf 3519 m vertieft. Beide Bohrungen förderten zunächst Laven des Mauna Loa, unterhalb 250 bis 280 m Tiefe dann Lavaabfolgen des Mauna Kea. Bis 1090 m Tiefe handelt es sich um subaerisch eruptierte Laven, darunter wurden submarine Ablagerungen (Hyaloklastite und Kissenlaven) erbohrt.

Am GFZ wurden aus den Bohrkernen Olivine separiert (Abb. 3) und an diesen die Konzentrationen und Isotopenzusammensetzungen aller stabilen Edelgase untersucht. Edelgase sind ausgezeichnete Tracer für die Herkunft von Magmen sowie für die

Links: Untersuchungen am Vulkan „Solfatara“ im Vorfeld der Tiefbohrung in der Campi-Flegrei-Caldera in Italien (Foto: T. Wiersberg, GFZ)

Left: Site survey at the “Solfatara” volcano in preparation of the deep drilling campaign in the Campi Flegrei Caldera, Italy



Kontakt: T. Wiersberg
(thomas.wiersberg@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Laufende und beendete ICDP-Vulkanbohrprojekte; von West nach Ost: Koolau (Hawaii), Mauna Kea (Hawaii), Long Valley (Kalifornien), Snake River Plain (Idaho), Krafla (Island), Campi Flegrei (Italien), Unzen (Japan)

Fig. 1: Running or completed ICDP volcano drilling projects from west to east: Koolau (HI, USA), Mauna Kea (HI, USA), Long Valley (CA, USA), Snake River Plain (ID, USA), Krafla (Iceland), Campi Flegrei (Italy), Unzen (Japan)



Abb. 2: Blick vom Mauna Kea (4205 m) auf den breiten Rücken des Mauna Loa (4170 m) auf der Hauptinsel Hawaii. Während Mauna Loa sich noch in der Hauptphase seiner Aktivität („Schildaufbauphase“) befindet, hat Mauna Kea diese bereits beendet, was sich u. a. an den im Vordergrund sichtbaren Schlackekegeln zeigt. (Foto: S. Niedermann, GFZ)

Fig. 2: View from Mauna Kea (4205 m) to the broad ridge of Mauna Loa (4170 m) on the Big Island of Hawaii. While Mauna Loa is still in its main activity phase (“shield building stage”), Mauna Kea has already ended that phase, as shown e.g. by the presence of cinder cones visible in the front.

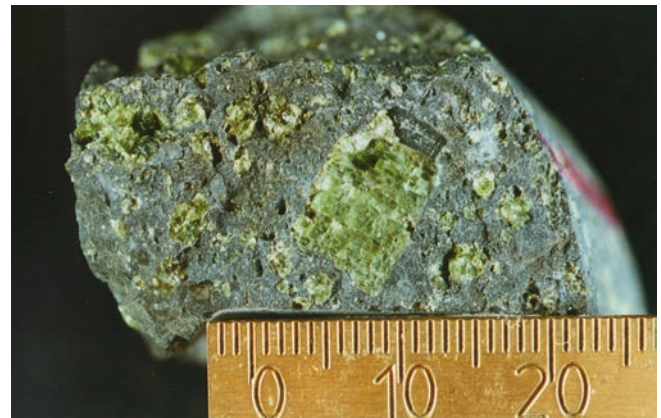


Abb. 3: Ansicht einer Bohrkernprobe mit in das Basaltgestein eingebetteten, bis zu zentimetergroßen Olivinkristallen. Olivine sind ausgezeichnete Edeltgasspeicher, welche die ursprünglichen Isotopenzusammensetzungen über geologische Zeiträume konservieren. (Foto: GFZ)

Fig. 3: View of a drill core sample with up to centimeter-sized olivine crystals embedded in the basalt matrix. Olivines retain noble gases very well, conserving their original isotope compositions over geological timescales.

Prozesse, denen diese beim Aufstieg zur Erdoberfläche ausgesetzt waren, wie etwa Aufschmelzen, Entgasung und Mischung mit anderen Komponenten. Im Folgenden soll dies anhand der Isotopendaten von Helium und Neon vorgestellt werden.

Hawaii ist gemeinsam mit Island bekannt für sehr hohe Isotopenverhältnisse von $^3\text{He}/^4\text{He}$ bis zu etwa $35 R_A = 1,39 \times 10^{-6}$ (R_A ist das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis in Luft). Im Gegensatz dazu zeigen mittelozeanische Rückenbasalte (MORB), die typisch für den

konvergierenden oberen Erdmantel sind, weltweit $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse um $8 R_A$, während in der Kruste sehr geringe Werte um $0,01 R_A$ gemessen werden. Ähnliche, wenn auch weniger deutliche Unterschiede gibt es in den Isotopenzusammensetzungen von Neon, Argon und Xenon.

Abb. 4a zeigt die $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse gegen die Tiefe; zusätzlich zu den eigenen Ergebnissen sind auch Literaturdaten dargestellt (Kurz et al., 1996, 2004; DePaolo et al., 2001).

Auffallend ist, dass sowohl im Mauna-Loa-Bereich als auch im subaerischen Teil der Mauna-Kea-Laven die $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse von zunächst MORB-ähnlichen Werten um $8 R_A$ mit der Tiefe, d. h. mit dem Alter ansteigen. Unterhalb von etwa 800 m zeigen Mauna-Kea-Laven etwa 11 bis $12 R_A$, abgesehen von einigen erhöhten Werten bis $>20 R_A$ insbesondere zwischen 2000 und 2600 m. Diese Beobachtung kann durch einen „zonierten Plume“ erklärt werden: Die für Hawaii charakteristische Isotopensignatur tritt nur im Zentrum des Plumes in reiner Form auf. Dort liegt heute der submarine Vulkan Loihi Seamount. Vor einigen 100 000 Jahren war das Zentrum noch weiter westlich unter dem Mauna Loa; der nördlich davon gelegene Mauna Kea befand sich jedoch immer am Rand des Plumes, wo Material aus dem umgebenden oberen Mantel eingemischt wird. Daher erreichen Mauna-Kea-Laven nicht die hohen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse wie einige Proben von Loihi und Mauna Loa. Es gab aber offenbar Phasen erhöhter Aktivität, in denen auch die Außenbereiche des Plumes stärker mit Material aus dem Zentrum versorgt wurden.

Das Modell eines zonierten Plumes kann auch andere geochemische Trends der Hawaii-Laven wie z. B. die Isotopensignaturen von Sr und Nd erklären, jedoch zeigen die Neon-Daten ein anderes Bild: Das Dreisotopendiagramm $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ gegen $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ (Abb. 5) zeigt für die Olivine trotz z. T. relativ großer Fehlergren-

zen deutlich, dass sich bis auf einen singulären Wert alle Daten entlang der „Loihi-Kilauea-Linie“ gruppieren, die Mischungen zwischen Luft-Neon und der für den Hawaii-Plume typischen Zusammensetzung entspricht. Dagegen zeigen die Proben keinerlei Hinweise auf einen Einfluss von MORB-Neon, wie es aufgrund der teilweise sehr MORB-ähnlichen Heliumdaten insbesondere im subaerischen Mauna-Kea-Bereich zu erwarten wäre. Um die Neon-Daten in Abhängigkeit der Bohrlochtiefe zeigen zu können, werden die $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnisse auf das Mantel-Endglied, definiert durch $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}=12,5$, extrapoliert. Das Ergebnis ist in Abb. 4b dargestellt: Es ist keine Tiefenabhängigkeit festzustellen, fast alle Daten gruppieren sich um den für Loihi und Kilauea typischen Wert.

Diese Edelgasstudie an Proben der Hawaii-Tiefbohrung zeigt, dass die geochemische Struktur des Hawaii-Plumes (und anderer Mantelbereiche) durch das relativ einfach zu messende Helium nicht ausreichend beschrieben wird, da seine Isotopenzusammensetzung leicht durch sekundäre Prozesse wie Schmelzbildung und Mischung mit externen Komponenten verändert wird. Neon ist gegen solche Veränderungen weit weniger anfällig und liefert daher bedeutende zusätzliche Informationen. Die vollständigen Ergebnisse aus den Bohrphasen von 1993 und 1999 zeigen *Althaus et al. (2003)*.

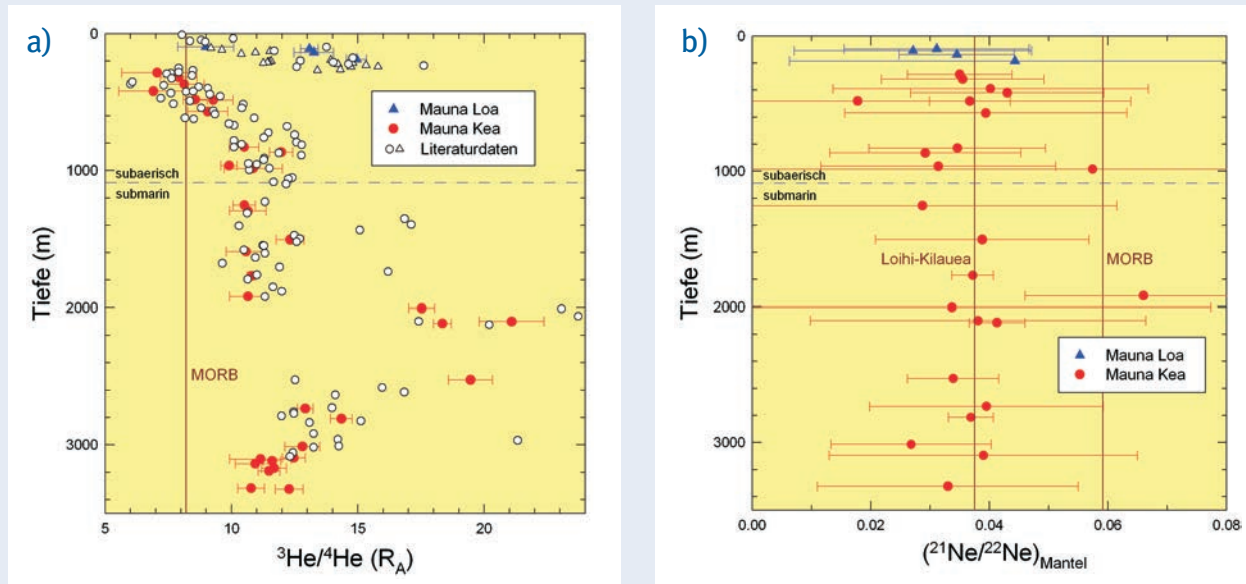


Abb. 4: Tiefenabhängigkeit von $^3\text{He}/^4\text{He}$ (a) und $(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{Mantel}}$ (b) in den Bohrkernen der Hawaii-Tiefbohrungen. $(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{Mantel}}$ ist das luftkorrigierte $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis (siehe Text). Auffallend ist die starke Variation des Helium-Isotopenverhältnisses von MORB-ähnlichen zu höheren Werten, während die Neon-Daten über den gesamten Tiefenbereich im für Hawaii typischen Bereich verbleiben. Helium-Literaturdaten stammen von Kurz et al. (1996, 2004) und DePaolo et al. (2001). Eigene Daten sind mit 2σ -Fehlergrenzen dargestellt.

Fig. 4: Depth dependence of $^3\text{He}/^4\text{He}$ (a) and $(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{mantle}}$ (b) in the drill cores of the Hawaiian Scientific Drilling Project. $(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{mantle}}$ is the air-corrected $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ ratio (see text). Note the substantial variation of the helium isotope ratio from MORB-like to higher values, while neon data are constant at values typical for Hawaii over the whole depth range. Helium literature data are from Kurz et al. (1996, 2004) and DePaolo et al. (2001). Own data are shown with 2σ error limits.

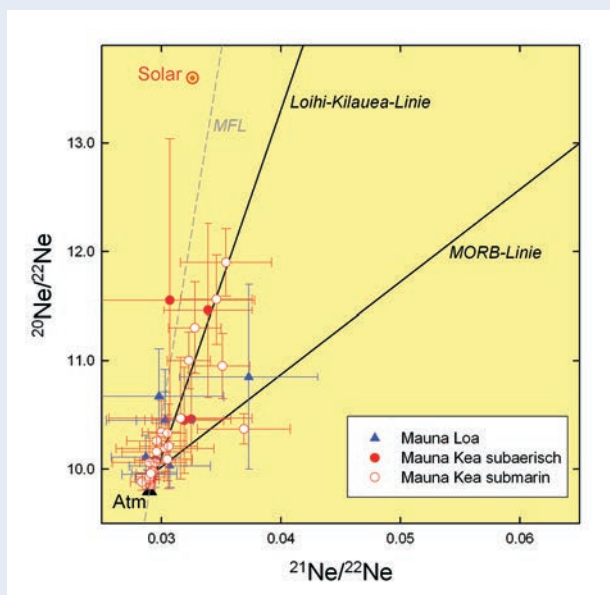


Abb. 5: Neon-Dreisisotopendiagramm für die Daten der Hawaii-Tiefbohrung mit 2σ -Fehlergrenzen. Die Loihi-Kilauea-Linie repräsentiert Mischungen zwischen Luft-Neon und der für Hawaii typischen Zusammensetzung, die MORB-Linie zeigt Mischungen zwischen Luft und der Komponente in mittelozeanischen Rückenbasalten. Solares Neon und Luft-Neon (Atm) sowie die Massenfraktionierungslinie (MFL) sind ebenfalls eingezeichnet.

Fig. 5: Neon three-isotope plot for Hawaii Scientific Drilling Project data with 2σ error limits. The Loihi-Kilauea line represents mixtures between air neon and the composition typical for Hawaii, the MORB line shows mixtures between air and the component found in mid-ocean ridge basalts. Solar and atmospheric (Atm) neon as well as the mass fractionation line (MFL) are shown also.

ICDP Unzen Scientific Drilling Project

Der aufgrund seiner heftigen Eruptionen und der Nähe zu stark bevölkerten Gebieten von der UNESCO als Dekadenvulkan nominierte, 1360 m hohe Unzen liegt auf der Shimabara-Halbinsel auf Kyushu, der südlichsten der vier Hauptinseln Japans. Er entstand vor rund 500 000 Jahren am westlichen Ende des aktiven Beppu-Shimabara-Grabens und fördert hauptsächlich dazitische Magmen. Seine historischen Eruptionen waren durch dicke Lavaflüsse und Dombildung gekennzeichnet. Eine Lava-eruption am Gipfel führte 1792 zu einem großen Flankenabbruch ins Meer mit einem resultierenden Tsunami. Dieses Ereignis war die größte vulkanische Katastrophe in der Geschichte Japans und forderte 15 000 Menschenleben.

Vulkanischer Tremor westlich des Unzen zeugte nach 198 Jahren relativer Ruhe im Frühjahr 1990 von erneuter Aktivität. Innerhalb eines Jahres traten phreatische Eruptionen an mehreren Stellen

am Gipfel auf, die auf das Eindringen von frischem Magma in eine wahrscheinlich wassergesättigte Zone 1 bis 2,5 km unterhalb des Gipfels zurückgeführt wurden. 1991, etwa 18 Monate nach den ersten Erdbeben, trat Magma am Gipfel aus und bildete einen Lavadom, der über die nächsten vier Jahre kontinuierlich wuchs. Mehr als 10 000 pyroklastische Ströme entstanden in dieser Zeit, der größte erreichte am 3. Juni 1991 eine Länge von 4,3 km und tötete 43 Menschen in einer evakuierten Zone, darunter die bekannten Vulkanologen Katia und Mauris Krafft.

Nach der Eruptionsphase begann ein sechsjähriges umfangreiches ICDP-Bohrprogramm, um den Förderschlot von 1990 bis 1995 in mehr als 1 km Tiefe zu erkunden. In der ersten Phase des Forschungsvorhabens wurden zwei vertikale Bohrungen (USDP-1 mit 750 m und USDP-2, 1463 m) an der Ostflanke des Vulkans abgeteuf und teilweise gekernt, um die Struktur und Eruptionsgeschichte des Unzen zu erforschen. Im Anschluss an eine weitere Erprobungsbohrung wurde 2003 an der Nordflanke die Hauptbohrung (USDP-4) begonnen. Die bis zu 75° abgelenkte Bohrung traf in 1600 m den Schlot und erreichte im Juli 2004 die Endteufe von 1995 m bei einer vertikalen Tiefe unterhalb des Gipfels von 1500 m (Abb. 6).

Im Rahmen dieses ICDP-Bohrprojekts führte das GFZ beim Niederbringen von USDP-4 kontinuierliche Echtzeitanalysen der in der Bohrspülung gelösten Gasphase durch, um ein Tiefenprofil der Gasgehalte im Vulkangebäude zu erhalten und um Zuflusszonen zu detektieren. Das in der Bohrspülung gelöste Gas wurde dazu in einem Gas/Wasser-Separator mechanisch und unter leichtem Vakuum extrahiert. Die kontinuierliche Analyse des freigesetzten Gases erfolgte in einem Feldlabor direkt auf der Bohrlokation mit einem Quadrupol-Massenspektrometer und einem ^{222}Rn -Alpha-Detektor (Abb. 7). Die Bohrspülungsgase bestanden aus gelöster Luft, Gasen, die mechanisch durch den Bohrmeißel aus den Gesteinen freigesetzt wurden und freien Gasen, die in das Bohrloch durch Klüfte eintraten.

Unsere Ergebnisse liefern einen Beitrag zum Verständnis des Entgasungsverhaltens des Unzen. Petrologische Untersuchungen zeigten, dass Unzen-Magma im Förderschlot rund 6 Gew.% Wasser enthält. Beim Ausfließen an der Oberfläche war aber nahezu kein Wasser mehr vorhanden. Nach Nakada et al. (1997) soll dieses magmatische Wasser in weniger als 1 bis 2 km Tiefe abgegeben werden und auf Brüchen und Klüften innerhalb des Vulkangebäudes zirkulieren.

Durch den Nachweis von Helium mit Mantelsignatur sowie von hohen CH_4 -, He- und Rn-Konzentrationen und die Detektion von mehreren Fluidflüssen unterhalb 1470 m Bohrlochtiefe, die für ein effektives Entgasen des Magmas sprechen, konnte diese Theorie bestätigt werden. Der frühe Wasserverlust im Förderschlot führt zur Viskositätszunahme des Magmas, was folglich auch für die Dombildung am Unzen verantwortlich ist. Die Existenz mehrerer signifikanter Zuflusszonen zeigt, dass sich Lösungen und Gase innerhalb des Vulkangebäudes frei bewegen. Die Detektion die-

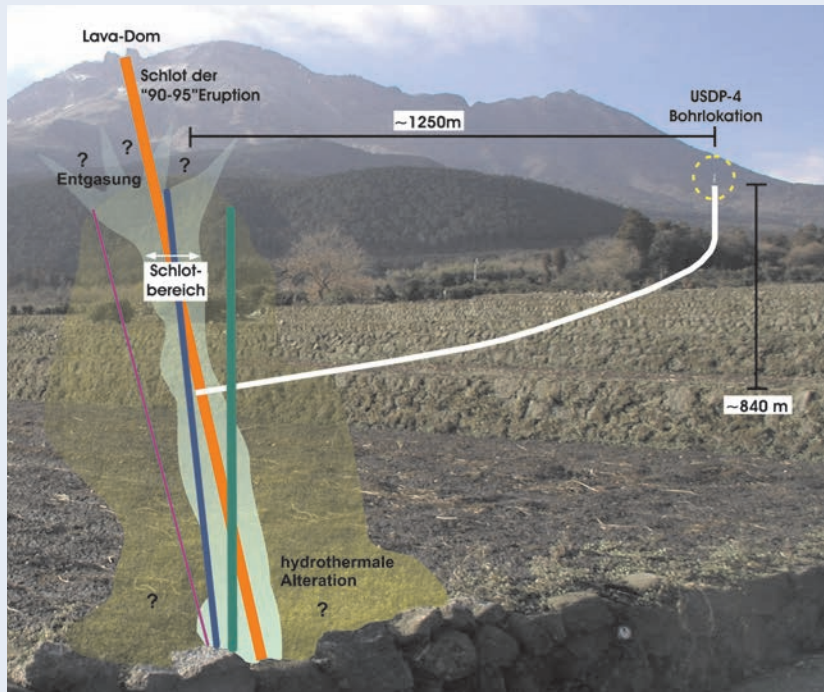


Abb. 6: Modell des Unzen mit Flankenbohrung USDP-4 (Foto: J. C. Eichelberger, Univ. of Alaska Fairbanks, USA)

Fig. 6: Schematic model of Unzen including the USDP-4 borehole

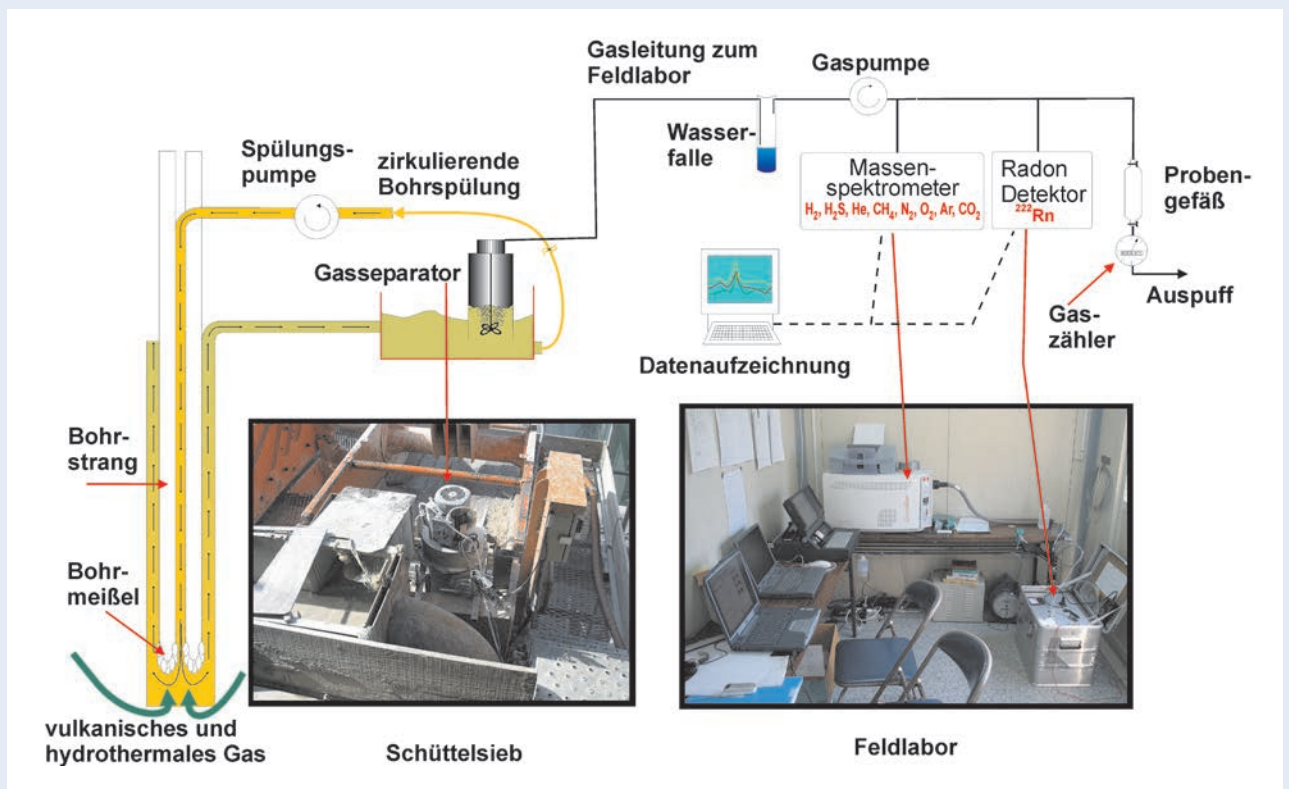


Abb. 7: Experimenteller Aufbau der Gasmesseinrichtung auf dem Bohrplatz

Fig. 7: Setup of the on-site gas-monitoring assembly

ser hydrothermalen Fluide unterstützt ein Modell von *Fujimitsu et al. (2008)*, das intensive hydrothermale Zirkulation für Temperaturen von etwa 175 °C im erbohrten Förderschlot von 1990 bis 1995 verantwortlich macht; deutlich geringer als prognostizierte Werte (500 bis 600 °C). Eine pyritreiche, hydrothermal alterierte Zone wurde ab Erreichen des Förderschlots in 1600 m Tiefe durch die kontinuierlich zunehmende H₂S-Konzentration angezeigt (*Tretner et al., 2008*).

Bohrungen in einen aktiven und gut untersuchten Vulkan erschließen die Möglichkeit, *In-situ*-Untersuchungen durchzuführen, Gesteins- und Fluidproben zu sammeln sowie deren Tiefenverteilung zu messen. Durch die Unzen-Förderschlotbohrung und die wissenschaftlichen Begleitexperimente konnten prinzipielle Fragestellungen des Entgasungsverhaltens, des Eruptionsmechanismus und des Abkühlungsverhaltens geklärt werden, die für das Verständnis magmatischer Prozesse und damit für die Minimierung vulkanischer Gefahren essentiell sind.

ICDP Campi Flegrei Deep Drilling Project

Große, kesselförmige Krater, sogenannte Calderen, sind Zeugen des vermutlich gefährlichsten Typs von Vulkanismus auf der Erde. Eine Caldera entsteht durch explosionsartiges Entleeren einer großen Magmenkammer, wobei bis zu mehrere hundert Kubikkilometer an Material freigesetzt werden. Dabei wird das über der Magmenkammer liegende Deckgestein entweder durch den Ausbruch weggesprengt oder stürzt unmittelbar nach dem Ausbruch ein und erzeugt so die typische Kesselstruktur, die Durchmesser von über 50 km aufweisen kann.

Die Campi-Flegrei-Caldera (Campi Flegrei = Brennende Felder) hat einen Durchmesser von rund 14 km und liegt etwa 20 km westlich von Neapel in der süditalienischen Region Kampanien. Geochemisch unterscheidet sich die Campi-Flegrei-Caldera vom benachbarten Vesuv sowohl in der Zusammensetzung rezenter Fluide und Gase als auch im geförderten Material vergangener Eruptionen. Dennoch gibt es geophysikalische Hinweise, dass die Magmenkammern beider Vulkane miteinander wechselwirken.

Der früheste Ausbruch der Caldera, datiert auf 37 000 v. Chr., setzte bis zu 200 km³ Ignimbrit frei. Dieser Ausbruch wird als Ursache eines Klimawandels (Heinrich-Event IV), der zum Aussterben der Neandertaler führte, diskutiert. Ein weiterer Ausbruch vor etwa 15 000 Jahren ließ das Innere der Caldera um mehrere hundert Meter einstürzen. Vor etwa 4 000 Jahren entstand in der Caldera ein neuer Vulkan, die Solfatara. Die letzten magmatischen Aktivitäten der Caldera im Jahr 1538 führten zur Entstehung und Eruption des Monte Nuovo. Die Fumarolen „Bocca Grande“ und „Bocca Nuova“ in der Solfatara sowie das Fumarolenfeld in Pisciarelli an der östlichen Flanke der Solfatara belegen jedoch eindrucksvoll, dass die Caldera weiterhin aktiv ist. Campi Flegrei war in der jüngeren Vergangenheit Schauplatz seismischer Aktivitäten und zweier intensiver Hebungsphasen (1968 bis 1972 sowie 1982 bis 1984), in denen sich der Untergrund innerhalb weniger Jahre um jeweils knapp 2 m hob. Beide Hebungsphasen waren begleitet von Temperaturerhöhungen der Fumarolen, erhöhten Anteilen an Gasen magmatischer Herkunft, Anomalien im Schwerfeld sowie Schwarmbeben. Regelmässige Variationen in der Zusammensetzung der Gase korrelieren mit Gezeiten (Abb. 8), welche

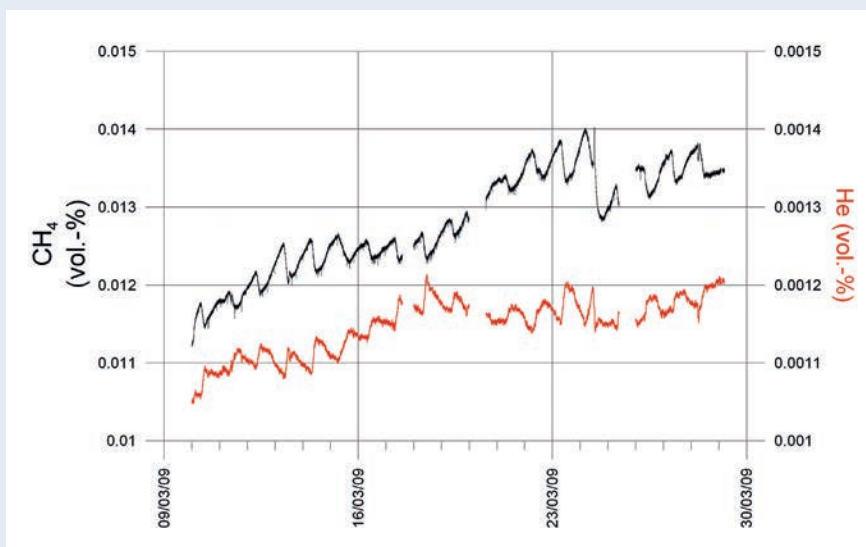


Abb. 8: Tagesschwankungen der Gaszusammensetzung während einer dreiwöchigen Messkampagne am Fumarolenfeld in Pisciarelli. Der allgemein ansteigende Trend deutet entweder verstärkte vulkanische Aktivitäten oder gezeitenbedingte monatliche Schwankungen an. Rot: Helium (magmatisch), schwarz: Methan (hydrothermal). Modifiziert von Wiersberg et al. (2009)

Fig. 8: Daily variations in the gas composition during a three week gas monitoring survey in the Pisciarelli fumarolic field. The generally increasing trend is either due to intensified volcanic activities or monthly tidal variations. Red: helium (magmatic), black: methane (hydrothermal). Modified from Wiersberg et al. (2009)

auch seismische Aktivitäten im Hydrothermalfeld der Campi-Flegrei-Caldera verursachen (De Lauro et al., 2013).

Die Ursache der Bewegungen im Untergrund und ein möglicher Zusammenhang mit dem Zufluss neuen Magmas in die Magmenkammer ist Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Allgemein wird angenommen, dass sich beim Aufstieg heiße, magmatische Fluide (überwiegend CO₂) mit kalten, meteorischen Wässern (d.h. versickernden Oberflächenwässern) in einer Tiefe von etwa 2000 bis 2500 m mischen (De Natale et al., 2001; Troise et al., 2007). In dieser Tiefe wurden auch die Hypozentren der Schwarmbeben lokalisiert. Die eigentliche Magmenkammer wird anhand seismischer Messungen in mindestens 6 km Tiefe vermutet.

Das ICDP-Projekt Campi Flegrei Deep Drilling (CFDDP) will offene Fragen zum Calderenvulkanismus mithilfe zweier Bohrungen in der Campi-Flegrei-Caldera näher untersuchen. Eine 3 bis 4 km tiefe Bohrung soll am östlichen Rand der Caldera abgelenkt werden, welche sich unterhalb des Golfs von Pozzuoli befindet. Bohrkerne sowie Fluid- und Gasproben aus dem Bohrloch sollen wertvolle Informationen über Fluidtransport und -zirkulation sowie Wechselwirkungen mit anstehendem Gestein liefern. Für Langzeitmessungen wird das Bohrloch mit hochtemperaturfester faseroptischer und konventioneller Sensorik zur Bestimmung von Wärmefluss, seismischer Aktivität, Stressfeld und weiteren Parametern ausgestattet, deren Entwicklung einen weiteren Schwerpunkt des Projekts darstellt. Eine 500 m tiefe, senkrechte Vorbohrung wurde im Jahr 2012 in zwei Phasen erfolgreich niedergebracht. Befürchtungen, dass die Bohrung vulkanische Aktivitäten auslösen könnte, erwiesen sich, wie im Vorfeld untersucht, als unbegründet. Das GFZ war an der Vorbohrung durch Messungen zur Geochemie von Gasen, die beim Bohren gefördert wurden, beteiligt (näheres zur Methode im Abschnitt über Unzen). Hierbei ergab sich ein insgesamt sehr geringer Gasgehalt in der Tiefe, in der CO₂ und CH₄ dominieren. Gaszutritte hängen von der Porosität der durchteuften Gesteinsschichten ab, ein Zufluss durch Risse und Spalten spielt keine Rolle. Die Ergebnisse sind ein erster Hinweis darauf, dass die Hebungen ihre Ursache nicht in variablen Permeabilitäten im flachen Untergrund bis 500 m Tiefe haben. Geplante Gasuntersuchungen beim Abteufen der Hauptbohrung, die in den nächsten Jahren geplant ist, können weitere wichtige Hinweise zum Ursprung der Fluide und ihrer Bewegung im Untergrund liefern und letztlich die Frage klären helfen, ob und wie magmatische Volatile im Hydrothermalfeld die Hebungsprozesse an der Oberfläche beeinflussen.

Ausblick

Wissenschaftliche Bohrungen in Vulkanen sind Unternehmungen am Rand des gegenwärtig technisch Möglichen und Machbaren, liefern aber auch einzigartige Einblicke in Aufbau und

Entwicklung von Vulkanen. Zusammen mit Methoden der Geodäsie, Petrologie, Geophysik sowie luft- und satellitengestützten Messungen, die ebenfalls von Forscherinnen und Forschern am GFZ weiterentwickelt und angewendet werden, ergibt sich so ein detailliertes Bild der untersuchten Vulkane von der Erdoberfläche bis in den Erdmantel und der ablaufenden Prozesse auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen. Dieses Wissen kann helfen, die unmittelbar von Vulkanen ausgehenden Gefahren für die Bevölkerung zu erkennen und zu minimieren.

Literatur

- Althaus, T., Niedermann, S., Erzinger, J. (2003): Noble gases in olivine phenocrysts from drill core samples of the Hawaii Scientific Drilling Project (HSDP) pilot and main holes (Mauna Loa and Mauna Kea, Hawaii). - *Geochemistry Geophysics Geosystems* (G3), 4, 1, 1-22. DOI: <http://doi.org/10.1029/2001GC000275>
- DePaolo, D. J., Bryce, J. G., Dodson, A., Shuster, D. L., Kennedy, B. M. (2001): Isotopic evolution of Mauna Loa and the chemical structure of the Hawaiian plume. - *Geochemistry Geophysics Geosystems* (G3), 2, 7, 2000GC000139. DOI: <http://doi.org/10.1029/2000GC000139>
- De Lauro, E., De Martino, S., Falanga, M., Petrosino, S. (2013): Synchronization between tides and sustained oscillations of the hydrothermal system of Campi Flegrei (Italy). - *Geochemistry Geophysics Geosystems* (G3), 14, 8, 2628-2637. DOI: <http://doi.org/10.1002/ggge.20149>
- De Natale, G., Troise, C., Pingue, F. A. (2001): A mechanical fluid-dynamical model for ground movements at Campi Flegrei caldera. - *Journal of Geodynamics*, 32, 4-5, 487-517. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0264-3707\(01\)00045-X](http://doi.org/10.1016/S0264-3707(01)00045-X)
- Fujimitsu, Y., Ehara, S., Oki, R., Kanou, R. R. (2008): Numerical model of the hydrothermal system beneath Unzen volcano, Japan. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 1-2, 35-44. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.032>
- Kurz, M. D., Kenna, T. C., Lassiter, J. C., DePaolo, D. J. (1996): Helium isotopic evolution of Mauna Kea Volcano: First results from the 1-km drill core. - *Journal of Geophysical Research*, 101, B5, 11781-11791. DOI: <http://doi.org/10.1029/95JB03345>
- Kurz, M. D., Curtice, J., Lott III, D. E., Solow, A. (2004): Rapid helium isotopic variability in Mauna Kea shield lavas from the Hawaiian Scientific Drilling Project. - *Geochemistry Geophysics Geosystems* (G3), 5, 4, Q04G14. DOI: <http://doi.org/10.1029/2002GC000439>
- Nakada, S., Eichelberger, J. C., Shimizu, H. (1997): Report on Unzen International Workshop at Shimabara, May 26-29, 1997, Shimabara.
- Tretner, A., Zimmer, M., Erzinger, J., Nakada, S., Saito, M. (2008): Real-time drill mud gas logging at the USDP-4 drilling, Unzen volcano, Japan. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 1-2, 28-34. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.031>
- Troise, C., De Natale, G., Pingue, F., Obrizzo, F., De Martino, P., Tammaro, U., Boschi, E. (2007): Renewed ground uplift at Campi Flegrei caldera (Italy): new insight on magmatic processes and forecast. - *Geophysical Research Letters*, 34, 3, L03301. DOI: <http://doi.org/10.1029/2006GL028545>
- Wiersberg, T., Somma, R., Rocco, A., Quattrocchi, F., Zimmer, M., De Natale, G., De Natale, P., Boschi, E. (2009): Continuous in-situ measurements of volcanic gases at Pisciarelli-Phelgrea Field (Italy): a new experimental approach. (Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-6826, 2009), General Assembly European Geosciences Union (Vienna, Austria 2009).