



VULKANISMUS UND GESELLSCHAFT

# Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination

Monogenetischer Vulkanismus  
und Großstädte

Wechselwirkungen von  
Vulkanismus und Klima

Erzbildende Prozesse  
an Subduktionszonen

ESKP-Themenspezial  
**Vulkanismus und Gesellschaft.**  
**Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination.**

[www.eskp.de](http://www.eskp.de)

# Impressum

## Herausgeber

Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

## Redaktion

PD Dr. Dierk Spreen  
Jana Kandarr  
Oliver Jorzik

## Layout

Pia Klinghammer

**E-Mail:** [redaktion-eskp@gfz-potsdam.de](mailto:redaktion-eskp@gfz-potsdam.de)

Alle Artikel sind auch im Internet abrufbar:

<https://themenspezial.eskp.de/vulkanismus-und-gesellschaft/inhalt-937231/>

**Stand:** September 2020

**Heft-DOI:** [doi.org/10.2312/eskp.2020.2](https://doi.org/10.2312/eskp.2020.2)

**ISBN:** 978-3-9816597-3-3

## Zitiervorschlag:

Jorzik, O., Kandarr, J., Klinghammer, P. & Spreen, D. (Hrsg.). (2020). *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination*. Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2

## Einzelartikel:

[Autor\*innen]. (2020). [Beitragstitel]. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* ([Seitenzahlen]). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:[DOI-Nr.]

Die Verantwortung für die Inhalte der Einzelbeiträge der vorliegenden Publikation liegt bei den jeweiligen Autorinnen und Autoren.

Empfehlungen zum Verhalten an aktiven Vulkanen, Vulkaninfos für Reisende usw. sind nach bestem Wissen entwickelt worden. Dennoch können das GFZ sowie andere beteiligte Zentren oder Institutionen nicht verantwortlich gemacht werden und keinerlei Haftung für Schäden übernehmen, die durch die Beachtung dieser Hinweise entstehen. Das Gleiche gilt für die zu dieser Publikation beitragenden Autorinnen und Autoren oder in dieser Publikation zitierte Personen.



Text, Fotos und Grafiken soweit nicht andere Lizenzen betroffen:  
[eskp.de](https://www.eskp.de) | [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

# Inhalt

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Editorial .....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>1. Vulkanische Phänomene .....</b>   | <b>9</b>  |
| Wie lassen sich Vulkane unterscheiden? .....  | 10        |
| ESKP-Redaktion  |           |
| Seltenes Naturphänomen: Lavaseen .....  | 13        |
| Jana Kandarr  |           |
| Vulkanische Seen: Blaue Fenster in die Tiefen eines Vulkans .....                           | 17        |
| Jana Kandarr  |           |
| Monogenetischer Vulkanismus und Großstädte: Wo und wann<br>bleibt ein Rätsel .....          | 26        |
| Jana Kandarr  |           |
| Vulkane im Labor: Was man durch experimentelle<br>Vulkanausbrüche lernen kann .....         | 34        |
| Dr. Ulrich Küppers  |           |
| <b>2. Gesellschaft und Vulkanismus .....</b>  | <b>39</b> |
| Umgang mit Naturgewalten – Verhalten an aktiven Vulkanen .....                              | 40        |
| Edgar Zorn  |           |
| Lassen sich vulkanische Risiken und eventuelle<br>Katastrophen managen? .....               | 46        |
| Oliver Jorzik   |           |
| Wo genau können neue Vulkane entstehen? .....   | 51        |
| Interview mit Dr. Eleonora Rivalta  |           |
| Die Bedeutung von Informationen zu Vulkanausbrüchen<br>für den Flugverkehr .....            | 54        |
| Klaus Sievers   |           |
| Vulkanausbruch auf Island: Was lässt sich für<br>die Risikovorsorge lernen? .....           | 62        |
| Interview mit PD Dr. Thomas Walter  |           |
| Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung von Vulkanasche .....                          | 67        |
| Dr. Volker Matthias   |           |
| Mit Katastrophen unterhalten. Zur Faszination von Vulkanen im Film .....                    | 73        |
| PD Dr. Dierk Spreen   |           |
| <b>3. Vulkanismus und Klima .....</b>   | <b>83</b> |
| Vulkanismus und Klima in der Vergangenheit: Was lässt sich<br>für die Zukunft lernen? ..... | 84        |
| Dr. Sebastian Wagner  |           |
| Die Wechselwirkungen von Vulkanismus und Klima .....  | 90        |
| Dr. Julie Christin Belo   |           |
| Beeinflussen extreme Wetterereignisse Vulkanaktivitäten? .....                              | 94        |
| Stefan Bredemeyer   |           |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4. Unterseeischer Vulkanismus .....</b>   | <b>97</b>  |
| Die unbekannte Welt von Unterwasser-Vulkanen .....   | 98         |
| Dr. Karen Strehlow & Dr. Philipp A. Brandl   |            |
| Die Mittelozeanischen Rücken .....   | 101        |
| Dr. Morgane Le Saout   |            |
| Vulkanismus und erzbildende Prozesse an Subduktionszonen .....                                   | 105        |
| Dr. Philipp A. Brandl & Dr. Sven Petersen  |            |
| Magmatismus in Sedimentbecken – der Ursache vergangener<br>Umweltkatastrophen auf der Spur ..... | 109        |
| Dr. Christophe Galerne & Prof. Dr. Christian Berndt  |            |
| Hotspots und Inselketten .....   | 113        |
| Dr. Stephan Homrighausen   |            |
| Marine Supervulkane und deren Auswirkungen in der Erdgeschichte .....                            | 117        |
| PD Dr. Jörg Geldmacher, Dr. Reinhard Werner, Dr. Folkmar Hauff,<br>Dr. Gabriele Uenzelmann-Neben |            |
| <b>5. Geothermie .....</b>   | <b>121</b> |
| GEMex: Erkundung und Erschließung unkonventioneller<br>geothermischer Ressourcen in Mexiko ..... | 122        |
| Dr. Egbert Jolie, Prof. Dr. David Bruhn  |            |
| Superkritische Geothermal-Systeme: Energienutzung<br>in vulkanischen Gebieten .....              | 126        |
| Dr. Francesco Parisio, Prof. Dr. Thomas Nagel  |            |
| Geothermie-Ressourcen unter vulkanischen Seen<br>mit neuen Methoden erkunden .....               | 133        |
| Ass. Prof. Dr. Maren Brehme  |            |
| <b>6. Frühwarnung und Monitoring .....</b>   | <b>137</b> |
| Das Gefahrenpotenzial von Vulkanen durch Überwachung verringern .....                            | 138        |
| Oliver Jorzik  |            |
| High-Tech-Einsatz beim Vulkanmonitoring .....  | 144        |
| Oliver Jorzik  |            |
| Aus der Vogelperspektive: Drohnen in der Vulkanforschung .....                                   | 149        |
| Dr. Karen Strehlow   |            |
| Fernerkundung aktiver Vulkane mit Kleinsatelliten .....  | 152        |
| Prof. Dr. Dieter Oertel  |            |
| Verbesserte Abschätzung von Vulkanemissionen mit Satelliten<br>und Supercomputing .....          | 160        |
| Dr. Philipp Franke, Dr. Anne Caroline Lange,<br>Dr. Sabine Griessbach, Dr. Lars Hoffmann         |            |
| Konzepte für die Überwachung vulkanischer Seen .....   | 166        |
| Interview mit Dr. Egbert Jolie   |            |
| Warum brauchen wir Vulkanforschung in Deutschland? .....   | 170        |
| Interview mit PD Dr. Thomas Walter   |            |

**7. Vulkanismus im Sonnensystem ..... 175**

Vulkanismus im Planetensystem – ein Überblick ..... 176

Prof. Dr. Ralf Jaumann

Marsvulkan Olympus Mons – der größte Vulkan  
unseres Sonnensystems ..... 185

Oliver Jorzik, PD Dr. Dierk Spreen

**Anhang**

Wo finden Reisende aktuelle Informationen zu Vulkanaktivitäten? ..... 192

Oliver Jorzik, Jana Kandarr, Pia Klinghammer, PD. Dr. Dierk Spreen

# Vulkanismus und Gesellschaft

Der britische Gesandte in Neapel, William Hamilton, begann schon bald nach seiner Ankunft in der Stadt im November des Jahres 1764 mit der Erkundung des Vesuvs. Seine Beobachtungen fasste er ab 1766 in Briefen an die Royal Society zusammen. In der Folgezeit wurde Hamilton zu einem angesehenen Kenner des Vesuvs und zu einem frühen Vulkanexperten, dem es nicht um theoretische Spekulationen ging, sondern um „genaue und wirklichkeitsgetreue Beobachtungen der Vorgänge in der Natur, die Einfachheit und Wahrheit verbunden sind“ (Hamilton, 1776, S. 5, Übers. ESKP).

In seiner Arbeit über die Phlegräischen Felder geht Hamilton dann aber doch über die reine Beobachtung hinaus. Er äußert die Hypothese, dass Vulkane nicht Berge wie alle anderen seien, „deren Besonderheit lediglich darin bestehe, dass sie in ihrem Inneren entzündliche Materialien enthielten“ (Thüsen, 2008, S. 49). Hamilton nimmt vielmehr an, dass vulkanische Tätigkeiten Berge und damit Landschaften *erschaffen* – Landschaften, die Gefahren bergen, die den Menschen aber auch nützen können.

Der Nutzen einer vulkanischen Landschaft kann vielerlei Art sein: Sie bieten natürliche Baustoffe (natürliche Puzzolane), aus denen sich Gebäude und Städte errichten lassen. Heißen Quellen wie etwa der „I Pisciarelli“ in den Phlegräischen Feldern werden Heilkräfte zugesprochen. Durch vulkanische Aktivitäten können auch natürliche Häfen wie der Porto Pavone auf der Insel Nisida entstehen. Und nicht zuletzt erschaffen Vulkane Landschaften, „die der Mensch des 18. Jahrhunderts als ästhetisch ansprechend zu empfinden beginnt“ (Thüsen, 2008, S. 52). In all ihrem Schrecken hält die vulkanische Naturgewalt somit auch Wohltaten bereit, d. h. sie erweist sich als nützlich und „schaffend“ (vgl. Thüsen, 2008, S. 41-64).

Den vielfältigen und durchaus widersprüchlichen Beziehungen zwischen Menschen und Vulkanen wollen wir in der fünften Ausgabe des ESKP-Themenspezials aus heutiger Sicht nachspüren. Es wird immer offensichtlicher, dass Naturkatastrophen vulkanischen Ursprungs nicht nur in der geologischen Geschichte der Erde oder in der Geschichte des Lebens, sondern auch in der Menschheitsgeschichte ihre Wirkung hinterlassen haben.

Nach einer Einführung in verschiedene vulkanische Phänomene widmet sich das Themenspezial „Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination“ zunächst dem Gefahrenpotenzial von Vulkanen und der riskanten Beziehung zwischen Gesellschaft und Vulkanismus. Das betrifft das Risikomanagement für Städte, die in der Nähe oder sogar auf Vulkanfeldern liegen, die Bedrohung des Flugverkehrs durch Vulkanasche oder die enge Beziehung zwischen Klima und Vulkanismus, weshalb dem Vulkanmonitoring eine besondere Bedeutung zukommt. Weiterhin werden wir uns Vulkane im Meer anschauen. Hier verknüpfen sich Risiko- und Nutzungspotenziale. Submariner Flutbasalt-Vulkanismus war in der Erdgeschichte mehrmals ein Auslöser für Massensterben. Zugleich aber können unterseeische Vulkanzonen wegen ihres Reichtums an Erzen wirtschaftlich interessant werden. Chancen für eine nachhaltige Energieversorgung können sich auch durch Geothermie in Vulkanregionen bieten.

Wir blicken zudem über den Horizont der Erde hinaus. Auf anderen Himmelskörpern unseres Sonnensystems gibt es ebenfalls Vulkanismus. Dieser kann sogar ganz andere Formen annehmen, als wir es von der Erde kennen. Und wir wollen einen Ausflug in die Unterhaltungsbranche unternehmen und uns Vulkankatastrophenfilmen widmen.

Damit dieses Themenspezial zu Stande kommen konnte, haben viele Expertinnen und Experten innerhalb und außerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft Zeit und Mühe geopfert – und auch viel Geduld, um die Rückfragen und Vorschläge der Redaktion zu beantworten und zu bearbeiten. Dafür möchten wir allen Beteiligten ausdrücklich danken. Die Arbeit für die Zwecke der Wissenschaftskommunikation ist (bislang) nicht selbstverständlich. Umso mehr wissen wir, dieses Engagement zu schätzen. Rückfragen und Anregungen nehmen wir gerne entgegen.

Im Einzelnen bedanken wir uns für ihre Unterstützung beim Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), beim Forschungszentrum Jülich (FZJ), beim GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, beim Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) sowie beim Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG). Unser Dank gilt außerdem der Vereinigung Cockpit,

dem Institut für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF), der Fakultät für Civielle Techniken Geowissenschaften (CiTG) an der Technischen Universität Delft/Niederlande, dem Department für Geo- und Umweltwissenschaften an der Ludwig-Maximilians-Universität München, der Astro- und Feinwerktechnik GmbH in Berlin-Adlershof sowie dem Institut für Geologische Wissenschaften an der Freien Universität Berlin.

Die Autorinnen und Autoren haben jeweils ihren eigenen Umgang mit dem Gender-Mainstreaming. Dies haben wir belassen, um der Vielfalt der Sprachnutzung gerecht zu werden. Sollte gelegentlich eine eingeschlechtliche Form verwendet werden, sind das andere Geschlecht sowie nicht-binäre Geschlechteridentitäten jeweils mitgemeint.

Wir wünschen Ihnen viel Vergnügen und spannende Einsichten.

Ihre ESKP-Redaktion im Juli 2020.

Die **Earth System Knowledge Platform** ([www.eskp.de](http://www.eskp.de)) ist die Wissensplattform des Forschungsbereichs Erde und Umwelt der Helmholtz-Gemeinschaft. Getragen wird ESKP vom **Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung** (AWI), dem **Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt** (DLR), dem **Forschungszentrum Jülich** (FZJ), dem **GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel**, dem **Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum** (GFZ), dem **Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung** (HZG), dem **Karlsruher Institut für Technologie**

(KIT) sowie dem **Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ**.

Das Themenspezial-Format der Wissensplattform ESKP bietet online übergreifende Syntheseperspektiven jeweils zu einem Forschungsthema ([themenspezial.eskp.de](http://themenspezial.eskp.de)). Bereits erschienen sind die Ausgaben „**Rohstoffe in der Tiefsee**“, „**Metropolen unter Druck**“, „**Plastik in Gewässern**“ sowie „**Biodiversität im Meer und an Land**“. Sämtliche Beiträge der neuen Themenspezial-Ausgabe „**Vulkanismus und Gesellschaft**“ sind in der vorliegenden Publikation zusammengefasst.



# 1. Vulkanische Phänomene

## Einleitung

Wenn Menschen an Vulkane denken, entsteht meist ein ganz einfaches Bild. Ein Berg, der aussieht wie ein Kegel und der Feuer spuckt. In Wirklichkeit gibt es viele verschiedene Arten von Vulkanen mit unterschiedlichstem Aussehen. Und bei denen die Lava auf völlig verschiedene Weise ausgestoßen wird, manchmal langsam fließend und manchmal hochexplosiv. Es gibt Lavaseen, vulkanische Seen und monogenetische Felder. Dabei handelt es sich um großräumige Vulkanfelder, auf denen sogar Großstädte wie Auckland oder Mexiko-Stadt errichtet wurden. Die Gefährlichkeit von Vulkanen erforschen, das Risiko von vulkanischen Aktivitäten bewerten, Vulkane besser verstehen – das sind die Aufgaben, vor denen Vulkanforscher\*innen weltweit stehen.

Zu Beginn des Themenspezials wollen wir einen Eindruck von der Vielfalt und Komplexität vulkanischer Phänomene vermitteln.

## Themen-Überblick

---

- ▶ Wie lassen sich Vulkane unterscheiden?
- ▶ Seltenes Naturphänomen: Lavaseen
- ▶ Vulkanische Seen: Blaue Fenster in die Tiefen eines Vulkans
- ▶ Monogenetischer Vulkanismus und Großstädte
- ▶ Vulkane im Labor: Was man durch experimentelle Vulkanausbrüche lernen kann

## Wie lassen sich Vulkane unterscheiden?

ESKP-Redaktion (Earth System Knowledge Platform | ESKP)

Fachliche Prüfung: Dr. Karen Strehlow (GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

**Für die Erforschung und die Bewertung des Gefährdungspotenzials von Vulkanen muss man ihre Eigenschaften kennen. Wissenschaftliche Kriterien helfen, Vulkane voneinander zu unterscheiden und differenziert zu beschreiben.**

- 
- Zunächst einmal lassen sich Vulkane anhand ihrer plattentektonischen Lage unterscheiden.
  - Daraus ergibt sich gewisse Tendenz zu bestimmten Vulkan- und Eruptionstypen.
  - Je nach Standort können die geologische Beschaffenheit eines Vulkans und das Gefährdungspotential, das von ihm ausgeht, völlig unterschiedlich sein.
  - Aktive Vulkane können jederzeit ausbrechen und müssen daher genau beobachtet werden.
- 

Zunächst einmal lassen sich Vulkane anhand ihrer plattentektonischen Lage unterscheiden. Hier können wir drei große Kategorien beschreiben:

**1. Divergente Plattengrenzen:** Wo tektonische Platten auseinanderdriften, steigt heißes Material aus dem Erdmantel nach oben. Dies begründet den produktivsten Vulkanismus auf unserem Planeten und formt z.B. die Mittelozeanischen Rücken, regelrechte Gebirge am Grund des Ozeans.

**2. Subduktionszonen:** Wenn eine kontinentale und eine ozeanische Platte aufeinander treffen, schiebt sich die schwerere ozeanische Platte unter die kontinentale Kruste. Im Falle der Konvergenz zweier ozeanischer Platten, schiebt sich die ältere unter die jüngere Platte. Die schwerere Platte taucht hierbei in größere Tiefen ab, und die dort vorherrschende Hitze führt zu Aufschmelzung. Die Schmelze steigt auf und es bilden sich lange Vulkanketten entlang der Subduktionszonen, wie zum Beispiel rund um den Pazifik.

**3. Hot Spots:** Unabhängig von Plattengrenzen existieren im Erdmantel ungewöhnlich heiße Stellen. Mantelmaterial steigt von der Kern-Mantelgrenze aus nach oben auf und brennt sich regelrecht durch die darüber liegende Platte. Eines der bekanntesten Beispiele für diese Art von Vulkanismus ist Hawaii.

Weitere Information über den Zusammenhang von Plattentektonik und Vulkanismus finden sich auf der *Earth System Knowledge Platform* in dem Grundlagenartikel über „Plattentektonik und Vulkanismus“.

Zwischen den Kategorien gibt es systematische Unterschiede bezüglich Magmenzusammensetzung, Eruptionshäufigkeit und anderer wichtiger Parameter. So ergibt sich auch eine gewisse Tendenz zu bestimmten Vulkan- und Eruptionstypen abhängig von der plattentektonischen Situation.

Schon aus den unterschiedlichen plattentektonischen Lagen ergibt sich also, dass Vulkane keine einheitlichen Gebilde sind. Gerade auch ihr Gefährdungspotential für Menschen und Umwelt hängt von weiteren wichtigen Faktoren ab. Für das Verständnis von Vulkanen ist es daher sinnvoll, auch ihre verschiedenen Beschaffenheiten zu analysieren und sie nach verschiedenen Kriterien zu unterteilen. Einige dieser Unterscheidungsmerkmale für Vulkane auf unserem Planeten sollen im Folgenden vorgestellt werden.

**1. Standort:** Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist der Standort eines Vulkans. Handelt es sich um einen Vulkan, der sich als submariner Vulkan am Meeresboden befindet? Oder liegt er

als subglazialer Vulkan unter einer dicken Eisschicht verborgen? Handelt sich um einen Vulkan an Land (subaerische Vulkane)?

Je nach Standort kann die geologische Beschaffenheit eines Vulkans und das Gefährdungspotential, das von ihm ausgeht, völlig unterschiedlich sein. Die Spannweite ist groß. Sie reicht vom Tsunami bei einem Vulkanausbruch im Meer bis hin zu vulkanischen Bomben, bei denen große Stücke pyroklastischen Materials aus dem Vulkan geschleudert werden.

Neben Vulkanen auf der Erde werden auch Vulkane auf anderen Planeten erforscht, sogenannte extraterrestrische Vulkane. So befindet sich auf dem Mars mit dem Olympus Mons sogar der größte Vulkan unseres Sonnensystems.

**2. Aktivität:** Vulkane lassen sich auch nach dem Grad der Aktivität unterscheiden. Handelt es sich um einen grundsätzlich aktiven oder gerade ausbrechenden Vulkan? Oder handelt es sich um einen nicht-aktiven oder um einen bereits vollständig erloschenen Vulkan?

Aktive Vulkane zeichnen sich durch eine nach wie vor rege Magma-Aktivität im Untergrund aus, auch wenn der letzte Ausbruch schon viele tausend Jahre zurückliegt. Sie können aber jederzeit ausbrechen und müssen daher genau beobachtet werden. Vor allem dann, wenn sie in der Nähe großer Städte liegen wie der Vesuv in Italien oder der Popocatepetl nahe der Metropole Mexiko-Stadt.

Ein ausbrechender Vulkan hat den Status des aktiven Vulkans überschritten und zeichnet sich durch regelmäßige Vulkaneruptionen aus wie der Ätna auf Sizilien. Ein nicht-aktiver Vulkan zeigt zwar momentan keine Aktivitäten und ruht. Er könnte aber jederzeit wieder zum Leben erwachen, weil sich unter ihm eine noch aktive Magmakammer befindet. Ein erloschener Vulkan hingegen hat seit mindestens 10.000 Jahren keine Aktivität mehr gezeigt. Die Beschaffenheit des Untergrunds lässt einen Ausbruch in naher Zukunft nicht mehr erwarten.

**3. Magmazufuhr:** Ein drittes wichtiges Unterscheidungsmerkmal für Vulkane ist die Art der Magmazufuhr. Hat der Vulkan einen zentralen Förderschlot, an dem das Magma aufsteigt, handelt es sich um einen sogenannten Zentralvulkan. Aktive Zentralvulkane sind zum Beispiel der Bárðarbunga auf Island oder auch der Ätna.

Das Magma kann aber auch aus einer oder mehreren Spalten am Bergrücken in Form einer Spalteneruption an die Erdoberfläche treten. Das heißt, sie kommt nicht unmittelbar aus einem Förderschlot. Aufgrund des Austritts des Magmas an Spalten wird ein solcher Vulkan Spaltenvulkan genannt. Spaltenvulkane treten häufig im Meer entlang der Mittelozeanischen Rücken auf, an Land sind sie eher selten zu finden. Ein bekanntes Beispiel für einen Spaltenvulkan an Land ist der Laki-Krater auf Island.

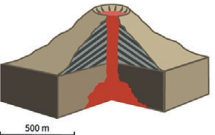
**4. Gliederung nach der äußeren Form:** Vulkane können unterschiedliche Formen besitzen. Sie können zum Beispiel eher kuppelförmig, schildförmig oder trichterförmig sein. Die Charakterisierung der Vulkane nach ihrer äußeren Form haben wir nachfolgend in Form einer Infografik und Bildgalerie dargestellt. Sie veranschaulicht die verschiedenen Eigenschaften von Aschekegeln, Stratovulkanen, Schildvulkanen, Calderen und Maaren. Eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Hauptformen von Vulkanen findet sich auch im ESKP-Grundlagenartikel „Vulkantypen“.

**5. Eruptionstypen:** Bei den in der Grafik aufgeführten Vulkanen handelt es sich – bis auf den Spaltenvulkan – um verschiedene Arten von Zentralvulkanen. Sie lassen sich in nahezu allen Regionen der Erde an Land finden. Die Grafik zeigt zudem die verschiedenen Eruptionstypen, die mit diesen Vulkanen verbunden sind. Das heißt, welche Arten von Ausbrüchen sich diesen Vulkanformen zuordnen lassen.

Die Unterteilung nach verschiedenen Eruptionstypen ist ebenfalls eine wichtige Möglichkeit, Vulkane zu unterscheiden. Dabei geht es um die Frage, auf welche Art und Weise der Vulkanaus-

### Vulkantypen

#### Asche- und Schlackenkegel



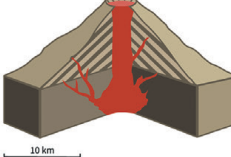
**GELÄNDEFORM**  
▲ kegelförmig

**TYPISCHE ERUPTIONSFORMEN**  
● zähflüssige Lava  
☄ explosiver Ausbruch

500 m

BEISPIELE: Paricutin Mexiko | häufigste Vulkanform der Erde | auch an Hängen anderer Vulkanformen z. B. an den Flanken des Ätna, Italien

#### Strato- oder Schichtvulkan




**GELÄNDEFORM**  
▲ kegelförmig  
▲ steile Hänge

**TYPISCHE ERUPTIONSFORMEN**  
● zähflüssige Lava  
☄ explosiver Ausbruch

10 km

BEISPIELE: Fujiyama Japan | Ätna Italien | Mount St. Helens USA

#### Schildvulkan



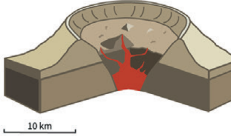
**GELÄNDEFORM**  
▲ schildförmig  
▲ flache Hänge

**TYPISCHE ERUPTIONSFORMEN**  
● dünnflüssige Lava  
☄ Lavafontänen  
☄ lange Eruptionen

10 km

BEISPIELE: Mauna Loa Hawaii, USA

#### Caldera



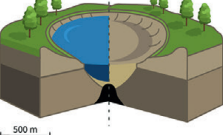
**GELÄNDEFORM**  
▲ trichterförmig

**TYPISCHE ERUPTIONSFORMEN**  
● zähflüssige Lava  
☄ explosiver Ausbruch  
☄ Krater-Einsturz

10 km

BEISPIELE: Yellowstone USA | Pinatubo Philippinen | Campi Flegrei Italien

#### Maar | Tuffring



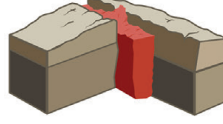
**GELÄNDEFORM**  
▲ wannen- oder trichterförmig

**TYPISCHE ERUPTIONSFORMEN**  
☄ phreatomagmatische Explosion durch Kontakt mit Wasser

500 m

BEISPIELE: Eifel Deutschland

#### Spalte



**GELÄNDEFORM**  
▲ Spalte  
▲ flache Hänge

**TYPISCHE ERUPTIONSFORMEN**  
● dünnflüssige Lava  
☄ Lavafontänen

BEISPIELE: Laki Grimsvötn, Island | Tarawera Neuseeland | tritt auch an Hängen anderer Vulkanformen auf

Vereinfachte Darstellung, nicht maßstabsgerecht

fachliche Beratung: Karen Strehlow, Geomar | Grafik: eskp.de/CC BY 4.0

**Vereinfachte Darstellung der sechs Haupt-Vulkantypen:** Die Vulkanform ist von vielen Faktoren abhängig, wie der geotektonischen Lage, der Eruptionsform, der Zusammensetzung des Magmas, der Magma-Produktionsrate und den Umweltbedingungen.

Fachliche Beratung: Karen Strehlow, GEOMAR;  
Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de, CC BY 4.0

bruch stattfindet. Ist er zum Beispiel eher langsam ausfließend (effusiv) oder kommt es zu einer plötzlichen Explosion? Nützliche Hintergrundinformationen zu Strombolianischen Eruptionen, Plinianischen oder Hawaiianischen Eruptionen finden sich im ESKP-Grundlagenartikel „Vulkane: Eruptionstypen“.

Wie eingangs beschrieben gibt die plattentektonische Lage bereits erste Hinweise auf die Art von zu erwartendem Vulkanismus. Die explosivsten Vulkane, meist in der Form von Strato-vulkanen, beispielsweise findet man im Allgemeinen an Subduktionszonen, während Schildvulkane mit hohen Lavaproduktionsraten typisch für Hot Spots sind.

## Referenzen

- Plattentektonik und Vulkanismus. (o.D.). [Grundlagenartikel]. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de/grundlagen]. Aufgerufen am 10.11.2020.
- Vulkantypen. (o.D.). [Grundlagenartikel]. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de/grundlagen]. Abgerufen am 03.03.2020.
- Vulkane: Eruptionstypen. (o.D.). [Grundlagenartikel]. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de/grundlagen]. Abgerufen am 03.03.2020.

## Seltenes Naturphänomen: Lavaseen

Jana Kandarr (Earth System Knowledge Platform | ESKP)

Fachliche Prüfung: Dr. Karen Strehlow (GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

**Lavaseen sind eine absolute Seltenheit auf der Erde. An nur sieben Orten der Welt treten diese eindrucksvollen Naturphänomene aktuell in Erscheinung.**

- Lavaseen bilden sich stets über aktiven Vulkanschloten.
- Ein Lavasee ist ständig in Bewegung. In der Regel kann in ihm ein horizontales Fließen wahrgenommen werden.
- In stabilen, aktiven Lavaseen müssen in unterirdischen Systemen Mechanismen existieren, die zu einer permanenten Gasanreicherung führen.

Lavaseen sind eine absolute Seltenheit auf der Erde. Wie die Bezeichnung vermuten lässt, enthalten sie kein Wasser, sondern ausschließlich Lava. Lavaseen bilden sich stets über aktiven Vulkanschloten. An nur sieben Orten der Welt treten diese eindrucksvollen Naturphänomene aktuell in Erscheinung. So finden sich Lavaseen am Nyiragongo in der Demokratischen Republik Kongo, am Schildvulkan Erta 'Ale in Äthiopien, am Mount Erebus in der Antarktis, an den beiden Vulkankegeln Marum und Benbow des Ambrym im Inselstaat Vanuatu, am Kīlauea auf Hawaii, am Villarica-Vulkan in Chile sowie am Masaya-Vulkan in Nicaragua (Lev et al., 2019).

Lavaseen bieten die seltene Möglichkeit, Prozesse zu beobachten, die sonst im Verborgenen ablaufen: das Aufsteigen, d. h. die Konvektion von Magma aus dem Erdmantel wie auch die Dynamik der Gasfreisetzung im Magma selbst. Auftrieb, Aufwölbungen und Lavabewegungen – auch horizontal – sind typische Erscheinungen in einem Lavasee.

Die Stabilität von Lavaseen ist nach bisherigem Kenntnisstand unter anderem von der Geometrie der Vulkanschlote, der Gaslöslichkeit und -ausdehnung sowie der Menge an entweichendem Magma abhängig (Witham und Llewelin, 2006).

Ein Lavasee ist ständig in Bewegung. In der Regel kann in ihm ein horizontales Fließen wahrgenommen werden. Diese Dynamik an der Oberfläche eines Lavasees wird vermutlich durch zwei Prozesse gesteuert: zum einen durch den Auftrieb von Magma im Vulkanschlot, bei dem eine Lavakruste durch Abkühlung an der Oberfläche entsteht, welche sich dann radial ausbreitet, um die Ankunft von neuem Magma aus der Tiefe zu ermöglichen. Gleichzeitig wird Lava in einen Bereich gezogen, in dem unentwegt Gasblasen aufbrechen; allmählich wird das Magma auch geringfügig schwerer und kühler. Dort sieht man dann den Abtrieb, was heißt, dass Lava wieder zum Grund des Sees oder Schlotens gelangt, wo sie wieder erhitzt wird. Vertikal aufsteigende und fallende Strömungen von flüssigem Magma passen sich so horizontal an. Diese Bewegung wird als Fließen wahrgenommen.

Die Fließmuster eines Lavasees sind quasi auf kleinstem Raum das, was die Plattentektonik im Großen auf unserer Erde ist: Lava steigt entlang der Mittelozeanischen Rücken auf. Dadurch entsteht in allen Ozeanen neuer Meeresboden. Dort, wo Lava abkühlt und absinkt, haben wir Subduktionszonen auf der Erde. Ein Lavasee enthält dieses System quasi im Kleinen.

Instabil ist ein Lavasee vermutlich immer dann, wenn das Verhältnis der Querschnittsflächen von Schlot und See klein ist und der Schlot eine sprudelnde Magmaschicht enthält. Das führt zu kleinen Schwankungen und/oder zu verstärkten Druckabfällen im Reservoir.

### Lavaseen – ein kleiner Überblick

Wie eingangs erwähnt, lassen sich die momentan aktiven Lavaseen auf der Welt an zwei Händen abzählen. Im Folgenden soll deshalb jeder einzelne Lavasee kurz vorgestellt werden.

#### Masaya, Nicaragua

Der Masaya-Vulkan befindet sich auf dem Zentralamerikanischen Bogen, wo die Cocos-Platte mit einer Geschwindigkeit von 77 Millimeter pro Jahr unter die Karibische Platte untertaucht (subduziert wird). Gleichzeitig findet sich in unmittelbarer Nähe (25 km) die Hauptstadt Nicaraguas. Der Masaya-Vulkan enthält im sogenannten Santiago-Krater einen Lavasee. Seit der Lavasee im Dezember 2015 erneut auftauchte, ist er ununterbrochen aktiv geblieben. Der Lavasee setzt, wie andere Seen bzw. aktive Vulkane auch, Schwefeldioxid frei. Der durchschnittliche Schwefeldioxidfluss des Masaya-Vulkans seit 1996 beträgt rund 1.000 Tonnen pro Tag, was ca. 1,3 bis 2,8 Prozent der globalen vulkanischen SO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht. Betrachtet man allein die zentralamerikanischen Vulkane, so machen die Schwefeldioxidemissionen dieses einen Vulkans schon knapp ein Viertel der insgesamt emittierten Menge in der Region aus (Lev et al., 2019; Moor et al., 2013).

#### Marum, Vanuatu

Die 678 km<sup>2</sup> große Insel Ambrym gehört zum pazifischen Inselstaat Vanuatu und Ambrym ist in ihrer Gesamtheit ein Schildvulkan. Der Marum/Mbwelesu-Krater der Insel misst ganze 13 Kilometer im Durchmesser. Die große Caldera hat sich vermutlich vor etwa 2.000 Jahren nach einem plinianischen Ausbruch des Vulkans gebildet. In den letzten Jahrzehnten ist in dem Krater ein Lavasee (Marym) aktiv. Er gibt einen weiteren aktiven Schlot (Benbow). Große Ausbrüche waren auch mit Lavaströmen über den Caldera-

Rand hinaus und lokaler Zerstörung verbunden, insbesondere in den Jahren 1820, 1894, 1913 und 1929. Auch in den letzten 50 Jahren wurde über Ausbrüche über die Caldera-Rand hinaus berichtet. Die Aktivität des Ambrym wird von einer enormen Menge an vulkanischen Gasemissionen begleitet. Der Vulkan gehört zu den drei stärksten Emittenten von vulkanischen Gasen auf der Erde (Global Volcanism Program, Bani et al., 2012, Allard et al., 2016).

#### Halema'uma'u, Hawaii

Vier überlappende Vulkane – Mauna Kea, Kīlauea, Mauna Loa, Hualālai – bilden die Insel „Island of Hawaii“. Vor 600.000 Jahren begann hier der Schildvulkan Kīlauea vom Meeresboden empor zu wachsen. Vor nur 500 Jahren kollabierte der Gipfel des Schildvulkans und bildete eine Caldera. Heute beherbergt diese Caldera den Lavasee Halema'uma'u. Ein anderer kleiner Lavasee (Pu'u ,O'o) ist verschwunden. Er kollabierte in den Jahren 2011 und 2018. Im Zeitraffer zeigt ein Video des United States Geological Survey den beeindruckenden Kollaps des Pu'u ,O'o am 5. März 2011. Schon drei Wochen später tauchte wieder Lava im Krater auf und es bildete sich schnell ein hochgelegener Lavasee. Am 30. April 2018 brachen Kraterboden und der Lavasee Pu'u ,O'o wieder ein, verbunden mit einer riesigen Eruption an den Flanken des Vulkans. Dann endete die Aktivität ganz. Ein instabiler Lavasee kann plötzlich und auch ohne Änderung des Magma-Reservoirdrucks abfließen.

#### Erta ,Ale, Äthiopien

Der Vulkan Erta ,Ale in Äthiopien ist seit mindestens einem Jahrhundert permanent aktiv. Erta ,Ale ist ein basaltischer Schildvulkan, der mitten im Erta ,Ale-Gebirge liegt. In der Region dehnt sich die Erdkruste aus, was durch die etwas flachere Topographie des Vulkangebietes deutlich wird. Die Gipfelcaldera des Vulkans Erta ,Ale (1.600 × 700 m) beherbergt zwei Grubenkrater. In jüngster Zeit war der Lavasee innerhalb des zentralen Kraters mit einem Durchmesser von ~150 Metern am häufigsten aktiv, während in der nördlichen Grube vulkanische Gase austreten, es zu sogenannter fumarolischer Aktivität kommt (Global Volcanism Program, Oppenheimer et al., 2004).



Abb. 1: Nyiragongo-Lavasee. Foto: Cai Tjeenk Willink (Caitjeenk), Wikimedia ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lava\\_Lake\\_Nyiragongo\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lava_Lake_Nyiragongo_2.jpg)), CC BY-SA 3.0

### Nyiragongo, Demokratische Republik Kongo

Der Mount Nyiragongo befindet sich im westlichen Teil des Ostafrikanischen Grabensystems. Er gilt als der aktivste Vulkan Afrikas. Es handelt sich um einen steilen Stratovulkan, der 3.469 m über den Meeresspiegel emporragt und sich auf dem Gebiet der Demokratischen Republik Kongo befindet. Der Vulkankrater beherbergt den größten permanent aktiven Lavasee der Welt. Er besteht mindestens seit dem Jahr 1971. In den letzten vier Jahrzehnten ist der Lavasee zweimal – im Jahre 1977 und auch 2002 – katastrophal über die Südflanke des Vulkans ausgelaufen (Tedesco et al., 2007, Valade et al., 2018).

### Nyiragongo, Demokratische Republik Kongo

Eine Eruption im Jahre 2002 setzte voluminöse Lavaströme frei, die durch die zwei Millionen Einwohner zählende kongolesische Stadt Goma zum Kivu-See flossen. Die Lava verwüstete etwa 15 Prozent der Stadt, einschließlich eines Teils des internationalen Flughafens. Mehr als 100 Menschen kamen durch die Lava ums Leben und insgesamt wurden mindestens 250.000 Einwohner vertrieben (Tedesco et al., 2007). Es gibt immer wieder Zyklen mit starken Lavafontänen, hinzu kommt eine kontinuierliche Freisetzung großer Gasfahnen, die vorwiegend aus Wasserdampf, Kohlen- und Schwefeldioxid bestehen (Sawyer et al., 2008). Ausbrüche des Lavasees ähnlich dem von 2002 würden eine erhebliche Bedrohung für die Gesundheit und die soziale Stabilität dieser fragilen Gegend darstellen (Valade et al., 2018).

### Mount Erebus auf Ross Island, Antarktis

Der Mount Erebus in der Antarktis ist ein 3.794 Meter hoher Stratovulkan und der südlichste aktive Vulkan der Welt. Mount Erebus beherbergt einen stark konvektiven Lavasee, der permanent Gas freisetzt. Der Lavasee wurde erstmals 1972 von einer wissenschaftlichen Gruppe direkt beobachtet. Er ist außergewöhnlich, weil er einen direkten Blick in eine aktive Magmakammer der oberen Ebene bietet. Häufige strombolianische Ausbrüche, d. h. bis zu ~6 pro Tag, aus dem See sind ein charakteristisches Merkmal des Erebus-Vulkans. Zu Ausbrüchen kommt es, wenn eine große Gasblase schnell aus der Tiefe aufsteigt und an der Oberfläche des Lavasees platzt (Kelly et al., 2008).

### Villarica, Chile

Villarica ist ein Stratovulkan mit einem offenen Schlotssystem. Der Gipfelkrater dieses Vulkans beherbergt einen 30–40 Meter breiten Lavasee, der – je nach Aktivität des Vulkans – zwischen 100 und 150 m unterhalb des Gipfels liegt (Ortiz et al., 2003). Dieser Lavasee entgast seit dem Ende des Ausbruchs von 1985 beständig und weist eine leichte strombolianische Aktivität auf, wenn die seismische Aktivität im Vulkan zunimmt (Stock et al., 2019). Immer wieder gibt es Lavafontänen.

## Referenzen

- Allard, P., Burton, M., Sawyer, G. & Bani, P. (2016). Degassing dynamics of basaltic lava lake at a top-ranking volatile emitter: Ambrym volcano, Vanuatu arc. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 448, 69-80. doi:10.1016/j.epsl.2016.05.014
- Bani, P., Oppenheimer, C., Tsanev, V. I., Carn, A. A., Cronin, S. J., Crimp, R., Calkins, J. A., Charley, D., Lardy, M. & Roberts, T. R. (2009). Surge in sulphur and halogen degassing from Ambrym volcano, Vanuatu. *Bulletin of Volcanology*, 71:1159. doi:10.1007/s00445-009-0293-7
- Kelly, P. J., Kyle, P. R., Dunbar, N. W. & Sims, K. W. W. (2008). Geochemistry and mineralogy of the phonolite lava lake, Erebus volcano, Antarctica: 1972–2004 and comparison with older lavas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(3), 589-605. doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.11.025
- Lev, E., Ruprecht, P., Oppenheimer, C., Peters, N., Patrick, M., Hernández, P. A., Spampinato, L. & Marlow, J. (2019). A global synthesis of lava lake dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 381, 16-31. doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.04.010
- Moor, J. M., Fischer, T. P., Sharp, Z. D., King, P. L., Wilke, M., Botcharnikov, R. E., ... Kelley, K. A. (2013). Sulfur degassing at Erta Ale (Ethiopia) and Masaya (Nicaragua) volcanoes: Implications for degassing processes and oxygen fugacities of basaltic systems. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(10), 4076-4108. doi:10.1002/ggge.20255
- Oppenheimer, C., McGonigle, A. J. S., Allard, P., Wooster, M. J. & Tsanev V. (2004). Sulfur, heat, and magma budget of Erta 'Ale lava lake, Ethiopia. *Geology*, 32(6), 509-512. doi:10.1130/G20281.1
- Ortiz, R., Moreno, H., García, A., Fuentealba, G., Astiz, M., Peña, P., Sánchez, N. & Tarraga, M. (2003). Villarrica volcano (Chile): characteristics of the volcanic tremor and forecasting of small explosions by means of a material failure method. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 128 (1-3), 247–259. doi:10.1016/S0377-0273(03)00258-0
- Pering, T. D., Ilanko, T., Wilkes, T. C., England, R. A., Silcock, S. R., Stanger, L. R., Willmott, J. R., Bryant, R. G. & McGonigle, A. J. S. (2019). A Rapidly Convecting Lava Lake at Masaya Volcano, Nicaragua. *Frontier Earth Science*, 6:241. doi:10.3389/feart.2018.00241
- Radebaugh, J., Lopes, R. M., Howell, R. R., Lorenz, R. D. D. & Turtl, E. P. (2015). Eruptive behavior of the Marum/Mbwelesu lava lake, Vanuatu and comparisons with lava lakes on Earth and Io. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 322, 105-118. doi:10.1016/j.jvolgeores.2016.03.019
- Sawyer, G. M., Carn, S. A., Tsanev, V. I., Oppenheimer, C. & Burton, M. (2008). Investigation into magma degassing at Nyiragongo volcano, Democratic Republic of the Congo. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, 1-17. doi:10.1029/2007GC001829
- Smithsonian Institution – National Museum of Natural History. Global Volcanism Program. (o.D.) [Webseite, volcano.si.edu]. Aufgerufen am 7.6.2020.
- Stock, C. N. M. (2019). *Seismic Structure and Seismicity of the Villarrica Volcano* (Southern Central Chile) (Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Kiel). Verfügbar unter <https://macau.uni-kiel.de>
- Tedesco, D., Vaselli, O., Papale, P., Carn, S. A., Voltaggio, M., Sawyer, G. M., Durieux, J., Kasereka, M. & Tassi, F. (2007). January 2002 volcano-tectonic eruption of Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B9), 1-12, doi:10.1029/2006JB004762
- Valade, S., Ripepe, M., Giuffrid, G., Karum, K. & Tedescod, D. (2018). Dynamics of Mount Nyiragongo lava lake inferred from thermal imaging and infrasound array. *Earth and Planetary Science Letters*, 500, 192-204. doi:10.1016/j.epsl.2018.08.004
- Witham, F., & Llewellyn, E.W. (2006). Stability of Lava Lakes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(3-4), 321-332. doi:10.1016/j.jvolgeores.2006.07.004

## Vulkanische Seen: Blaue Fenster in die Tiefen eines Vulkans

Jana Kandarr (Earth System Knowledge Platform | ESKP)

Fachliche Prüfung: Prof. Dr. Dmitri Rouwet (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

**Vulkanische Seen sind Spiegel des Vulkanismus, der sie einst entstehen ließ und vielleicht noch heute fortwährend verändert. Organismen, die mit den teils extremen Bedingungen klar kommen, könnten auch in anderen Kontexten wie der Landwirtschaft oder im Bio-Mining wertvoll werden. Für Gefahren, die von Vulkanen ausgehen, können insbesondere die Ausgasungen von sehr aktiven vulkanischen Seen ein frühes Warnsystem sein.**

- 
- Von allen bekannten Oberflächengewässern auf der Erde zeigen vulkanische Seen die größte Bandbreite an pH-Werten.
  - Kraterseen und kohlendioxidreiche Seen bedürfen besonders genauer Überwachung hinsichtlich ihrer Gefahren.
  - Für die Überwachung von Vulkanen können Farbveränderungen in den vulkanischen Seen sowie das Vorhandensein und die Morphologie von Schwefelkügelchen ein einfaches Hilfsmittel sein.
  - Es gibt die Hoffnung, dass einige Bakterien aus vulkanischen Seen das Pflanzenwachstum unter extremem abiotischen Stress fördern können. Unter Umständen sind diese Bakterien von Nutzen für Pflanzen, die anderswo auf sauren, Schwermetall-belasteten Böden gedeihen oder großen Hitzestress aushalten müssen.
- 

Vulkanische Seen mit ihren teils unnatürlich anmutenden Wasserfarben und kontrastreichen mineralischen Ablagerungen faszinieren. Einige von ihnen sind ungewöhnlich tief oder aber ihr Wasser ist extrem sauer und praktisch ohne Leben, in manchen wiederum vermehren sich Cyanobakterien oder Algen zügellos – je nachdem wie eng die Verbindung zwischen dem vulkanischen System und dem Untergrund noch ist. Solche Seen können einen Einblick in hydrothermale Systeme gewähren und somit bei der Überwachung von Vulkanen und der Gefahrenvorhersage von großem Wert sein. Sie können – teils längst verebbte – vulkanische Aktivität bezeugen. Einige von ihnen sind hinsichtlich ihrer Wasserchemie oder -biologie kaum noch von einem herkömmlichen Gewässer zu unterscheiden. Besteht jedoch noch eine Verbindung zu

Magmakammern in der Erdkruste, dann sind sie praktisch nie stabile Systeme.

Vulkanische Seen können wieder verschwinden, abfließen, ihre Wassertemperaturen und chemische Zusammensetzung können großen Schwankungen unterliegen und der pH-Wert kann zum Teil deutlich variieren. Grundsätzlich müssen einige Dinge zusammenkommen, damit ein aktiver vulkanischer See entsteht: der Seeboden muss so abgedichtet sein, dass Wasser nicht direkt versickert, der meteorologische Niederschlag muss möglichst reichlich und der Wärmeinput nur begrenzt sein, damit das Seewasser nicht völlig verdunstet. Vulkanischen Fluide tragen dann zum Volumen des Sees bei.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten vulkanische Seen zu klassifizieren – nach chemischen oder physikalischen Merkmalen oder auch hinsichtlich ihrer Genese. Sie sind in der Monographie „Volcanic Lakes“ (Rouwet et al., 2015) ausführlich zusammengestellt. Wissenschaftler\*innen orientieren sich an vier Leitfragen, welche die Entstehung der Seen betreffen. Zum einen ist demnach die Kenntnis essentiell, ob ein See bei einem einzigen Ausbruch entstanden, also z. B. monogenetisch ist. Das hieße, dass unter Umständen seit dem Ereignis der Einfluss des Vulkanismus auf das Seewasser nur noch gering oder gar inexistent ist. Entsteht hingegen ein Seebecken auf einem polygenetischen Vulkan, so können viele verschiedene Ereignisse sowie Magmaquellen zu seiner Entstehung beigetragen haben oder weiterhin beitragen.

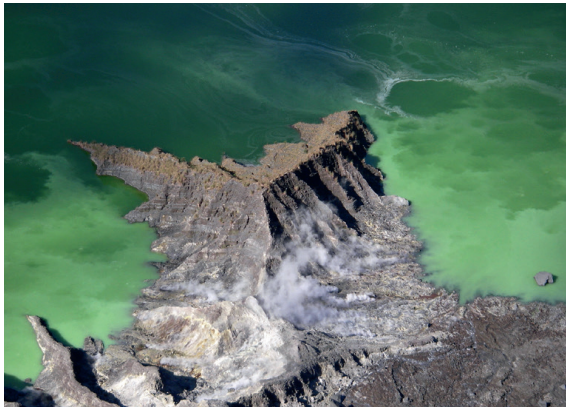
Ein weiteres Kriterium beleuchtet den zeitlichen Zusammenhang zwischen Vulkanismus und Herausbildung des Sees, sprich die Frage: entstand der See kurz oder eher lange nach einem Vulkanausbruch? Caldera-Seen sind vermutlich meist lange nach dem Kollaps einer Magmakammer und der daraus entstandenen Senke (geolog.: „Depression“), die dann zum Seebecken wird, entstanden. Seen in Gipfelkratern aktiver Vulkane entstehen hingegen „kurz“ nach einem Vulkanausbruch. Auch kommt es auf den Standort des vulkanischen Sees im Verhältnis zum Vulkanschlot an. Liegt der See unmittelbar über einem aktiven Schlot oder neben diesem? All diese Aspekte bestimmen letztendlich, wie stark sich Vulkanismus, Wasserchemie und Wassertemperatur gegenseitig beeinflussen (Christenson et al., 2015). Dieses generische Klassifizierungssystem hilft, eine Verbindung zu den klassischeren Ansätzen der chemischen und physikalischen Klassifizierungen von Vulkanseen herzustellen.

Nach solchen Klassifikationen umfasst eine Kategorie zum Beispiel Kraterseen, die über dem Schlot eines polygenetischen Vulkans entstehen. Kraterseen befinden sich in der Regel im Innern des Vulkangipfelkraters, können sehr tief oder sehr wertvoll im Wasservolumen sein, was

auf Schwankungen der Flüssigkeitskondensation, der Verdunstung an der Oberfläche, der Regenwasserbeiträge von Versickerungen oder Überläufen aus dem See zurückzuführen ist (Varekamp et al., 2015). Eine weitere Kategorie bilden Caldera-Seen, so zum Beispiel der Bolsena-See in Italien, der wie viele Caldera-Seen kaum Zu- oder Abflüsse hat. Man nennt sie in den Geowissenschaften endorheische Becken, da sie keinen Abfluss ins Meer besitzen.

Die allermeisten vulkanischen Seen liegen in Maaren, die auch Maar-Diatreme genannt werden. Maare sind üblicherweise Zeugen eines einzigen phreatomagmatischen Ausbruchs. Was danach übrig bleibt, ist praktisch ein fast perfekt kreisförmiges „Loch“ in der Erde, da eine einzige Eruption nicht in der Lage war, einen großen Vulkankegel zu bilden. Wenn die grundwasserführende Schicht (Aquifer) den Maarkegel schneidet, entsteht ein Maarsee. Diatreme durchbrechen die Erdoberfläche und erzeugen eine steile umgekehrte Kegelform. Manchmal enthalten ihre vergrabenen brekziösen Strukturen Mineralien wie Diamanten. Maarkegel sind typischerweise weniger als zwei Kilometer im Durchmesser. Beispiele für Maare bzw. Maarseen sind der Laacher See, der Ulmener Maar, der Blue Lake in Australien oder auch der Aci Gölü See in der Nähe von Karapınar in der Türkei.

Geothermische Seen befinden sich in einer vulkanisch aktiven Umgebung, in der sich durch phreatische Eruptionen Krater gebildet haben, die im Nachhinein von eher kleinen Seen aufgefüllt wurden. Einige Seen füllen tektonische Senken (Depressionen), die durch Lavafelder oder vulkanische Ablagerungen, die Wasser stauen oder die lokale Hydrologie des Zuflusses oder Abflusses von Wasser beeinflussen, entstanden sind. Acht Prozent der natürlich gestauten Seen weltweit sind auf Vulkanismus zurückzuführen (Costa & Schuster, 1988). Es gibt auch einige Vulkanseen, die entstehen, wenn ein erneut aktiver und damit heißer Vulkanschlot den Schnee im Inneren eines bereits vorhandenen Kraters zum Schmelzen bringt. So geschehen zum Beispiel am Vulkan Chiginagak in Alaska im Jahr 2005.



**Abb. 1: El Chichón, Mexiko** (Aufnahme März 2007)  
Der Kratersee El Chichón ist von mittlerer Temperatur (30 °C) und die atmosphärischen Bedingungen sind tropisch, d. h. die Luftfeuchtigkeit und Umgebungstemperatur sind hoch, was wiederum zu einer praktisch unsichtbaren Entgasung und Verdunstung führt. Foto: Dmitri Rouwet



**Abb. 2: Kawah Ijen, Indonesien** (Aufnahme Sept. 2004)  
Der Kratersee Kawah Ijen ist das größte natürliche, saure Oberflächengewässer der Erde. Das Wasser des Sees ist von einer intensiven türkisfarbenen Farbe und weitgehend ohne Leben. Es wurden bisher keine Bakterien oder Eukaryoten gefunden. Foto: Dmitri Rouwet

Es gibt weitere Arten vulkanische Seen einzuteilen, zum Beispiel nach ihrer Wasserchemie oder Wasserbilanz. Wird vor allem auf die vulkanische Aktivität und Gefahr geschaut, dann bietet sich eine Unterteilung in „aktive Kraterseen“, „ruhende Kraterseen“ und „kohlendioxidreiche Seen“ an. Jedwede Klassifizierung ist eine Herausforderung, denn die Vielfalt ist groß und die geologischen Strukturen am Seeboden mancherorts nicht gut bekannt. Die Seen sind zudem häufig hinsichtlich der vulkanischen Aktivität im Untergrund, ihres Umgebungsgesteins und ihren spezifischen klimatischen Bedingungen einzigartig. Daher hat jeder See seine eigenen Merkmale und sollte einzeln betrachtet werden, wenn wir versuchen, mehr in Erfahrung zu bringen und den Geheimnissen, die vulkanische Seen bergen, auf die Spur zu kommen.

### Was uns Wasserfarben über vulkanische Seen verraten können

Besonders auffällig ist die Vielfalt der Wasserfarben, die vulkanische Seen aufweisen können. Dunkelblau sind häufig solche vulkanischen Seen, die nicht viel Leben bergen, die biologisch unproduktiv sind, weil Nährstoffe fehlen. Ein Beispiel dafür ist der Crater Lake, der im Übrigen ein Caldera-See ist, in Oregon. Mit seiner Tiefe von 589 Metern ist er der tiefste See der USA und

siebtiefste der Welt. Der Crater Lake speist sich ausschließlich aus Niederschlägen, hat kaum Zu- oder Abflüsse und erscheint tiefblau.

Grünlich-blau erscheinen Seen, die aus einer wie auch immer gearteten natürlichen oder anthropogenen Quelle Nährstoffe erhalten. Einerseits spielen dafür das Wassereinzugsgebiet und die Düngung der umliegenden landwirtschaftlichen Flächen eine große Rolle. Andererseits können Geothermalquellen mit mineralstoffreichem Wasser ein weiterer Ursprung für Nährstoffe sein. Eine ungewöhnlich starke Grünfärbung kann ein massenhaftes Auftreten von grünen Algen anzeigen, während ein auffälliges Rot mit der starken Vermehrung von Rotalgen zusammenhängt. Zersetzt sich sehr viel organisches Material, dann erscheint ein See in der Regel bräunlich, denn beim Abbau von Blättern und anderem pflanzlichen oder tierischen Material bilden sich organische Säuren.

Grundsätzlich sind die biologischen Prozesse in vulkanischen Seen nicht großartig anders als in Seen nicht-vulkanischen Ursprungs. Doch aufgrund der Chemie in den aktiven Seen können die Farben abweichen: Seen mit Geothermalquellen oder vulkanischen Nährstoffen (aus dem Gestein) enthalten oft Phosphor, der dann zusätzlich düngt. Der Unterschied liegt in die-



**Abb. 3: Poás, Costa Rica** (Aufnahme April 2007)  
Die Laguna Caliente ist extrem sauer mit einem pH-Wert von ca. -1. Einige saure vulkanische Seen wie auch dieser vulkanische See sind tiefgrau, da die Bodensedimente durch aufsteigende Strömungen aufgewirbelt werden. Der Säuresee ist gesättigt an elementarem Schwefel. In heißen Seen kann sich der flüssige Schwefel am Seeboden ablagern.  
Foto: Dmitri Rouwet



**Abb. 4: Lake Nyos, Kamerun** (Aufnahme März 2016)  
1986 setzte der Nyos-See eine  $\text{CO}_2$ -Wolke in die Atmosphäre frei, die 1.700 Menschen und 3.500 Tiere in den umliegenden Städten und Dörfern tötete. Danach installierten Ingenieure ein Rohrsystem, um das Gas aus dem See abzulassen. Das 200 m lange Rohr hängt am Floß und lässt gasreiches Wasser vom Seeboden kontrolliert an die Oberfläche entweichen.  
Foto: Dmitri Rouwet

sem Fall eher am ungewöhnlichen Ursprung der Nährstoffe. Andererseits können im Wasser Eisen und Schwefel gelöst sein. Je nachdem, welches Eisen enthalten ist, kann der See dann tiefgrün bei zweiwertigem Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) oder violett-bräunlich bzw. orange-rot bei dreiwertigem Eisen ( $\text{Fe}^{3+}$ ) erscheinen. Darüber hinaus können Substanzen, die bestimmte typische Farben aufweisen, ausfallen oder auch im Wasser schweben (z. B. Gipsspat, Schwertmannit, Goethit oder Ferrihydrite). Als der Vouli See, der zum Ambae Vulkan (Vanuatu im Südpazifik) gehört, im Jahre 2006 innerhalb weniger Tage blutrot wurde, hat man das später mit dem Ausfällen von Jarosit, einem Sulfat sowie Hämatit, einem Eisenoxid, in Verbindung bringen können (Bani et al., 2009).

Besonders spektakulär sind die türkis-creme-weiß erscheinenden Seen, wie einer der drei Kraterseen des Vulkans Keli Mutu in Indonesien oder auch der größte saure Kratersee der Welt am Kawah Ijen, der ebenso in Indonesien zu finden ist. Die Laguna Caliente am Poás in Costa Rica oder der Yugama Kratersee am Kusatsu-Shirane Vulkan in Japan sind weitere Beispiele. Fein verteilte Schwefelkugeln (Spherules) schweben hier auf der Wasseroberfläche. Dominieren solche Teilchen völlig, erscheint ein See

sehr blau und wird türkis-grünlicher, wenn die Schwefelteilchen abnehmen und sich mit dem Grünton von Eisen-Ionen mischen. Auch siliziumdioxid-reiche geothermische Pools neigen infolge der Streuung des Lichts an winzigen Kolloiden zu einer ganz spezifischen blauen Farbe (Ohsawa et al., 2010). Beobachtungen von Farbveränderungen oder das Vorhandensein und die Morphologie von Schwefelkugeln können ein einfaches Hilfsmittel zur Überwachung der vulkanischen Aktivität sein. Plötzliche Farbänderungen können zum Beispiel eine Veränderung in der Entgasung von Schwefelgasen widerspiegeln (siehe z. B. Yudamari-See in Japan).

### Ein lebensfeindliches Umfeld

Haben wir es mit einem vulkanischen See zu tun, der nicht mit Ausgasungen von Magmakammern in Verbindung steht, dann unterscheidet sich dieser kaum von nicht-vulkanischen Seen – mal abgesehen davon, dass Zu- und Abflüsse fehlen können. Im Englischen spricht man von „neutral dilute volcanic lakes“. Die Wassertemperaturen sind dann ein Spiegel der Wetterverhältnisse und (soweit vorhanden) der Zuflüsse. Der Chemismus des Wassers hängt vom Umgebungsgestein, den Bächen und Flüssen, die ihn

durchlaufen bzw. in den See entwässern und der Ausfällung von Mineralen ab.

Wenn Seen noch immer in Verbindung mit entgasenden Magmasystemen stehen, verhält es sich anders. Der Zustand des entgasenden Magmas und die Art des Umgebungsgesteins entscheiden dann ganz immens über die Substanzen im Wasser, Wassertemperaturen und den Säuregrad (pH-Wert). Von allen bekannten Oberflächengewässern auf der Erde zeigen vulkanische Seen die größte Bandbreite an pH-Werten. Der pH-Wert des Seewassers kann außerhalb der Skala liegen, die willkürlich zwischen 0 (sauer) und 14 (alkalisch) festgelegt wurde (Pecoraino et al., 2015). So können die säurehaltigsten Seen, die hochaktive Vulkane bedecken, sogar Wasser mit pH-Werten unter Null aufweisen.

Am anderen Ende der pH-Wert-Skala ermöglichen extrem alkalische Bedingungen eine bemerkenswerte Primärproduktion natronreicher Seen. Bis zu 10 Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter und Tag, d. h. mehr als 15 Mal so viel wie produktive Gewässer und Flüsse ( $0,6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) sind möglich. Vermutlich sind es die produktivsten Gewässer überhaupt, d. h. sie erzeugen die meiste pflanzliche Biomasse pro Quadratmeter. Optimal sind die relativ hohen Umgebungstemperaturen, hohe Lichtintensitäten, die Verfügbarkeit des Nährstoffes Phosphat und der praktisch unbegrenzte Zugang zu  $\text{CO}_2$  in solchen, an Karbonat reichen Gewässern (Melack & Kilham, 1974; Grant et al., 1990).

Die großen Flamingo-Schwärme in Afrika profitieren davon ganz beträchtlich. Meist ist es sogar nur ein Cyanobakterium *Spirulina sp.*, welches sich in den Natronseen exorbitant vermehrt und deren gesamte Nahrungsgrundlage darstellt. In diesen Seen gibt es zudem eine Reihe alkali-toleranter Bakterien, deren Enzyme zum Teil eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung erlangt haben, u. a. in der Waschmittelindustrie als Bio-Detergenzien.

Das andere Extrem sind vulkanische Seen, die ausgesprochen lebensfeindlich sein können. Oft liegen ihre pH-Werte unter drei. Das ist der Fall,

## ” Seen an hochaktiven Vulkanen können pH-Werte unter Null aufweisen.

wenn sie eng mit aktivem Vulkanismus und erst kürzlich verebbter vulkanischer Aktivität verknüpft sind.

Sehr saure Seen sind häufig äußerst schwefelreich und haben einen extrem hohen Salzgehalt. Hierfür gibt es zahlreiche Beispiele: die Laguna Caliente am Poás in Costa Rica, der Ruapehu Kratersee in Neuseeland oder auch Kawah Ijen in Indonesien. Allen gemein sind die extrem niedrigen pH-Werte von unter Null bis knapp über 1. Kein höheres Lebewesen kann dieses Wasser trinken, geschweige denn darin leben. Solche pH-Werte entsprächen ungefähr dem unserer Magensäure (nüchtern), welche dafür gemacht ist, Krankheitserreger möglichst unschädlich zu machen.

Es gibt auch Vulkanseen, die hydrothermale Fluide enthalten. Diese hydrothermalen Fluide unterlagen bereits Umwandlungsprozessen und können stark mineralisiert sein. Jedoch tendieren sie dazu, weniger reich an vulkanogenen Komponenten wie Schwefel und Halogenen zu sein. Beispiele für solche Seen finden sich am Taal (zumindest bevor es zum Ausbruch im Januar 2020 kam) sowie am Pinatubo, der wie der Taal-Vulkan zu den Philippinen gehört. Weitere Beispiele sind der Kelut in Indonesien oder auch El Chichón in Mexiko.

### Hohe Wassertemperaturen

Wassertemperaturen in nicht-vulkanischen Seen hängen logischerweise stark mit der Lufttemperatur zusammen. Bei vulkanischen Seen ist das nicht unbedingt der Fall. Hier kann die Wassertemperatur stark variieren. Die Wassertemperatur des Ruapehu, dem Kratersee im Gipfel-Krater von Neuseelands höchstem Vulkan (2.797 m),

beispielsweise schwankt zwischen 10 und 50 °C. Kein höherer Organismus kann mit solchen, teils auch noch plötzlich auftretenden, Temperaturschwankungen umgehen. Sogar kochend heißes Wasser ist möglich: Im See Karymsky in der Caldera Academia Nauk in Kamschatka fing das Wasser während eines Ausbruchs an zu köcheln. Unter diesen schwierigen Bedingungen überleben oft nur Mikroorganismen.

Die Analyse der Mikroorganismen-Gemeinschaft und deren DNA kann auch Aufschluss darüber geben, wie das erste Leben ursprünglich auf der Erde ausgesehen haben könnte. Deshalb wurden zum Beispiel vom Deutschen GeoForschungszentrum im Rahmen des Interkontinentalen Bohrprogramms (ICDP) am Lake Towuti (Indonesien) sehr tief liegende Sedimente in vulkanischen Seen untersucht, die durch die Bohrkerne zugänglich wurden. Der Lake Towuti kann stellvertretend als modernes Äquivalent zu den eisenreichen Ozeanen im Archaikum, d. h. der Zeit von der Entstehung der Erde bis vor etwa 2,5 Milliarden Jahren, angesehen werden. Die mikrobiellen Gemeinschaften erlauben Rückschlüsse auf das Klima vergangener Zeiten (Paläoklima).

Wissen wir mehr über die Mikroorganismen in vulkanischen Seen, die unter extremsten Bedingungen überleben, ist das ein Wissen, das auch auf andere Kontexten übertragen werden könnte – etwa bei Antworten auf Fragen wie: Welche Organismen sind potentiell in der Lage, völlig degradierte, versauerte Böden zu besiedeln? Welche Organismen könnten zum sogenannten Bio-Mining bzw. Metall-Biolaugung eingesetzt werden, bei der aus Erzen mittels Mikroorganismen Wertmetalle gewonnen werden? Können Bakterien beispielsweise bei der Rückgewinnung toxischer Metalle oder beim Extrahieren begehrter Elemente wie Gold aus dem Gestein eingesetzt werden? Ein Bakterium namens *Acidothiobacillus ferrooxidans* erwies sich bereits als sehr brauchbar, da es die Mengen an toxischem Chrom und Zink in Klärschlamm auf ein akzeptables Level bringen konnte.

Darüber hinaus gibt es die Hoffnung, dass einige Bakterien aus vulkanischen Seen das Pflanzen-

wachstum unter extremen abiotischen Stress fördern können, d. h. sie sind nützlich für Pflanzen, die auf degradierten sauren, Schwermetall-belasteten Böden oder bei großem Hitzestress gedeihen müssen. Vor allem bestimmte Bakterien, die Wurzeln von Pflanzen an vulkanischen Seen besiedeln können, haben Mechanismen entwickelt, um diese von giftigen Schwermetallen zu befreien (Mapelli et al., 2015). Am El Chichón-Vulkan in Mexiko hat man bereits ein vielversprechendes Bakterium entdeckt und isolieren können.

### Gefahren an vulkanischen Seen

Die Überwachung vulkanischer Seen hilft bei der Einschätzung der potentiellen Gefährdung durch Vulkane. Gleichzeitig gehen von vulkanischen Seen selbst auch Gefahren aus. Auf welche Parameter bei der Überwachung von vulkanischen Seen zu achten ist, erörtert das Interview mit Dr. Egbert Jolie vom Deutschen GeoForschungszentrum in diesem Themenspezial näher (Jolie, 2020). Einige Gefahren, die mit vulkanischen Seen verbunden sind, seien hier kurz umrissen.

Am vulkanischen See des Taal-Vulkans (Philippinen) starben im Jahre 1911 durch Tsunamis und Seichen viele Fischer. Insgesamt ließen in den bis zu 5 m hohen Wellen mehr als 1.300 Menschen ihr Leben. Solche Ereignisse – mit Seichen und Tsunamis – gab es beispielsweise auch am Taupo-See in Neuseeland und am Spirit Lake am Mount St. Helens in den USA.

Seichen sind stehende Wellen, die sich in jedem geschlossenen oder halbgeschlossenen Wasserkörper/-becken bilden können. Die stehenden Wellen sind die Summe zweier Wellen, welche sich in entgegengesetzte Richtungen ausbreiten – bei vulkanischen Seen beispielsweise ausgelöst durch ein Erdbeben, subaquatische Explosionen wie am Lake Managua, schwere Sturmfronten oder ähnliche Ereignisse. Das Wasser (und die Wellen) laufen dann noch Stunden oder sogar Tage hin und her. Die größte Amplitude, also größte Wellenhöhe, der stehenden Wellen, ist an jedem Ende des Wasserkörpers zu finden, während sehr kleine Schwingungen am „Knoten“

oder Mittelpunkt der Welle auszumachen sind. Eine Animation der Wetter- und Ozeanografie-Behörde der Vereinigten Staaten (NOAA) veranschaulicht das Prinzip gut. Bei allen hier genannten Gefahren ist immer zu bedenken, dass nicht zwingend Menschen so nah an einem vulkanischen See leben, um wirklich gefährdet zu sein.

### Woher stammen Gase in vulkanischen Seen?

Ein weiteres Gefahrenpotential bergen Ausgasungen und Gasansammlungen in vulkanischen Seen in einigen Regionen der Erde. Im Allgemeinen sind die Gase in vulkanischen Seen entweder magmatischen Ursprungs (Kohlendioxid, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff, Salz- und Flusssäure, Wasserdampf) oder atmosphärischen Ursprungs (Stickstoff, Sauerstoff, Argon und andere Gase in geringen Mengen). Gase wie Methan, Ammoniak, Schwefelsäure können auch aus hydrothermalen Quellen entweichen und zum Seewasser beitragen. Abgesehen davon entstehen Gase im Stoffwechsel aller in einem See lebenden Organismen.

Hinzu kommt eine „Myriade“ an Gasen in geringeren Konzentrationen (z. B. Methan, Kohlenmonoxid, Helium, Wasserstoff). Die meisten dieser Gase führen vor allem dazu, dass das Seewasser saurer wird.

Ein Beispiel für einen See, der regelmäßig entgast, ist der Albaner See in Italien – insbesondere im Winter wird Kohlendioxid freigesetzt. Der Albaner See liegt nur 25 Kilometer südöstlich von Rom in einem polygenetischen Maar (z. B. Giaccio et al., 2009). Er könnte eine direkte Verbindung zu einer langlebigen Magmakammer haben. Daher ist eine kontinuierliche Überwachung der Physikochemie, der mikrobiellen Aktivität, und der gelösten Gase wie z. B. des Kohlendioxids, unerlässlich. Zu großen Kohlendioxidfreisetzungen kam es allein in der nahen Vergangenheit in den Jahren 1829, 1927 und 1989. Eine rückblickende Analyse der Aktivität lässt vermuten, dass sich CO<sub>2</sub> so stark ansammelt, wie das am Lake Nyos und Monoun in Kamerun der Fall ist (Rouwet et al., 2019).

Seen müssen tief genug sein, um Gas unter hohem Druck gelöst zu halten, und auch groß genug, damit sich erhebliche CO<sub>2</sub>-Mengen im Wasser lösen können. Nur wenn sie stark geschichtet sind und diese Schichtung (Stratifizierung) für mehrere Jahre bis Jahrzehnte aufweisen, ist die Ansammlung von Gasen in den tiefen, kühleren Wasserschichten möglich.

Die meisten Seen in gemäßigtem Klimazonen mischen sich ein- oder zweimal pro Jahr und geben dann zeitgleich ihre gespeicherten Gase in die Atmosphäre ab. Bei meromiktischen Seen hingegen, deren Wasser sich nie völlig durchmischt, kann es über 100 bis 1.000 Jahre zur Gasspeicherung kommen. Eine stabile Stratifizierung wie zum Beispiel im Lake Nyos oder Monoun in Kamerun wird durch steile und unter Wasser liegende Kraterwände, die das Wasserbecken formen, ermöglicht. Eine windbedingte Vermischung wird unter diesen Bedingungen verhindert und durch die geringe jahreszeitliche Abkühlung des tropischen Klimas ist die tiefe vertikale Durchmischung begrenzt.

Es muss eine ausdauernde lokale Quelle für Kohlendioxid geben, damit anscheinend ruhende Maar-Seen wie Lake Nyos oder Lake Monoun zu „Killer-Seen“ werden. Die sogenannte Kamerun-Vulkanlinie ist ein weltweiter Hotspot von Seen, die geringe, aber praktisch konstante Mengen an magmatischen Gasen ausstoßen. Die geologische Ursache geht auf die Spaltung Afrikas und Südamerikas und die Öffnung des Atlantischen Ozeans zurück, die vor etwa 120 Millionen Jahren begann. Kohlendioxideinträge in Form von CO<sub>2</sub>-geladenem Natriumkarbonatreichem Grundwasser mit niedriger Temperatur sind entlang des Kameruner Vulkangebirges weit verbreitet (Tanyileke et al., 1996). Frei werden können die Gase unter anderem, wenn eine Erschütterung oder anderer äußerer Einfluss zur Vermischung der Wasserschichten führt. Das kann ein Erdbeben, ein vulkanisches Ereignis oder ein Erdbeben sein.

Zu fatalen Entgasungen kam es sowohl am Nyos-See wie auch am Monoun-See in Kamerun. Der Gasausbruch fand hier wahrscheinlich nur des-

halb statt, weil das gelöste CO<sub>2</sub> im Tiefenwasser von Nyos und Monoun in Verbindung mit der Periode weniger stabiler Schichtung des Sees in der Regenzeit (Sommer) stand und Übersättigungswerte erreichte und sich auflöste (Kusakabe, 2015). Am Nyos-See liefen im Jahre 1986 etwa  $1,94 \times 10^6$  Tonnen CO<sub>2</sub> in einer Gaswolke über den Kraterand und zogen als dichte Strömung über zehn Kilometer entlang eines Flusstals stromabwärts. Das über Land strömende farb- und geruchlose Kohlendioxid hat eine größere Dichte als Luft, schwebte also dicht am Boden und erstickte 1.800 Menschen, die in der Nähe des Sees lebten. Solche Ereignisse sind sehr selten, obwohl CO<sub>2</sub>-Quellen in vielen vulkanischen Regionen üblich sind. Dennoch sind global kaum Analoga bekannt.

An vulkanischen Seen sind auch gefährliche pyroklastische Ströme möglich. Besonders tragisch war ein solcher Strom am Vulkan Soufrière auf der Karibikinsel St. Vincent im Jahre 1902. Der Kratersee wurde bei der explosiven Eruption herausgeschleudert und die pyroklastischen Ströme waren für einen Großteil der 1.680 Toten

verantwortlich. Schlamm- und Schuttströme, sogenannte Lahare, sowie phreatomagmatische Explosionen, die entstehen, wenn Magma in Kontakt mit Wasser kommt, sind weitere Gefahren und decken sich mit Gefahren, die von Vulkanen ausgehen. Der ESKP-Artikel „Umgang mit Naturgewalten – Verhalten an aktiven Vulkanen“ gibt zu diesen Gefahren einen detaillierten Überblick (Zorn, 2020).

Wer mehr über vulkanische Seen in Erfahrung bringen möchte, kann sich mit der Monographie „Volcanic Lakes“ befassen. Die Informationen dieses Artikels basieren auf dieser umfassenden Publikation, welche von Dmitri Rouwet, Bruce Christenson, Franco Tassi und Jean Vandemeulebrouck in Zusammenarbeit mit vielen Wissenschaftskollegen\*innen 2015 erarbeitet und herausgegeben wurde. Die Monographie richtet sich vornehmlich an Experten, u. a. Vulkanologen und Biologen und gibt einen umfangreichen und vertiefenden Einblick in die Forschung zu vulkanischen Seen. Sie kann daher vor allem als weiterführende Lektüre empfohlen werden.

## Referenzen

- Bani, P., Oppenheimer, C., Varekamp, J. C., Quinou, T., Lardy, M. & Carn, S. (2009). Remarkable geochemical changes and degassing at Vouli crater lake, Ambae volcano, Vanuatu. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188(4), 347-357. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.09.018
- Caudron, C., Mauri, G., Williams-Jones, G., Lecocq, T., Kamil Syahbana, D., De Plaen, R., Peiffer, L., Bernard, A. & Saracco, G. (2016). New insights into the Kawah Ijen hydrothermal system from geophysical data. In T. Ohba, B. Capaccioni & C. Caudron (Hrsg.), *Geochemistry and Geophysics of Active Volcanic Lakes* (Special Publications, 437, S. 57-72). London: Geological Society. doi:10.1144/SP437.4
- Christenson, B., Németh, K., Rouwet, D., Tassi, F., Vandemeulebrouck, J. & Varekamp, J. C. (2015). Volcanic Lakes. In D. Rouwet, B. Christenson, F. Tassi & J. Vandemeulebrouck (Hrsg.), *Volcanic Lakes* (S. 1-20). Berlin/Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-36833-2\_1
- Costa J. E. & Schuster R. L. (1988). The formation and failure of natural dams. *GSA Bulletin*, 100(7), 1054-1068. doi:10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2
- Giaccio, B., Messina, P., Sposato, A., Voltaggio, M., Zanchetta, G., Galadini, F., Gori, S. & Santacroce, R. (2009). Tephra layers from Holocene lake sediments of the Sulmona Basin, central Italy: implications for volcanic activity in Peninsular Italy and tephrostratigraphy in the central Mediterranean area. *Quaternary Science Reviews*, 28(25-26), 2710-2733. doi:10.1016/j.quascirev.2009.06.009
- Grant, W. D., Mwatha, W. E. & Jones, B. E. (1990). Alkaliphiles: ecology, diversity, and applications. *FEMS Microbiology Reviews*, 6(2-3), 255-269. doi:10.1111/j.1574-6968.1990.tb04099.x
- IAVCEI Commission on Volcanic Lakes. (o.D.). [iavcei-cvl.org, Blog]. Aufgerufen am 26.06.2020.

- Jolie, E. (2020). Konzepte für die Überwachung vulkanischer Seen. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 166-169). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.7.6
- Kusakabe, M. (2015). Evolution of CO<sub>2</sub> content in Lakes Nyos and Monoun, and sub-lacustrine CO<sub>2</sub>-recharge system at Lake Nyos as envisaged from C/3He ratios and noble gas signatures. In D. Rouwet, B. Christenson, F. Tassi & J. Vandemeulebrouck (Hrsg.), *Volcanic Lakes* (S. 427-450). Berlin/Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-36833-2\_19
- Mapelli, F., Marasco, R., Rolli, E., Daffonchio, D., Donachie, S. & Borin, S. (2015). Microbial Life in Volcanic Lakes. In D. Rouwet, B. Christenson, F. Tassi & J. Vandemeulebrouck (Hrsg.), *Volcanic Lakes* (S. 507-522). Berlin/Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-36833-2\_23
- Melack, J. M. & Kilham, P. (1974). Photosynthetic rates of phytoplankton in East African alkaline, saline lakes. *Limnology and Oceanography*, 19(5), 743-755. doi:10.4319/lo.1974.19.5.0743
- National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. (2018, 25. Juni). What is a seiche? [National Ocean Service website, oceanservice.noaa.gov]. Aufgerufen am 26.06.2020.
- Ohsawa, S., Saito, T., Yoshikawa, S., Mawatari, H., Yamada, M., Amita, K., Takamatsu, N., Sudo, Y. & Kagiya, T. (2010). Color change of lake water at the active crater lake of Aso volcano, Yudamari, Japan: is it in response to change in water quality induced by volcanic activity? *Limnology*, 11(3), 207-215. doi:10.1007/s10201-009-0304-6
- Pecoraino, G., D'Alessandro, W. & Inguaggiato, S. (2015). The Other Side of the Coin: Geochemistry of Alkaline Lakes in Volcanic Areas. In D. Rouwet, B. Christenson, F. Tassi & J. Vandemeulebrouck (Hrsg.), *Volcanic Lakes* (S. 219-237). Berlin/Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-36833-2\_9
- Rouwet, D., Christenson, B., Tassi, F. & Vandemeulebrouck, J. (Hrsg.). (2015). *Volcanic Lakes*. Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-36833-2
- Rouwet, D., Giovanni Chiodini, G., Ciuccarelli, C., Comastri, A. & Costa, A. (2019). Lago Albano, the “anti-Nyos-type” lake: The past as a key for the future. *Journal of African Earth Sciences*, 150, 425-440. doi:10.1016/j.jafrearsci.2018.09.019
- Tanyileke, G. Z., Kusakabe, M. & Evans, W. C. (1996). Chemical and isotopic characteristics of fluids along the Cameroon volcanic line, Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 22(4), 433-441. doi:10.1016/0899-5362(96)00025-5
- Varekamp, J. C. (2015). The Chemical Composition and Evolution of Volcanic Lakes. In B. Christensen, K. Németh, D. Rouwet, F. Tassi, J. Vandemeulebeck & J.-C. Varekamp (Hrsg.), *Volcanic Lakes* (S. 93-123). Berlin/Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-36833-2\_4
- Zorn, E. (2020). Umgang mit Naturgewalten – Verhalten an aktiven Vulkanen. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 40-44). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungs-Zentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.1.5

## Monogenetischer Vulkanismus und Großstädte: Wo und wann bleibt ein Rätsel

Jana Kandarr (Earth System Knowledge Platform | ESKP)

Fachliche Prüfung: Edgar Zorn (Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

**In monogenetischen Vulkanfeldern fallen Eruptionen meistens verhältnismäßig klein aus. Ist ein Vulkan in einem solchen Feld erloschen, bricht er an dieser Stelle nie mehr aus. Doch irgendwo anders wird sich Magma in einem aktiven Vulkanfeld wieder seinen Weg an die Oberfläche bahnen – an eine Oberfläche, die im Laufe der Jahrhunderte vielleicht dicht besiedelt wurde. Auckland und Mexiko-Stadt sind Beispiele für Großstädte, die auf einem solchen ausgedehnten Vulkanfeld im Erdmantel errichtet wurden.**

- Vulkanausbrüche über monogenetischen Feldern sind typischerweise von geringem Volumen und geringer Explosivität. In der Regel ist nie genau absehbar, wo die nächste Eruption stattfindet.
- Monogenetische Vulkanfelder sind schwer zu überwachen. Nicht nur dass sie selten aktiv sind, die Geräusche und Erschütterungen in Großstädten erschweren Messungen erheblich.
- Auckland, Mexiko-Stadt, Neapel, Manila und Medina sind große Städte, die auf oder in der Nähe solcher monogenetischen Vulkanfelder erbaut wurden.

Wie eng die Überbleibsel vulkanischer Aktivität inzwischen mit einigen Stadtbildern verwoben sind, zeigen Aufnahmen von Auckland, der südlichen Stadtgebiete von Mexiko-Stadt oder auch vom Monte Nuovo bei Neapel, den man bezeichnenderweise einfach den „neuen Berg“ nannte. Obwohl der Monte Nuovo erst „vor kurzem“, sprich im Jahre 1538, und nur innerhalb einer Woche entstand, ist der 133 Meter hohe Vulkanberg in den Phlegräischen Feldern heute ringsum besiedelt. Auch Auckland hat sich bekanntermaßen ganz prächtig entwickelt. Die Wirtschaftskraft der größten Stadt Neuseelands ist beträchtlich, macht 35 Prozent des Brutto-sozialprodukts des Landes aus. Die ersten Siedler hatten offensichtlich keine Kenntnis davon, dass Mount Eden (Maori: Maungawhau) oder One Tree Hill (Maori: Maungakiekie) keine gewöhnlichen Hügel sind, sondern Zeugen eines aktiven vulkanischen Feldes.

Auch im Süden von Mexico-Stadt ist inzwischen viel entstanden, so beispielsweise eine Universität auf erkalteten Lavaströmen. Ein anderes Beispiel findet sich in Saudi-Arabien. Unweit der heiligen Stadt Medina, die einige der wichtigsten religiösen Stätten des Islam beherbergt und welche jährlich von Millionen von Menschen besucht wird, schlummert Saudi-Arabiens größtes und immer noch aktives Vulkanfeld.

Das Tückische der ausgedehnten aktiven monogenetischen Vulkanfelder ist, dass sie einerseits flächendeckend praktisch nicht zu überwachen sind und andererseits niemand lange im Voraus wissen kann, wo Magma wieder plötzlich aufsteigen wird. Das liegt daran, dass monogenetische Vulkane nur einmal ausbrechen und dann wieder erlöschen. „Mono“ steht demnach für den „einmaligen“ Ausbruch an einer Stelle, auch wenn dieser länger andauert. Weitere Ausbrüche eines solchen Feldes bilden eben dann an anderer Stelle einen neuen Vulkan. Vulkane, die

mehrmals an einer Stelle ausbrechen, werden dagegen als polygenetisch bezeichnet.

Nach heutigem Kenntnisstand haben vermutlich dreiunddreißig Länder monogenetische Vulkanfelder, die in den letzten 10.000 Jahren, d. h. im Holozän, aktiv waren (Global Volcanism Program). Wesentlich mehr Staaten werden es, wenn man weiter zurückblickt. Erkennen kann man vulkanische Felder häufig an Schlackenkegeln, Maaren oder Tuffringen. Erstere gehören gleichzeitig zur häufigsten vulkanischen Landform der Erde (Wood, 1980).

Doch nur wenige moderne Großstädte haben sich auf monogenetischen Vulkanfeldern entwickelt. Dass sich Siedler ausgerechnet einen Flecken Erde ausgesucht haben, unter dem noch immer irgendwo, an unbekannter Stelle, Magma aufsteigen kann, ist aus heutiger Sicht also auch einfach Pech. Die weltweit gefürchtetsten Vulkane – das sind die Strato- und Schichtvulkane – sind im Gegensatz dazu meist sogenannten polygenetischen Systeme zuzuordnen. Diese sind durch mehrere Eruptionen über dem immergleichen Vulkanschlot und vor allem über wesentlich längere Zeiträume hinweg entstanden. Hier ist zumindest sehr klar, wo die Aktivität stattfindet.

### Wie sehen monogenetische Vulkanfelder aus?

Monogenetischer Vulkanismus wird üblicherweise durch gehäuftes Auftreten einzelner Vulkane deutlich. In einem einzigen monogenetischen Vulkanfeld können einige Wenige bis Tausende kleine Einzelvulkane auftreten (Kereszturi & Németh, 2012). Ein bisschen bizarr muten solche Landschaftsformen schon an. Teils sehr weit und zufällig verstreut ragen eher kleinvolumige, oft perfekt geformte Vulkankegel aus Schlacke oder Asche empor.

Diese Kegel bilden sich bevorzugt in mafisch-magmatischen Systemen, das heißt aus Lava mit einem hohen Anteil an eisen- bzw. magnesiumhaltigen Mineralen, welche typischerweise aus sehr tiefen Magmaquellen im Erdmantel gespeist werden. „Mafisch“ ist dabei ein Kunstwort

” **Ein 133 m hoher Vulkankegelberg bei Neapel entstand im Jahre 1538 innerhalb nur einer Woche.**

aus Ma für Magnesium und F für Ferrum (lateinisch für Eisen). Dieser Typ Magma ist besonders flüssig und kann an der Erdoberfläche daher leicht als Schlacke ausgeworfen werden, was an der Ausbruchsstelle Kegel auftürmt. Meist sind diese Schlackenkegel weniger als 300 Meter hoch mit einem geringen Gesteinsvolumen von meist weniger als einem Kubikkilometer (Connor und Conway, 2000).

Abgesehen davon können nahezu perfekt kreisförmige Maare und Tuffringe das Landschaftsbild prägen. Maare sind Explosionskrater, die bei Kontakt des aufsteigenden Magma mit Wasser entstehen. Oft sind sie heute mit Regenwasser gefüllt und bilden kreisrunde Seen. Tuffringe werden nicht wie Maare aus der Oberfläche geschürft, sondern bauen sich durch Ablagerung der Eruptionsprodukte auf. Morphologisch gesehen sind Tuffringe breite, flache Landschaftsformen mit Flanken von zwei bis zehn Grad.

Ein anderes mögliches Merkmal von monogenetischem Vulkanismus ist die Ausbildung von Ausbruchsstellen und Kegeln an Flanken großer Stratovulkanen, die selbst nicht unbedingt monogenetisch sein müssen, sozusagen als Begleiterscheinung. Hier springt monogenetischer Vulkanismus dem Laien nicht gleich ins Auge. Viele solcher Kegel gibt es beispielsweise an der Flanke des Ätna in Italien. Sie sind nur einmal ausgebrochen, wobei der Ätna selbst immer wieder ausbricht und daher polygenetisch ist.

### Welche Ausbrüche sind zu erwarten?

Vulkanausbrüche über monogenetischen Feldern sind typischerweise von geringem Volumen und geringer Explosivität. In der Regel ist nie genau

absehbar, wo die nächste Eruption stattfindet. Ein Ausbruch dauert mancherorts nur wenige Tage, andere Ausbrüche wiederum ziehen sich über viele Jahre wie der des Vulkankegels Parícutín, der im Michoacán-Guanajuato-Vulkanfeld in Mexiko mitten in einem ehemaligen Maisfeld emporwuchs und dann von 1943 bis 1952 aktiv war.

Ob monogenetische Systeme ausdauernde Magmakammern entwickeln oder aber Magmen mehr oder weniger direkt aus dem jeweiligen Quellgebiet im Erdmantel ausbrechen, ist bisher ungeklärt. Neuere Studien zeigen, dass der Aufbau eines monogenetischen Vulkans teils sehr komplex sein und längere Ausbruchsdauern als erwartet aufweisen kann (Németh, 2010).

### Lavamengen

Der magmatische Output eines einzelnen Zentrums in einem Vulkanfeld ist ein bis drei Größenordnungen geringer als der eines polygenetischen Vulkans (Schild- oder Stratovulkan), obwohl das Gesamtfeld das gleiche Volumen wie ein polygenetischer Vulkan haben kann.

### Gefahren

Zu den assoziierten Gefahren von Vulkanfeldern gehören pyroklastische Ströme und Druckwellen (base surges), Explosionen, Tephrafall sowie Lavaströme. Andere primäre und sekundäre Gefahren kommen hinzu, etwa Erdbeben, Tsunamis und Feuer, die im Vor- bzw. Nachhinein eine große Rolle spielen können (Deligne et al., 2017).

Ein wichtiger Faktor ist generell die Tiefenlage des wassergesättigten Sediments: in welcher Tiefe also kann Magma in Kontakt mit Wasser kommen (Deligne et al., 2017)? Je tiefer die Wassersättigung reicht, desto größer die Wahrscheinlichkeit eines ersten phreatomagmatischen Stadiums. Phreatomagmatische Ausbrüche beginnen, wenn heiße Gesteinsschmelze (Magma) in Kontakt mit Grund-, Oberflächen-, Meer- oder hydrothermale Wasser kommt. Das Bodenwasser erhitzt sich bei Kontakt mit Magma stark und dehnt sich beim Verdampfen aus, was so lange zu Explosionen und Druckwellen führt bis

der Wassernachschub versiegt bzw. der Druck abgebaut ist. Das aufsteigende Magma kann einen Vulkanausbruch speisen, der explosiv oder auch langsam fließend (effusiv) sein kann (Kereszturi und Németh, 2012).

### Großstädte auf oder in der Nähe von monogenetischen Vulkanfeldern

#### Auckland

Als die ersten Siedler dieses Fleckchen Erde erkoren haben, konnten sie nicht ahnen, dass es für die inzwischen 1,4 Millionen Einwohner zählende Metropole und jährlich mehr als 2 Millionen Touristen einmal eine unangenehme Angelegenheit werden könnte, auf einem aktiven Vulkanfeld zu leben (ATEED, 2020).

Insgesamt erstreckt sich das „Auckland Volcanic Field“ über 360 Quadratkilometer und weist über 50 Eruptionszentren auf. Über 55 Ausbrüche lassen sich für die vergangenen 190.000 Jahre zählen, wobei im Schnitt jeweils circa 2 Kubikkilometer Tephra, Lava und andere vulkanische Ablagerungen hervorgebracht wurden (kumulatives Volumen) (Connor, 1990). Vor 32.000 Jahren war das Feld besonders aktiv. Allerdings ist Aucklands jüngster Vulkan, der Rangitoto nur 553 (+/- 7) Jahre alt (Needham et al., 2011). Sein Ausbruch gibt Wissenschaftlern Rätsel auf, denn er war ungewöhnlich groß. In nur 13 Kilometer Entfernung vom Stadtzentrum bildet Rangitoto heute eine stattliche Insel. Beim Rangitoto-Vulkan ist umstritten, ob er einmal, zweimal oder einmal über einen langen Zeitraum ausgebrochen ist, sodass der Begriff „monogenetisch“ bezüglich des Rangitoto mit Vorsicht zu betrachten ist.

Mit ziemlicher Sicherheit wird das „Auckland-Vulkanfeld“ wieder ausbrechen. Vermuten lässt dies eine Anomalie des Erdmantels, was ein Zeichen für teilweise geschmolzenes Magma in 70 bis 90 Kilometern Tiefe ist. Völlig ungewiss ist der Ort der nächsten Eruption, denn Muster sind bisher keine erkennbar. So liegt der Schlot des ältesten Vulkans (Pupuke) unmittelbar neben dem Schlot des jüngsten Vulkans (Rangitoto).



Abb. 1: Auckland-Vulkanfeld, Karte: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de, Lizenz: CC BY 4.0

Historisch gesehen kam es im Zusammenhang mit dem Vulkanfeld nur zu kleinen Beben in der Region in und um Auckland. Dementsprechend wäre von den Erschütterungen, die einem Vulkanausbruch vorausgehen, wohl wenig Schaden zu erwarten, dies auch, weil generell die Bauvorschriften aufgrund der Erdbebengefährdung in Neuseeland sehr streng sind. Die Wasserversorgung der Bevölkerung könnte am allerbesten durch Maßnahmen im Vorfeld schon sichergestellt werden. Zudem würde die schnelle Evakuierung der betroffenen Menschen eine der größten Herausforderungen darstellen.

### Das Chichinautzin-Vulkanfeld bei Mexiko-Stadt

Mexiko ist in der Tat ein Land der Superlative, wenn es um monogenetischen Vulkanismus geht. Das ausgedehnte monogenetische Vulkanfeld Michoacán-Guanajuato weist über 1.400 Schloten auf, die ein 200 x 250 Kilometer großes Gebiet der Staaten Michoacán und Guanajuato in West-Zentralmexiko abdecken, darunter die historisch aktiven Schlackenkegel von Parícutín und Jorullo. Auch Mexiko-Stadt ist betroffen. Das Chichinautzin-Vulkanfeld beispielsweise

## ” Städte wie Auckland, die auf einem monogenetischen Feld liegen, könnten nur wenige Tage im Voraus gewarnt werden.

erstreckt sich über ein 100 Quadratkilometer großes Gebiet direkt südlich von der Hauptstadt. Mehr als 580.000 Menschen leben im unmittelbaren Umkreis von fünf Kilometern, mehr als vier Millionen Menschen sind es bereits, wenn man einen 30 Kilometer großen Radius spannt. Viele der mehr als 150 kleinen Kegel im Vulkanfeld sind in den letzten 11.000 Jahren entstanden, sind also holozäner Herkunft. Nimmt man das Pleistozän hinzu, sind insgesamt mehr als 220 monogenetische Schlotte zu finden.

Die bekannteste Eruption ereignete sich vor etwa 1670 Jahren. Die Eruption des Xitle-Vulkankegels verursachte einen massiven Lavastrom (3,2 km<sup>3</sup>), der landwirtschaftliche Flächen sowie Pyramiden und andere Strukturen von Cuicuilco und angrenzende prähispanische Stadtzentren bedeckte. Der südliche Teil von Mexiko-Stadt und die Nationale Universität von Mexiko liegen heute auf einem Ende des 13 Kilometer langen Lavastroms. Historisch von der Bevölkerung überliefert wurde des Weiteren auch der Ausbruch des Cerro Chichinautzin.

### Metropolregion Manila

Das San-Pablo-Vulkanfeld, auch bekannt als das Laguna-Vulkanfeld, liegt am größten See der Insel Luzon. Von der gigantischen Metropolregion Manila mit seinen über 19 Millionen Einwohnern, sind es nur etwa 50 Kilometer in südöstlicher Richtung bis zum markantesten Merkmal des Vulkanfeldes, dem Mount Makiling. In einem Umkreis von fünf Kilometern leben annähernd 1,3 Millionen Menschen. Das Feld enthält Dutzende von Vulkankegeln und besteht aus über 200 ruhenden und monogenetischen Maaren, Krater-

seen aber auch Stratovulkanen, von denen Mount Makiling als höchster 1.090 Meter erreicht. Die ältesten Maare sind inzwischen mit Sedimenten gefüllt, während die jüngste Generation von Maaren tiefe Seen bildet. Lokale philippinische Legenden besagen, dass das jüngste Maar – der 1,2 Kilometer breite Sampaloc-See – erst vor etwa 500 bis 700 Jahren entstanden sei (Global Volcanism Program).

### Lavaströme bis in die Nähe der Heiligen Stadt Medina

Saudi-Arabiens größtes Lavafeld „Harrat Rahat“ ist 20.000 Quadratkilometer groß und erstreckt sich über 300 Kilometer südlich der heiligen Stadt Medina, in die jährlich viele Millionen Menschen pilgern. Vier koalierende Lavafelder, die aus versetzten, nach Nord-Nord-West verlaufenden Schlot-Systemen ausbrachen, umfasst Harrat Rahat. Basaltische Schlackenkegel dominieren in dem Vulkanfeld. Kleine Schildvulkane und Lavakuppeln sind ebenfalls vorhanden. Die Aktivität ist nach Norden gewandert, was in historischer Zeit zu Ausbrüchen in der Nähe von Medina führte. Die bekannteste Eruption fand im Jahre 1256 statt, als ein 0,5 Kubikkilometer großer Lavastrom aus sechs aneinandergereihten Schlackenkegeln ausbrach, dann 23 Kilometer floss und so bis auf vier Kilometer an Medina heranreichte.

### Neapel

Auch in Europa gibt es ausgedehnte monogenetische Vulkanfelder. Allerdings gelten sie – bis auf die Phlegräischen Felder in Italien – als nicht aktiv, da sie im Holozän, d.h. in den letzten 10.000 Jahren, nicht ausgebrochen sind. In den Phlegräischen Feldern bei Neapel gibt eine große Zahl monogenetischer Vulkane. Die Region zählt zu den am besten untersuchten und kontinuierlich überwachten vulkanischen Gebieten der Welt. Ausführlichere Informationen zu den Phlegräischen Feldern finden sich in dem ESKP-Beitrag „Zivilisation meets VEI-7 Eruption“ (Walter, 2018) sowie im Interview mit Dr. Eleonora Rivalta (Rivalta, 2020).

### Fazit: Problem der Vorhersagbarkeit

Was kann nun getan werden, um Risiken zu minimieren? Eine fortwährende Untersuchung auf (möglicherweise) austretende Gase bzw. Bodenverformungen unter einer ganzen Stadt wird nicht realisierbar sein, solange nicht klar ist, auf welche Gebiete man sich konzentrieren sollte. Zu beachten ist dabei immer auch, dass es sehr lange ruhige Intervalle von teilweise mehreren tausend Jahren zwischen Eruptionen geben kann. Das macht Vorhersagen über mögliche Ausbrüche entsprechend schwierig und unzuverlässig. Geologische Zeiträume sind im Vergleich zu einem Menschenleben sehr groß. Als Option bleibt dann vor allem seismisches Monitoring. Nun gibt es in größeren Städten aber eine Menge Verkehr, es wird gebaut und gebaggert. All diese leichten Erschütterungen bereiten Experten Kopfzerbrechen, denn sie „verwaschen“ die seismologischen Messungen. Sogenannte „Background Noises“ können nur schwer herausgefiltert werden.

Deshalb kann voraussichtlich erst der tatsächliche Aufstieg des Magmas gemessen werden. So ergäbe sich momentan z. B. für Auckland nur eine Vorwarnzeit der Bevölkerung von 5 bis 14 Tagen. Wenig Zeit, um eine ganze Stadt zu evakuieren.

Es lässt sich also zusammenfassen, dass niemand für monogenetische Vulkanfelder räumlich vorhersagen kann, wo der nächste Vulkankegel aus der Erde wächst, wo sich Magma seinen Weg zur Oberfläche bahnt und potentiell dort lebende Menschen bedroht. Daher müssen in betroffenen Siedlungsgebieten gute Aktionspläne für den Fall einer Eruption ausgearbeitet werden.

### Exkurs: Aktivität des überwiegend monogenetischen Vulkanfeldes in der Eifel

Als Teil der mitteleuropäischen Vulkanprovinz – einem 200 bis 300 Kilometer breiten Vulkangürtel, der sich nördlich der Alpen durch den Kontinent zieht – ist auch Deutschland geprägt von unterschiedlichen Vulkanregionen wie Vogelsberg, Rhön, Vogtland oder der Eifel.

Gerade die Eifel ist für Vulkanforscherinnen und -forscher besonders interessant, weil Vulkanismus in der Eifel ein junges Phänomen ist und es nach neueren wissenschaftlichen Einschätzungen eine realistische Möglichkeit gibt, dass dort auch in Zukunft (geologische Zeiträume) wieder Vulkanausbrüche beobachtet werden können. Ein prominentes Beispiel für Vulkanaktivitäten in der Eifel ist der Laacher See, an dem sich vor 12.900 Jahren eine plinianische Eruption ereignet hat, die auf dem vulkanischen Explosivitäts-Index (VEI) mit 6 klassifiziert werden kann, wobei der Laacher See selbst kein monogenetischer Vulkan ist und damit eine der wenigen Ausnahmen im Vulkanfeld der Eifel darstellt.

Die Eruption des Laacher-See-Vulkans war stärker als der Pompeji-Ausbruch des Vesuvs (Italien) 79 n. Chr. oder des Mt. St. Helens (USA) im Jahr 1980, die beide mit einem VEI von 5 klassifiziert sind. Während der explosiven Phase wurden Gesteinsblöcke mit vier Metern Durchmesser bis über zwei Kilometer weit aus dem Krater herausgeschleudert. Es entstand eine Eruptionssäule, bei der Bims, Asche und Gase mehr als 35 Kilometer in die Atmosphäre geschleudert wurden.

Die Gefahr weiterer Ausbrüche in der Eifel ist nur schwer einzuschätzen, da deren Zeitabstände sehr groß und unregelmäßig sind. Es ist allerdings klar, dass die Eifel Zeichen magmatischer Aktivität aufweist und nicht als erloschen betrachtet werden kann. In der gemeinsamen wissenschaftlichen Einschätzung und Bewertung aktueller Prozesse in der Eifel durch Forscher\*innen verschiedener Helmholtz-Zentren (GFZ, KIT, UFZ) und zahlreicher Universitäten (u. a. Göttingen, Essen, Frankfurt, LMU München, Jena) heißt es: „Obgleich es unter Experten unumstritten ist, dass sich in der Eifel in der geologischen Zukunft, d. h. in Zeiträumen innerhalb von Tausenden von Jahren ähnliche Vulkanausbrüche wiederholen können, wird die Eifel bis heute nur unzureichend überwacht“ (Dahm et al., 2019, S. 1).

Insbesondere fehlen wichtige Kenntnisse zu Fluid-Bewegungen und es stellt sich die Frage, ob magmatische Reservoirs in der Erdkruste oder an der Erdkruste-Erdmantel-Grenze existieren. Gibt es Kanäle, die auch Magma für einen Aufstieg nutzen könnten? Solche Untersuchungen müssten mit modernen Methoden durchgeführt und dem heutigen Stand der Forschung in Beziehung gesetzt werden. Auch gibt es keine definierten Ausbruchsszenarien, die die Basis für Frühwarnsysteme bilden oder Handlungskonzepte, um auf eine vulkanische Krise in der Eifel zu reagieren.

Quelle: Dahm et al., 2019

## Referenzen

- Auckland Tourism, Events and Economic Development – ATEED. (2020). Visitors [Auckland Besucherstatistik, [www.aucklandnz.com](http://www.aucklandnz.com)]. Aufgerufen am 27.07.2020.
- Connor, C. B. (1990). Cinder Cone Clustering in the TransMexican Volcanic Belt: Implications for Structural and Petrologic Models. *Journal of Geophysical Research*, 95(B12), 19395-19405. doi:10.1029/JB095iB12p19395
- Dahm, T., Wörner, G., Ritter, J. & Walter, T. R. (2019). Vulkanismus in der Eifel – Wissenschaftliche Einschätzung. Bewertung aktueller Prozesse und Forschungsbedarf. *Mitteilungen / Deutsche Geophysikalische Gesellschaft*, 2, 5-15.
- Deligne, N. I., Fitzgerald, R. H., Blake, D. M., Davies, A. J., Hayes, J. L., Stewart, C., ... Woods, R. (2017). Investigating the consequences of urban volcanism using a scenario approach I: Development and application of a hypothetical eruption in the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 336, 192-208. doi:10.1016/j.jvolgeores.2017.02.023
- Kereszturi, G. & Németh, K. (2012). Monogenetic Basaltic Volcanoes: Genetic Classification, Growth, Geomorphology and Degradation. In K. Németh (Hrsg.), *Updates in Volcanology. New Advances in Understanding Volcanic Systems* (S. 3-89). London: IntechOpen. doi:10.5772/51387
- Németh, K., Carrasco-Núñez, G., Aranda-Gómez, J. J. & Smith, I. E. M. (Hrsg.). (2017). *Monogenetic Volcanism*. London: Geological Society Publishing House. doi:10.1144/SP446
- Németh, K. (2010). Monogenetic volcanic fields: Origin, sedimentary record, and relationship with polygenetic volcanism. In E. Cañón-Tapia & A. Szakács (Hrsg.), *What Is a Volcano?* (GSA Special Papers, 470, S. 43-66). Boulder, USA: Geological Society of America. doi:10.1130/2010.2470(04)
- Nieto-Torres, A., Lillian, A. & Del Pozzo, M. (2019). Spatio-temporal hazard assessment of a monogenetic volcanic field, near México City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 371, 46-58. doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.01.006
- Porio, E. (2011). Vulnerability, Adaptation, and Resilience to Floods and Climate Change-Related Risks among Marginal, Riverine Communities in Metro Manila. *Asian Journal of Social Science*, 39(4), 425-445. doi:10.1163/156853111X597260
- Rivalta, E. (2020). Wo neue Vulkane entstehen können. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 51-53). Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
- Scandone, R. (1979). Effusion rate and energy balance of Paricutin eruption (1943-1952), Michoacan, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 6(1-2), 49-59. doi:10.1016/0377-0273(79)90046-5
- Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., Rymer, H. & Stix, J. (Hrsg.). (2015). *Encyclopedia of Volcanoes* (2. Aufl.). San Diego: Academic Press.
- Walter, T. (2018, 27. Juni). Zivilisation meets VEI-7 Eruption: Die Menschheit ist schlecht aufgestellt. *Earth System Knowledge Platform* [[www.eskp.de](http://www.eskp.de)], 5. doi:10.2312/eskp.026

## Vulkane im Labor: Was man durch experimentelle Vulkanausbrüche lernen kann

Dr. Ulrich Küppers (Ludwig-Maximilians-Universität München, LMU)

**Laboruntersuchungen sind ein wichtiges Hilfsmittel zum Verständnis vulkanischer Vorgänge. Sie erlauben es, die Rahmenbedingungen zu kontrollieren und gezielt einzelne Parameter zu variieren. So lässt sich feststellen, welche Bedeutung diesen Parametern im vulkanischen Gesamtgeschehen zukommt.**

- Neben der Geländearbeit sind Laborexperimente und materialwissenschaftliche Untersuchungen ein wichtiges Standbein der Vulkanforschung.
- Die reduzierte Komplexität des Modells im Labor erweist sich für die Erkenntnis dabei durchaus als Vorteil.
- An der LMU in München wird nachgestellt, wie sich Magma verhält, wenn sich bestimmte Rahmenbedingungen ändern. Zum Beispiel kann Magma fließen oder brechen!

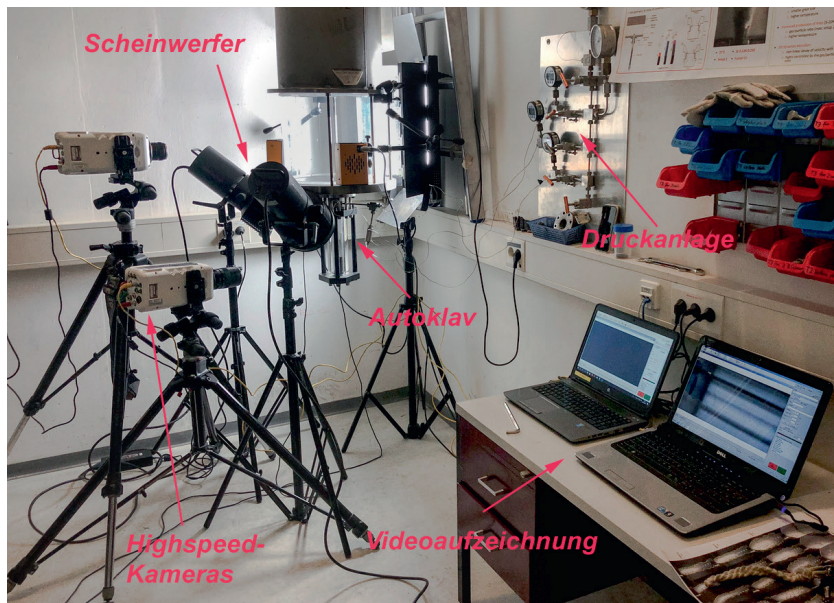
Geländearbeit an Vulkanen klingt spannend und ist es auch! Jedoch sind Vor-Ort-Untersuchungen häufig logistisch aufwendig. Sie bergen Risiken für Wissenschaftler\*innen und kosten neben viel Schweiß auch Zeit und Geld. Laboruntersuchungen sind hingegen weniger aufwendig und leisten einen wichtigen Beitrag zu einem besseren Verständnis vulkanischer Phänomene (Abb. 1).



Abb. 1: zeigt den explosiven Ausbruch der Kraters N1 des Stromboli im Mai 2013. Foto: Dr. Daniele Andronico

Aktive Vulkane erlauben es in der Regel nicht, die notwendigen Messinstrumente gefahrlos nah genug zu installieren, um die dynamischen Prozesse zeitlich und räumlich mit der gewünschten Auflösung erfassen zu können. Zudem sind viele Messinstrumente nicht in der Lage, vulkanische Ausbruchstemperaturen oder die freigesetzten Energien eines Vulkanausbruchs zu überstehen. Um dennoch unser Verständnis zu erweitern sowie einen Beitrag zur Risikoabschätzung zu liefern, untersucht man vulkanische Proben im Labor.

Die Bandbreite der Analyse-Möglichkeiten im Labor ist quasi unendlich. Zwar sind derartige Laboruntersuchungen in der Regel nicht darauf ausgelegt, Vulkanausbrüche vorherzusagen. Aber eines kann man im Labor sehr gut: Neben dem Zeitpunkt einer gewünschten Untersuchung, lassen sich auch die Rahmenbedingungen festlegen. Was bedeutet das? Während man an aktiven Vulkanen hoffen muss, dass zum Zeitpunkt der Geländearbeit ein Ausbruch stattfindet und die äußeren Bedingungen passen, können Forschende im Labor selbst bestimmen, was wann wie schnell ablaufen soll. Ein Prozess oder ein



**Abb.2:** Im experimentellen Aufbau, dem „Vulkan im Keller“, können die Bedingungen während explosiver Vulkanausbrüche simuliert werden. Hochgeschwindigkeitskameras filmen die hochdynamischen Prozesse innerhalb der Laborvulkans (transparenter Autoklav Bildmitte, s. auch Abb. 3) sowie nach dem Auswurf in die Atmosphäre (s. Abb. 4). Ein Autoklav ist ein Hochdruck- und Hochtemperaturbehälter, in dem vulkanische Bedingungen simuliert werden können. Foto: Vanessa Helmbrecht und Dr. Ulrich Küppers

Vulkanausbruch findet also genau dann statt, wenn die Wissenschaftler\*innen bereit für eine Beobachtung sind.

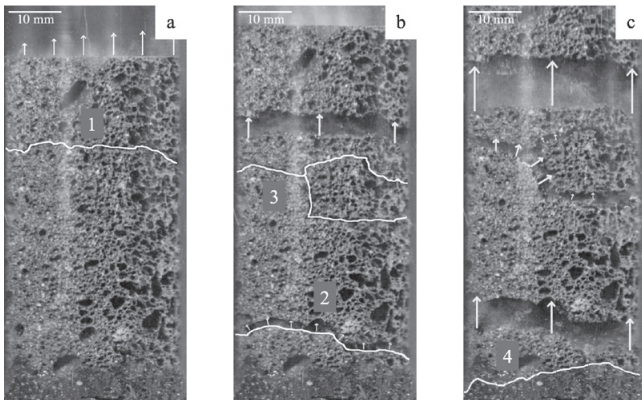
Dabei ist jedoch zu beachten: Laborexperimente sind von reduzierter Komplexität als natürliche Vorgänge an echten Vulkanen (Abb. 1). Die reduzierte Komplexität von Laborexperimenten bzw. -messungen bietet jedoch Vorteile: Die bewusste Vereinfachung erlaubt wiederholbare Laborexperimente. Dabei können alle Rahmenbedingungen konstant beibehalten und gleichzeitig nur ein einzelner Parameter gezielt geändert werden. Auf diese Weise lässt sich der Einfluss dieses veränderten Parameters ermitteln. Sobald dieser Einfluss bekannt ist, geht man zu weiteren Experimentreihen über und ändert einen anderen Parameter.

Unsere Laboruntersuchungen an der Ludwig-Maximilians-Universität in München eröffnen uns insbesondere zweierlei Möglichkeiten: Erstens erlauben sie die Bestimmung textueller Parameter von Proben verschiedener Vulkane bzw. mehrerer Ausbrüche eines Vulkans. Dazu zählen der Gehalt von Kristallen und/oder Gasblasen sowie deren Art und Größe. Zweitens können materialwissenschaftliche Messungen Verhalten natürlicher oder analoger Proben unter exakt kontrollierbaren Rahmenbedingungen bestimmen. Das

betrifft die Viskosität des Magma bezogen auf Zusammensetzung, Temperatur oder Deformationsrate. Dabei darf man sich unser Vulkanlabor nicht wie einen echten Vulkan im Miniaturformat vorstellen. Es handelt sich vielmehr um viele High-Tech-Spezialinstrumente, die die physikalischen Gegebenheiten am Vulkan nachstellen und so beschaffen sein müssen, dass sie zum Beispiel besonders hohen Druck oder hohe Temperaturen aushalten (Abb. 2).

Vulkanausbrüche können effusiv oder explosiv sein (ESKP-Redaktion, 2020). Beide Arten kann man im Labor künstlich nachstellen – jedoch immer in kleinerem Maßstab. Die physikalischen Gesetze, die einem Vulkanausbruch zugrunde liegen, sind bekannt. Was in der Natur an keinem Vulkan möglich ist, funktioniert im Labor: Man kann im Labor die Uhr nach einem Vulkanausbruch stellen. Das heißt, die richtige Wahl der Experimentalparameter schafft die Möglichkeit, den „Ausbruchszeitpunkt“ minutiös festzulegen.

Dazu ein Beispiel: Lava fließt als Funktion von chemischer Zusammensetzung und Temperatur mit einer bestimmten Leichtigkeit. Lava verändert sich beim Abkühlen, es wachsen Kristalle und Gasblasen und die Lava wird zähflüssiger. Diese dynamischen Veränderungen können auch



**Abb.3:** Im Zuge explosiver Vulkanausbrüche dehnt sich Gas, welches sich unter Überdruck in Blasen Hohlräumen befindet, schlagartig aus und zerbricht dabei das umgebende aufsteigende Magma in unterschiedlich großer Fragmente (Asche (< 2 mm), Lapilli (< 6,4 cm) und Bomben genannt), welche aus dem Vulkan ausgeschleudert werden, hier veranschaulicht in transparenten Laborexperimenten. Foto: Vanessa Helmbrecht, Dr. Ulrich Küppers und Dr. Bettina Scheu

dazu führen, dass Lava trotz hoher Temperatur nicht mehr fließen kann. Jede Flüssigkeit kann nur bis zu einem bestimmten Maße mit Fließen auf die äußeren Rahmenbedingungen reagieren. Verändert sich ein Parameter, kann es sein, dass die Natur nur eine Antwort auf diese geänderten Rahmenbedingungen zulässt: Zerbrecen. Im Zuge explosiver Vulkanausbrüche wird Magma, welches bei einer Temperatur von ca. 800–1200 °C in Richtung Erdoberfläche aufsteigt, durch ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren zerbrochen. „Zerbrecen“ klingt für eine Flüssigkeit ungewöhnlich, aber es stimmt: Eine Flüssigkeit – und Magma ist eine Flüssigkeit – kann brechen. Das kann durch Abkühlung geschehen, aber nicht nur. Die meisten Magmen fließen unterhalb von 700 °C nicht mehr. Bei explosiven Ausbrüchen werden jedoch mitunter Temperaturen über 1.000 °C festgestellt. Verantwortlich für das Zerbrecen ist hier die Deformationsrate.

Im Labor kann man all diese Faktoren bestimmen und festlegen. Die treibenden Kräfte hinter explosiven Vulkanausbrüchen sind Gase, die ehemals im Magma gelöst waren und nach Übersättigung Blasen gebildet haben. In diesen Blasen

kann sich beträchtlicher Druck aufbauen. Die Blasen versuchen, diesem Druck stattzugeben, indem sie sich ausdehnen, jedoch sind diesem Volumenwachstum in der Erdkruste Grenzen gesetzt. Der herrschende Druck will vom Magma ebenfalls durch Verformung abgebaut werden, in der Regel durch Fließen. Dieser Prozess hat jedoch bestimmte materialabhängige Grenzen. Werden diese Grenzen überschritten, zerbricht das Magma (Abb. 3) und aus dem Vulkan wird ein Gemisch aus Gasen und Gesteinsbruchstücken ausgeworfen (Abb. 4).

Solche explosiven Vulkanausbrüche bei magmatischen Temperaturen lassen sich nur in wenigen Laboren nachstellen, u. a. in München, Mainz oder Würzburg. Mit der richtigen Probenauswahl und den richtigen Rahmenbedingungen im Labor können die Wissenschaftler\*innen Einblicke in an aktiven Vulkanen beobachtete Phänomene erlangen, die in der Natur nicht so einfach möglich sind. Bei Live-Beobachtungen an „echten Vulkanen“ sehen wir nur die Phänomene oberhalb der Erdoberfläche, im Labor können wir dagegen auch in die Vulkane hineinschauen.

Die Forschung in vulkanologischen Laboren trägt maßgeblich zu einem besseren und vor allem quantitativen Verständnis von Vulkanausbrüchen bei. Damit handelt sich um wirkliche Grundlagenforschung, die in den Vulkanlaboren betrieben wird. Weitere Forschungsfragen sind neben der Bestimmung des Ausbreitungszeitpunkts und der Beschaffenheit von Magma und Lava auch die Simulation von Eruptions- und Aschewolken, die weltweit gravierende Auswirkungen haben können. Aber auch die physikalischen Prozesse, die innerhalb einer Aschewolke ablaufen, können unter kontrollierten Bedingungen besser untersucht werden: zum Beispiel Vulkanblitze über dem Schlotausgang und Gewitter in den Vulkanwolken. Erkenntnisse hier können beispielsweise helfen, das Risiko von Vulkanausbrüchen und Vulkanasche für den Flugverkehr besser einzuschätzen. Selbst die Ausbrüche von submarinen Vulkanen lassen sich simulieren und dadurch besser verstehen. Echtzeit-Ausbrüche von Vulkanen im Meer lassen

sich unter wissenschaftlicher Begleitung in der Natur nur äußerst selten beobachten.

Bei der Konfiguration der Experimente greifen die Forscherinnen und Forscher auf bereits erhobene Daten vergangener Ausbrüche zurück. Jetzt könnte man behaupten, man verstehe dadurch ausschließlich Prozesse, die bereits zum Teil in der Vergangenheit zurückliegen. Moderne Vulkanforschung heute hat aber mehrere Standbeine: Geländearbeit mit Beschreibung von Ablagerungen vergangener Ausbrüche, die engmaschige wissenschaftliche Beobachtung von Live-Ausbrüchen, Laboruntersuchungen und numerische und probabilistische Studien. Nur in enger Zusammenarbeit und gegenseitiger Verwendung neuester Erkenntnisse wird es eines Tages möglicherweise gelingen, Art, Beginn und Ende eines Ausbruchs mit hoher Wahrscheinlichkeit vorherzusagen.

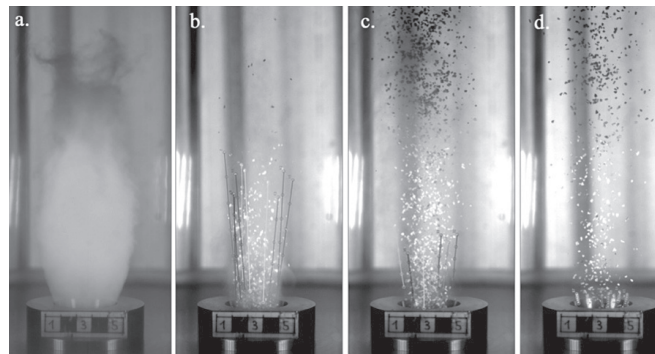


Abb. 4 zeigt den Auswurf von Partikeln nach einem experimentellen Vulkanausbruch. Die Abbildungen b, c und d sind zunehmend später nach Beginn des Ausbruchs aufgenommen und visualisieren farblich die Geschwindigkeit der Partikel (jeweils eine Linie ist ein Partikel über 5/10.000 Sekunden). Die Auswurfgeschwindigkeit ist am Anfang maximal (hier bis zu 180 m/s) und nimmt dann nichtlinear ab. Die abgebildeten Ziffern (1, 3, 5) markieren den Maßstab in Zentimetern.

Foto: Carina Poetsch und Dr. Ulrich Kueppers

## Referenzen

- Cigala, V., Kueppers, U., Peña Fernandez, J. J., Taddeucci, J., Sesterhenn, J. & Dingwell, D. B. (2017). The dynamics of volcanic jets: Temporal evolution of particle exit velocity from shock-tube experiments. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, 122(8), 6031-6045. doi: 10.1002/2017JB014149
- Cimarelli, C., Alatorre-Ibargüenito, M. A., Kueppers, U., Scheu, B. & Dingwell, D. B. (2014). Experimental generation of volcanic lightning. *Geology*, 42(1), 79-82. doi: 10.1130/G34802.1
- ESKP-Redaktion. (2020). Wie lassen sich Vulkane unterscheiden? In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 10-12). Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.1.1
- Kueppers, U., Perugini, D. & Dingwell, D. B. (2006). „Explosive energy“ during volcanic eruptions from fractal analysis of pyroclasts. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(3-4), 800-807. doi:10.1016/j.epsl.2006.06.033
- Peña Fernández, J. J., Cigala, V., Kueppers, U. & Sesterhenn, J. (2020). Acoustic analysis of starting jets in an anechoic chamber: implications for volcano monitoring. *Scientific Reports*, 10:13576. doi:10.1038/s41598-020-69949-1



## 2. Gesellschaft und Vulkanismus

### Einleitung

Die Auswirkungen von Vulkanausbrüchen können ganze Gesellschaften beeinflussen. Ob Landwirtschaft oder Flugverkehr, in vielen Bereichen kommt es auf intensives Vulkanmonitoring an. Insbesondere Megacities wie Mexiko-Stadt, Manila oder Auckland, die in der Nähe bzw. direkt auf einem aktiven Vulkanfeld liegen, sind besonders gefährdet. Gibt es Grenzen des Managements von Vulkangefahren, etwa bei Supereruptionen? Und warum üben Vulkane eine so große Faszination, dass sie zu einem Hauptmotiv für Naturkatastrophenfilme wurden? Im nachfolgenden Kapitel wollen wir diesen Fragen nachgehen.

### Themen-Überblick

---

- ▶ Umgang mit Naturgewalten – Verhalten an aktiven Vulkanen
- ▶ Lassen sich vulkanische Risiken managen?
- ▶ Wo genau können neue Vulkane entstehen?
- ▶ Die Bedeutung von Informationen zu Vulkanausbrüchen für den Flugverkehr
- ▶ Vulkanausbruch auf Island: Was lässt sich für die Risikoversorge lernen?
- ▶ Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung von Vulkanasche
- ▶ Mit Katastrophen unterhalten. Zur Faszination von Vulkanen im Film

## Umgang mit Naturgewalten – Verhalten an aktiven Vulkanen

Edgar Zorn (Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

**Eine gute Vorbereitung auf Touren an aktiven Vulkanen kann Leben retten. Empfehlungen hierzu geben Experten des Helmholtz-Zentrums Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.**

- Bei Reisen in Regionen mit aktiven Vulkanen sollte geprüft werden, ob der eigene Urlaubsort in einem potentiell gefährdeten Gebiet liegt.
- Plant man Vulkanwanderungen, ist es sehr wichtig, die aktuelle Aktivität des Vulkans zu kennen. Infos dazu bieten Touristeninformationen und lokale Behörden. Einige Länder verfügen über ein Ampelsystem, das anzeigt, wie aktiv der Vulkan ist.
- Beim Besuch eines aktiven Vulkans sollte man sich auf eine Vielzahl verschiedener Naturgefahren einstellen, die auch von lokalen Gegebenheiten abhängen können (z. B. Hangrutsche). Daher ist es sehr zu empfehlen, vor dem Besuch lokale Experten zu konsultieren und eine Wandertour möglichst mit ausgewiesenen Führern durchzuführen.

Die unbändige Kraft aktiver Vulkane übt schon seit jeher eine magische Anziehungskraft auf Menschen aus. Imposante Lavafontänen, mächtige Lavaströme, der Austritt vulkanischer Gase an sogenannten Fumarolen, aber auch die durch die Feuerberge geprägten beeindruckenden Landschaften machen Vulkane ohne Zweifel zu beliebten Ausflugs- und Wanderzielen.

Vulkane stellen eine unberechenbare Naturgewalt dar, die jederzeit eine mittel- und unmittelbare Gefahr darstellen kann. Dies ist leider nicht immer allen Besucherinnen und Besuchern eines Vulkans bewusst, wie aktuelle Fälle am Vulkan Whakaari (White Island, Neuseeland) oder an der Solfatara (Italien) bezeugen. Durch richtige Vorbereitung und entsprechendes Verhalten jedoch können Sie das Risiko eines Unfalls minimieren. Im Folgenden werden einige wichtige Grundregeln erläutert, die Sie beim Besuch eines aktiven Vulkans kennen sollten.

### Urlaub in Gebieten mit vulkanischer Aktivität

Gibt es aktive Vulkane oder sogar gerade einen Vulkanausbruch an Ihrem Urlaubsort, bedeutet dies nicht unbedingt, dass Sie Ihre Reise absagen oder Ihre Reiseroute ändern sollten. Aber gerade dann ist es besonders wichtig, sich mit den lokalen Risiken vertraut zu machen. Der erste Schritt wäre überhaupt festzustellen, ob Ihr konkretes Wunschziel für den Urlaub in einem potentiell gefährdeten Gebiet liegt. Diese Informationen können meist auf den Webseiten der lokalen Behörden in Erfahrung gebracht werden (siehe dazu ESKP-Linksammlung „Wo finden Reisende aktuelle Vulkaninformationen zu Vulkanaktivitäten?“). Das ist allerdings nicht immer ganz einfach, weil diese Informationen für unerfahrene Urlauber oft nicht leicht zu finden sind und nicht immer in allen Sprachen veröffentlicht werden. Im Zweifelsfall können Sie bei Ihrer Unterkunft oder bei Touristen- und Reisebüros solche Informationen erfragen.

Kommt es unmittelbar vor oder während Ihres Urlaubs zu einem Ausbruch, so sollten Sie aufmerksam die lokalen Nachrichten verfolgen. Gibt es Warnungen? Wir empfehlen zwingend vorhandene Sperrungen und Evakuierungsempfehlungen von offizieller Seite zu beachten.

Selbst in größerer Entfernung zum Vulkan kann es bei starken Ausbrüchen zu Aschefall kommen. In einem solchen Fall ist es am besten, wenn Sie das Haus nicht verlassen bis der Aschefall nachgelassen hat. Sollten Sie dennoch rausgehen müssen, halten Sie sich ein Tuch oder etwas Kleidung vor Mund und Nase. Atmen Sie die Asche nach Möglichkeit nicht ein, da Asche die Atemwege verkleben kann. Fällt sehr viel Asche, kann dies auch eine starke Belastung für die Dächer von Häusern bedeuten und im schlimmsten Fall können Dächer einstürzen. Beachten Sie außerdem, dass selbst leichter Ascheregen jeden Flughafen lahmlegen wird. Manchmal dauert eine Sperrung, wenn die Windrichtungen wechseln, auch nur ein paar Stunden, aber planen Sie solche Eventualitäten bei Ihrer Reise mit ein.

Manche Inseln oder Küstenorte an Vulkanen haben nahe den Strandgebieten Warnschilder zu Tsunamis, wie z. B. am Stromboli in Italien. Tsunamis werden durch Flanken-Rutschungen im Wasser ausgelöst und sind sehr gefährlich. Machen Sie sich also mit den Fluchtrouten und den Warnzeichen vertraut, z. B. örtlichen Sirenen. Ändert sich sehr plötzlich der Wasserstand im Meer, ist dies ein Anzeichen für einen bevorstehenden Tsunami.

### Im Vorfeld einer Wanderung

Das Wichtigste in der Vorbereitung ist der Blick auf die Karte und die Wettervorhersage. Sorgfältige Planung heißt auch, die Länge, Höhendifferenz und Schwierigkeit der Route zu kennen und Zeit zur Akklimatisation einzuberechnen. Oft sind Vulkane steile Berge, wo Unfälle durch schwieriges Gelände oder durch sich schnell verschlechterndes Wetter ein viel größeres Risiko darstellen als der Vulkan selbst. Erfahrene Bergwanderer wissen, wie rasch sich das Wetter in Höhenlagen ändern und wie deutlich es sich



Abb. 1: Gute Vorbereitung für eine Tour an aktiven Vulkanen ist essentiell: Die Grafik gibt einen Überblick über die wichtigste Ausrüstung.

Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de / CC BY 4.0

vom Wetter im Tal unterscheiden kann. So sollte eine Tour auf Vulkanen auch mit der angemessenen Vorsicht und Ausrüstung angetreten werden.

Es ist ebenfalls sehr wichtig, die aktuelle Aktivität des Vulkans zu kennen. Für die meisten bekannten Vulkane gibt es an den Touristeninformationen oder den Behörden regelmäßige Meldungen zur Aktivität. Die meisten Länder haben dazu ein Ampel- oder Stufensystem, das verständlich anzeigt, wie aktiv der Vulkan ist. Dazu gehören meist Informationen über geöffnete und gesperrte Wege oder Bereiche. Diese Hinweise sollten unbedingt beherzigt werden, manche Gefahren sind für Besucher nicht ohne weiteres erkennbar. Gegebenenfalls können Sie auch einen lokalen Reiseführer anheuern, der Ihnen nicht nur Sicherheit gibt, sondern die Tour häufig auch durch Wissenswertes über den Vulkan interessanter macht.

Zur Vorbereitung auf eine Vulkantour müssen Sie sich der Klimazone und Höhe der Wanderung entsprechend kleiden und ausrüsten. Stellen Sie

sich beispielsweise an steilen Bergen auf starken und kalten Wind ein. Verpflegung, insbesondere ausreichend Trinkwasser ist, wie bei jeder Wanderung, sehr wichtig. Speziell für Vulkane sollten Sie aber feste und robuste Wanderschuhe tragen, da Wege häufig über loses Geröll führen und Lavafelsen messerscharf sein können. Falls Sie klettern oder steile Geröllwände besteigen, ist ein Helm unerlässlich. Führen Sie zudem immer ein Handy oder Satellitentelefon mit, für den Fall, dass etwas Unvorhergesehenes passiert. Falls dies nicht möglich ist oder Sie wie in vielen einsameren Gegenden ohnehin keinen Handy-Empfang haben, dann setzen Sie vorab vertraute Personen über Ziel, Route und Rückkehr in Kenntnis.

### Gefahren an Vulkanen

An Vulkanen zu wandern, ist bei entsprechender Vorsicht nicht unbedingt gefährlich. Aber gerade an aktiven Vulkanen gibt es durchaus einige Gefahren, auf die man achten sollte.

Auch wenn ein Vulkan nicht ausbricht, treten oft an Fumarolen heiße Gase und Dämpfe aus. Unerfahrene Besucher sollten Abstand halten. Ein Aufenthalt in Ihrer Nähe kann mitunter sehr ungesund sein, der menschliche Geruchssinn täuscht hier nicht. Ein fauliger Geruch nach verdorbenen Eiern, ist ein Zeichen für Schwefelgase in der Luft. Vulkanische Gase sind teils stark ätzend und brennen unangenehm in Mund und Nase. Bei empfindlichen Menschen droht Übelkeit und Atemnot. Außerdem kann man sich an heißen Fumarolen auch verbrühen: Temperaturunterschiede zwischen den austretenden Gasen und der kühlen Umgebungsluft von bis zu mehreren hundert Grad möglich.

Nicht alle Gase aus Fumarolen sind wahrnehmbar. Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) ist klar und geruchlos. Es ist außerdem schwerer als andere Gase und konzentriert sich daher in Bodennähe. Normalerweise stellt dies kein Problem dar, da sich  $\text{CO}_2$  erst in höherer Konzentration sammeln muss, um gefährlich zu werden. Genau dies kann jedoch in Senken passieren. Daher sollten Sie sich nicht in tiefe Krater begeben, ohne das Risiko zu kennen!

Auch bei Höhlen sollte man entsprechend vorsichtig sein. Achten Sie auf das Wetter, denn an windstillen Tagen ist das Risiko höher, weil weniger Luftaustausch stattfindet.

Sollte ein Ausbruch an einem Vulkan erst kürzlich vorüber sein, so gibt es möglicherweise noch frische Lavaströme oder andere Ablagerungen. Diese können unter Umständen stellenweise noch heiß sein oder wie Fumarolen entgasen.

An Vulkanen mit steilen Hängen und viel Lockermaterial sollte beim Besteigen außerdem auf Steinschläge geachtet werden. Gerade wenn man in einer Gruppe unterwegs ist, kann der Vordermann leicht Steine oder sogar Felsen lösen, die dann den Hang hinabrollen. Bewegen Sie sich entsprechend stets mit Bedacht und nicht überhastet: Selbst auf den ersten Blick stabil wirkende Felsen sind nicht zwingend fest. Ein Helm ist in solchen Gelände-Situationen ein unbedingtes Muss.

Heiße Quellen sind bekannt als natürliche Stellen mit warmem und/oder sprudelndem Wasser und laden in einigen Vulkanregionen Besucher auf ein Bad ein. Doch diese Quellen sind nicht ohne Risiko: Das Wasser kann an einigen Stellen zu heiß werden und es kann sogar saurehaltig oder giftig sein. Baden Sie daher nur an wirklich gut bekannten und ausgewiesenen Badestellen. Meiden Sie hingegen unbekannte, vermeintlich nett anmutende Wasserstellen oder Tümpel. Vor allem dann, wenn diese eine farbliche Trübung haben.

### Touren zu Ausbrüchen

An einigen Vulkanen können Touristen das Naturschauspiel eines Vulkanausbruchs hautnah erleben und teilweise mit einem Touren-Führer bis an den Krater gehen, sogar während dieser ausbricht. Vulkane wie der Stromboli in Italien oder der Yasur in Vanuatu sind gute Beispiele hierfür. Aber auch der Ätna auf Sizilien ist dafür bekannt, dass bei Ausbrüchen bestimmte Touren angeboten werden. Hier sollte man darauf achten, dass diese Art Ausflüge grundsätzlich nur mit ausgewiesenen Führern bei seriösen Veranstaltern

gemacht werden (und meist auch nur so gemacht werden dürfen). Auch ist es sehr wichtig, dass Sie sich strikt an die Anweisungen der Führer halten. Manchmal kann es sehr schnell gefährlich werden, wenn man nur an der falschen Stelle stehen bleibt. Zwar können diese Touren einzigartige Erfahrungen und Naturschauspiele bieten, dennoch sollten sie sich der möglichen Gefahren und des Risikos unvorhergesehener Ausbrüche bewusst sein. An allen eingangs erwähnten Vulkanen hat es in der Vergangenheit schon lebensbedrohliche oder tödliche Unfälle gegeben.

### Der Worst Case: Verhalten im Falle eines plötzlichen Ausbruchs

Sofern Sie sich gut auf einen Besuch am Vulkan vorbereitet haben und auch über die Aktivität informiert sind, ist es sehr unwahrscheinlich, dass Sie von einem plötzlichen Ausbruch überrascht werden. Dennoch bleiben Vulkane immer unberechenbar. Zu komplex sind die Wechselwirkungen zwischen Magma, Wasser, Erdbeben und Wettergeschehen, als dass Vulkane wirklich verstanden sind. Mögliche Warnzeichen werden auch von offiziellen Stellen nicht immer rechtzeitig wahrgenommen. Somit ist der Besuch von aktiven Vulkanen nie ganz ohne Risiko. Auch an beliebten Touristenzielen, an denen teilweise jeden Tag hunderte Menschen über den Vulkan laufen, sind so schon Unfälle passiert – so im Dezember 2019 auf White Island (Maori: Whakaari) in Neuseeland. Es sollte betont werden, wie selten solche Vorkommnisse sind. Doch wenn Sie in eine solche Situation geraten, haben Sie in der Regel keine Zeit, einen Ratgeber aufzuschlagen und richtige Verhaltensweisen zu studieren. Prägen Sie sich deshalb am besten die folgenden Verhaltensregeln im Vorfeld einer Vulkantour ein.

**Ruhe bewahren:** Dies gilt generell bei allen Katastrophen. Ein Vulkanausbruch bildet hier keine Ausnahme. In solchen Notfällen müssen Sie schnell die Situation einschätzen und entsprechend handeln. Daher ist es wichtig, dass Sie stets Ruhe bewahren. Blindlings im falschen Moment davonlaufen, kann ein folgenschwerer Fehler sein.

**Gefahren an Vulkanen erkennen:** Dies ist gerade für Laien unter Zeitdruck nicht einfach. Aber die hier im Folgenden beschriebenen Gefahren und Verhaltensempfehlungen können Ihnen als erste Richtlinie im Gefahrenfall dienen. Grundsätzlich gilt: Sie sollten in jedem Fall den Vulkan bei Gefahr so schnell wie möglich verlassen. Aber je nach nachdem, welche Gefahr plötzlich auftritt, müssen Sie zunächst unterschiedlich reagieren:

- **Bei einer plötzlichen Explosion:** Diese kann sich manchmal langsam und mit zischenden Geräuschen aufbauen oder auch direkt mit einem markerschütternden Knall auftreten. Die Hauptgefahr hierbei geht von herabfallenden Steinen und vulkanischen Bomben aus. Hier ist es sehr wichtig, dass Sie sich nicht sofort umdrehen und wegrennen, sondern im Gegenteil, hinsehen und schauen, ob Steine oder Felsbrocken hochgeschleudert werden. Sollte Gesteinsmaterial auf Sie zukommen, haben Sie bessere Chancen, wenn Sie die Situation durchweg beobachten und ausweichen können. Schützen Sie vor allem Ihren Kopf. Haben Sie keinen Helm dabei, dann ziehen Sie Ihren Rucksack über und suchen Sie bei Gelegenheit hinter großen Felsen oder Klippen Schutz. Sobald der Steinhagel nachlässt, verlassen Sie das Gefahrengebiet vorsichtig.
- **Asche und Dampf:** Durch Eruptionen ausgestoßene Wolken können in verschiedenen Mischungen aus Wasserdampf, giftigen Gasen, Asche und Staub bestehen. Auch können die Wolken sehr heiß sein. Nach Möglichkeit sollte man deshalb nicht hineingeraten. Falls dies dennoch passiert, atmen Sie durch ein angefeuchtetes Tuch oder notfalls durch ein Stück Kleidung. Die giftigen Schwefelgase bilden zusammen mit Feuchtigkeit Säure, die in den Augen und im Mund brennt. Ein Stück Stoff vor dem Gesicht kann diese Säure etwas abhalten sowie kühlen. Ansonsten kann etwas Abhilfe dadurch geschaffen werden, dass Sie sich das Gesicht mit Wasser abwischen. Versuchen Sie in solchen Asche- und Dampfvolken trotzdem die Orientierung zu behalten. Oft wehen die Wolken schnell weiter. Falls nicht, versuchen Sie sich aus der Wolke herauszubewegen.

- **Risse und Spalten öffnen sich und/oder Lava tritt aus:** Lava muss nicht immer am Hauptkrater eines Vulkans austreten. Sie kann unterirdisch fließen und an Rissen und Spalten an anderer Stelle zutage treten. Sollten Sie derartige Lavabewegungen beobachten, halten Sie Abstand zu diesen Rissen und der Lava. Die Lava wird dem abschüssigen Gelände folgend in Senken fließen. Suchen Sie deshalb höheres Gelände auf. Grundsätzlich gilt: Solange Sie einem Lavaströmung nicht zu nahekommen, sind Sie relativ sicher. Behalten Sie jedoch im Hinterkopf, dass über solche Spalten sehr schnell ungeheure Mengen Lava gefördert werden können. Geben Sie daher Acht, dass Sie von der Lava nicht eingeschlossen werden.
  - **Pyroklastische Ströme:** Diese Ströme sehen wie schnell bergab fließende Wolken aus und sind extrem gefährlich. Hinter der sich bildenden Vulkanwolke steckt eine Lawine aus heißem Gestein, Asche und Gasen, die bei starken Explosionen oder dem Abbruch von zähflüssiger Lava entstehen können. In kleinerer Form können solche Ströme auch bei Explosionen mit Wasserdampf entstehen (sogenannte Surges). Sie haben ein ähnliches Erscheinungsbild wie Schneelawinen, können aber über 800 °C, in Einzelfällen sogar bis 1.000 °C, heiß und mehrere hundert Kilometer pro Stunde schnell werden. Hier ist Ihre einzige Chance, dem Strom auszuweichen. Suchen Sie schnell erhöhtes Gelände auf. Sollten Ausläufer der Wolke Sie dennoch erreichen, schützen Sie Ihre Atemwege mit einem feuchten Tuch und verdecken Sie Ihre Haut so gut es geht, um schwere Verbrennungen nach Möglichkeit zu vermeiden.
  - **Schlammströme:** Schlammströmen geht nicht zwangsläufig ein Vulkanausbruch voraus. Sie entstehen dann, wenn sich Asche mit Regenwasser vermischt. Grundsätzlich empfiehlt es sich, nicht direkt nach starken Regenfällen oder Schneeschmelzen auf eine Vulkanwanderung zu gehen. Wird man während einer Vulkanwanderung von Regenfällen überrascht, ist Aufmerksamkeit gefordert. Besonders gilt das, wenn Sie sich einem Wasserlauf befinden. Dann sollten Sie sich umgehend in höheres Gelände begeben, noch bevor der Wasserspiegel ansteigt. Ist ein erhöhtes Wasserrauschen zu hören, ist dies ein deutliches Warnsignal, dass Sie den Wasserlauf schnell verlassen sollten.
- Präventiv denken:** Wenn es zu einem Ausbruch kommt, ist es sehr hilfreich, das Gelände zu kennen. So kann man eventuell Fluchtwege oder schützende Unterstände (z. B. Felsvorsprünge) ausmachen. Selbst wenn es nicht zu einem Ausbruch kommt, kann dies bei der Orientierung hilfreich sein. Prägen Sie sich also bei Wanderungen auf Vulkanen möglichst stets den Weg ein, den Sie gegangen sind.
- Hilfeverständigung:** Gerade in einsamen Gegenden werden kleine Ausbrüche nicht immer sofort bemerkt. Führen Sie daher immer ein Handy, oder – falls es keinen Empfang gibt – ein Satellitentelefon sowie lokale Notrufnummern mit sich. Geben Sie den entsprechenden Stellen die nötigen Informationen für die Organisation einer Rettung. Hierunter fällt beispielsweise immer die Information darüber, wo sie sich genau befinden, wie viele Personen betroffen sind, ob es Verletzte gibt oder ob Sie festsitzen und der Fluchtweg versperrt ist. Um genaue Ortsangaben zu ermöglichen, empfiehlt es sich, einen GPS-Tracker dabei zu haben.

## Referenzen

- Krippner, J. (2019). So you want to visit an active volcano? [Blog „In the Company of Volcanoes“, [inthecompanyofvolcanoes.blogspot.com](http://inthecompanyofvolcanoes.blogspot.com)]. Aufgerufen am 04.06.2020.
- World Organization of Volcano Observatories – WOVO. (o.D.). Members' Observatories Directory [[www.wovo.org/observatories](http://www.wovo.org/observatories)]. Aufgerufen am 04.06.2020.
- Walter, T. (2017). Merkblatt Vulkan. Vulkanische Gefahren und Verhaltensweisen bei Vulkanausbrüchen – Sichere Planung vor Wanderungen auf aktive Vulkane [[www.gfz-potsdam.de](http://www.gfz-potsdam.de)]. Aufgerufen am 28.09.2020.
- Zorn, E. (2017, 29. November). Aktuelle vulkanische Krise am Mount Agung. *Earth System Knowledge Platform* [eskp.de], 4. Aufgerufen am 04.06.2020.

## Lassen sich vulkanische Risiken und eventuelle Katastrophen managen?

Oliver Jorzik (Earth System Knowledge Platform | ESKP)

Bei der Beobachtung von Vulkanen und der Einschätzung von Risiken hat die Wissenschaft in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte gemacht. Aber greifen diese Erkenntnisse auch, wenn es um vulkanische Großereignisse geht wie zum Beispiel Supereruptionen? Der britische Vulkanologe Clive Oppenheimer hat sich in seinem Standardwerk „Eruptions that Shook the World“ dieser Frage gewidmet.

- Vulkanausbrüche verschiedenster Art können erhebliche Auswirkungen nach sich ziehen.
- Diese müssen keineswegs lokal oder regional begrenzt sein, sondern können globale Maßstäbe annehmen.
- Es ist wichtig, entsprechende Szenarien durchzuplanen, um vorbereitet zu sein.

Jede Naturkatastrophe – große Überschwemmungen, schwere Stürme oder starke Erdbeben – zeigt sehr schnell die Grenzen menschlichen Handelns auf, wenn es darum geht, Leben zu schützen. Gerade ärmere Staaten und Regionen sind hier besonders gefährdet, ist doch die vorhandene Infrastruktur oftmals nicht ausreichend, um schnelle Evakuierungs- und Rettungsaktionen zu starten oder Verletzte angemessen zu versorgen.

Mit der Analyse historischer Naturkatastrophen lassen sich Szenarien potentieller zukünftiger Ereignisse abschätzen. Die Analyse ermöglicht auch das Ableiten der Schwere und Intensität dieser Ereignisse. Darauf aufbauend lassen sich Wahrscheinlichkeiten für deren Eintritt berechnen, Gefahren einschätzen, Vorwarnungen und Auswirkungen auf weitere Umweltsysteme wie das Klima untersuchen. Im Idealfall lassen sich vorausschauende Maßnahmen planen, um sich auf derartige schwere Ereignisse vorzubereiten. Dies gilt auch für Vulkanereignisse.

Schätzungen zufolge leben rund 10 Prozent der Weltbevölkerung in einer Entfernung von 100

Kilometern zu aktiven oder ruhenden Vulkanen. Die Gefahren, die von Vulkanausbrüchen ausgehen können, sind daher vielfältig. Sie reichen vom Verlust menschlichen Lebens, bis hin zu materiellen Verlusten und schweren Schäden an Infrastrukturen. Je nach Schwere können Vulkanausbrüche globale Auswirkungen auf das Klima und die Landwirtschaft haben. Das öffentliche Leben kann in den betroffenen Regionen weitgehend zum Erliegen kommen, wenn Strom-, Gas- und Wasserversorgung beeinträchtigt oder Verkehrs- und Straßensysteme beschädigt sind. Aber auch die Wirtschaft in Regionen, die weiter entfernt vom Ausbruchsort liegt, kann stark leiden, wenn Lieferketten plötzlich unterbrochen sind und der Luftverkehr zum Stillstand kommt.

### Drei Basisszenarien für schwere Vulkanereignisse

Der britische Vulkanologe Clive Oppenheimer hat in seinem Standardwerk zu Vulkanen „Eruptions that Shook the World“ drei mögliche Szenarien für Vulkanausbrüche entworfen, die mit massiven Auswirkungen auf Menschen verbunden sind (Oppenheimer, 2011). Diese drei

Szenarien verknüpft Oppenheimer mit den daraus resultierenden Gefahren und Risiken. Er nennt als Szenarien:

- **Plinianische Eruptionen:** Dabei handelt es sich um besonders starke explosive Ausbrüche, die dann sehr gefährlich sein können, wenn sie sich in der Nähe von großen Städten ereignen. Historisch kann man die Folgen einer Plinianischen Eruption am Beispiel des Untergangs der römischen Städte Pompeji und Herculaneum erkunden.
- **Große Lava-Eruptionen:** Dies sind Eruptionen, die mit enormen Gas- und Partikelaustritten verbunden sind, denen eine großräumige Verschmutzungskrise folgen kann. Ein historisches Beispiel hierfür ist der Ausbruch der isländischen Laki-Krater in den Jahren 1783 und 1784. In der Folge dieses Großereignisses in den 130 Einzelkratern des isländischen Kraterfeldes kam es zu einer Verdunkelung der Erdatmosphäre, die zu einem sogenannten vulkanischen Winter und Missernten in vielen Regionen führte. Gaswolken mit einem hohen Anteil an giftigem Fluor führten in Island zu einer Hungersnot, durch die Schätzungen nach 20 Prozent der Bevölkerung ums Leben kam.
- **Supereruptionen,** wie der Ausbruch des Vulkans Toba auf der Insel Sumatra vor 75.000 Jahren können weltweit große Auswirkungen haben. Sie können aber auch schwerwiegende globale Folgen für Klima, Landwirtschaft, Kommunikations- und Transportsysteme nach sich ziehen.

### Plinianische Eruptionen

Oppenheimer führt die drei von ihm beschriebenen Basisszenarien weiter aus. So beurteilt er die Gefährlichkeit Plinianischer Eruptionen vor dem Hintergrund einer wachsenden Weltbevölkerung. Aktuell lebt mehr als die Hälfte der Menschheit in Städten und jeder fünfte Erdbürger in einer Millionenmetropole. Der Zuzug vom Land in diese immer größer werdenden urbanen Gebiete hält weiter an. Wissenschaftler sprechen vor diesem Hintergrund auch von einem „Umzug der Menschheit“. Viele dieser boomenden Städte

liegen nicht nur in aktiven Vulkanregionen wie rund um den Pazifischen Feuerring. Oftmals handelt es sich auch um Küstenstädte, die durch ein Tsunami-Ereignis aufgrund großer tektonischer Plattenverschiebungen am Meeresboden besonders gefährdet sind.

Die Anfälligkeit dieser Metropolen für Vulkan Gefahren ist nicht nur das Ergebnis einer hohen Bevölkerungsdichte, sondern resultiert auch aus der Komplexität der dort versammelten Infrastrukturen, zum Beispiel Wasser-, Gas-, Strom- oder Kommunikationsleitungen. Von einem Zusammenbruch dieser Infrastrukturen könnten auf einen Schlag hunderttausende Menschen betroffen sein.

Mindestens 12 Millionenstädte liegen in unmittelbarer Nähe zu Vulkanen, bei denen es zu einer Plinianischen Eruption kommen könnte. Dazu zählen Mexico City, Jakarta, Manila oder die größte Stadt der Welt, Tokyo. Eine Plinianische Eruption hier wäre wahrscheinlich nicht nur mit einer riesigen Aschewolke verbunden, die sich je nach Windrichtung über weite Gebiete der Stadt legen könnte.

Die Auswertung historischer Vulkanausbrüche zeigt, dass diese Eruptionsart häufig auch mit schweren Erdbeben verbunden ist, die im Falle Tokyos zu gravierenden Schäden an Gebäuden führen könnten. Weiterhin hätte ein derartiges Ereignis erhebliche Auswirkungen auf den Flug- oder Schiffsverkehr. In unmittelbarer Nähe zum Ausbruchsherd könnten wie in Pompeji pyroklastische Ströme, Schlammlawinen und Lavaströme die dort befindlichen Ansiedlungen erheblich gefährden. So zeigt die Auswertung des schweren Vesuv-Ausbruchs im Jahr 1631, dass damals ein Gebiet von 200 km<sup>2</sup> durch die Auswürfe des Vulkans betroffen gewesen ist.

### Große Lava-Eruptionen

Die unmittelbaren Auswirkungen einer von Vulkanen verursachten Verschmutzungskrise durch ausströmende Gase und Partikel wurde im großen Maßstab zum letzten Mal beim Ausbruch des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull

im April 2010 sichtbar. Als Folge des hohen Partikelaustrittes kam es zu einem mehrtägigen Flugverbot über Europa und damit auch zu einem großen wirtschaftlichen Schaden durch den Ausfall von mehr als 100.000 Flügen. Zum Hintergrund: Die besondere Wetterlage zu diesem Zeitpunkt führte dazu, dass die Vulkanasche innerhalb von wenigen Tagen über die Nordsee und Nordwesteuropa ostwärts bis nach Zentralrussland und südwärts bis nach Spanien und Portugal transportiert wurde (Elbern 2014).

Nach Ansicht Oppenheimers wurde bei diesem Ausbruchereignis ein großes Problem sichtbar: Demnach war das notwendige Zusammenspiel der betroffenen Bereiche Geologie, Meteorologie, Atmosphärenforschung, Flugtechnik und Flugwirtschaft bei der zeitnahen Bewertung des Ausmaßes und seiner möglichen Folgen nicht optimal. Als Folge hatte die Politik Schwierigkeiten, die notwendigen Entscheidungen auf einer gesicherten Analyse-Basis zu treffen.

Eine über mehrere Monate andauernde große Lava-Eruption wie die des Laki-Kraterfeldes Ende des 18. Jahrhunderts hätte allein wegen der Dauer heute weitaus gravierendere Folgen für den transatlantischen Flugverkehr als beim Eyjafjallajökull-Ausbruch. Viele der notwendigen Transportbewegungen müssten dann wegen des andauernden Flugverbots wieder auf traditionellen Schiffswegen stattfinden, sofern die vorhandenen Kapazitäten überhaupt ausreichen. Darüber hinaus kann es bei diesen länger andauernden großen Lava-Eruptionen zu weiteren Negativfolgen kommen: Dazu zählen Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen durch Schwefeldioxid-Emissionen und die enorme Freisetzung von Aerosolen, die Verschmutzung von wertvollem Grünland, die Versauerung von Böden sowie Fluor in Wasser und Pflanzen als Auslöser für Hungersnot.

### VEI-8-Eruptionen

Supereruptionen zählen mit einem Vulkanexplosivitätsindex-Wert 8 (VEI-8) zu den denkbar größten geologischen Gefahren. Zwar liegen die letzten Supereruptionen lange Zeit zurück. Dazu

zählten beispielsweise der Ausbruch des neuseeländischen Vulkans Taupo vor 26.500 Jahren, der Ausbruch des Toba-Vulkans auf Sumatra von rund 73.000 Jahren oder der Ausbruch des Yellowstone vor rund 650.000 Jahren. Aber all diese Vulkane könnten durchaus mögliche Kandidaten für einen erneuten Superausbruch sein.

Supervulkane zeichnen sich durch eine besonders große Magmakammer aus, die sich unter besonderen Druck- und Dichtverhältnissen explosionsartig leert und einen großen Krater hinterlässt, die sogenannte Caldera. Zwar lassen sich die exakten Folgen beim Ausbruch eines Supervulkans nicht vorhersagen, aber wissenschaftliche Analysen vergangener Ereignisse geben Hinweise darauf, womit auch heute zu rechnen sein könnte: einer dicken Staubschicht, die ein Areal von mehreren hundert Kilometer im Durchmesser bedecken kann; pyroklastischem Material, das in hunderten Kilometern Entfernung auf Menschen und Siedlungen niedergehen könnte und vermutlich vielerorts zu schweren Bränden führen würde; riesige Aschewolken, die den ganzen Globus umfassen können; Zusammenbruch der Energieversorgung, Telekommunikation und vieler Transportwege; dem Zusammenbruch der Landwirtschaft in den von Asche bedeckten Gebieten und der Kontaminierung von Süßwasserreservoirs; dem Zusammenbruch der medizinischen Versorgung; der Ausbreitung von Epidemien; einer langanhaltenden Abkühlung des Klimas mit negativen Auswirkungen auf die Landwirtschaft auch in entfernteren Regionen und damit verbunden einer globalen Ernährungs- und Trinkwasserkrise, die vielen Menschen das Leben kosten kann.

### Kommt die Wissenschaft an ihre Grenzen?

Die möglichen Folgen dieser vulkanischen Extremereignisse sind also gravierend. Lassen sich vor diesem Hintergrund Hebel finden, um sich vor diesen enormen Risiken bestmöglich zu schützen? Viele Analysen beziehen sich auf Vulkanereignisse, die sich auf dem Vulkangefährdungsindex im Bereich 5 oder 6 befinden. Aber würden diese Analysen auch bei größeren

Ereignissen greifen, aus denen ganz andere Gefährdungslagen erwachsen?

Aus vergangenen wissenschaftlichen Untersuchungen zu Naturgefahren ist bekannt, dass gerade bei der Vulnerabilität, also der Verletzungsanfälligkeit, arme Bevölkerungsgruppen und arme Regionen besonders betroffen sind. Zum Beispiel wären bei einem schweren Ascheregen besonders Häuser betroffen, die über unzureichende Dachkonstruktionen verfügen. Ärmere Regionen müssten also bei der Beschreibung von Worst-Case-Szenarien besonders in den Blick genommen werden, da hier die Auswirkungen am größten sind.

Der Vulkanologe Clive Oppenheimer empfiehlt, bei der Risiko-Analyse die Expertise aus unterschiedlichen Disziplinen zusammenzubringen, um auf Basis wissenschaftlicher und evidenzbasierter Erkenntnisse zu handeln. Die Bandbreite reicht dabei von der Erarbeitung aussagekräftiger Modelle und Szenarien, über Vulkanmonitoring, Meteorologie bis hin zur Tephra-Chronologie.

Dabei kommt aber auch die Wissenschaft an Grenzen. So treten bei der Modellierung von extremen Vulkanereignissen regelmäßig wiederkehrende Probleme auf wie etwa bei der Berechnung der Ausbruchswahrscheinlichkeit. Ein Grund dafür liegt in der Seltenheit dieser schweren Vulkan-Ereignisse. Auch bei der Prognose der klimatischen Auswirkungen gibt es große Unsicherheiten, da valide Daten für Modellierungen erst dann zur Verfügung stehen, wenn es zu spät ist und das Ereignis bereits eingetreten ist.

Bei der Ereignisfolge gibt es für diese vulkanischen Extremereignisse ebenfalls große Unsicherheiten. Wann ist der Vulkanausbruch wirklich vorbei? Können Menschen in Ihre Wohnorte zurückkehren oder ist noch mit weiteren Ausbrüchen zu rechnen? In der Vergangenheit kam es bei Vulkanausbrüchen, die im Verhältnis zu einer Supereruption deutlich kleiner sind, bereits zu folgenreichen Fehleinschätzungen, die Menschenleben gekostet haben. Ein Beispiel hier ist der Ausbruch des Vulkans El Chichón in

Mexiko im Jahr 1982. Hier hatte das Militär Dörfer rund um den Vulkan evakuiert. Nach den ersten beiden Tagen, als der Vulkanausbruch scheinbar vorbei und die Situation sicher war, wurde den Bewohnern die Rückkehr in die Dörfer erlaubt. Dann kam es jedoch zu einer weiteren heftigen Eruption. Eine große Anzahl an Menschen – Schätzungen gehen von 1.700 bis 2.300 aus – starb durch pyroklastische Ströme.

Und auch wenn die Datenlage gut ist, ist es wahrscheinlich, dass die bisherigen Warnzeichen für bevorstehende Vulkanausbrüche wie Gasemissionen oder Erdbeben bei diesen sehr schweren Ereignissen anders verlaufen und die Vorwarnzeichen viel kürzer sind. Gleichzeitig müssen folgenreiche Schritte wie großflächige Evakuierungen gut bedacht sein. Kommt es hier zu häufig zu Fehlalarmen, werden Alarmzeichen von der Bevölkerung schnell nicht mehr ernst genommen.

### Komplexe Handlungs- und Entscheidungsprozesse

Anhand von Szenarien zu den vulkanischen Extremereignissen können aber Notfall- und Evakuierungspläne für Politik, Behörden, Militär, Zivilschutz oder Krankenhäuser erarbeitet werden. Hier hat es große Fortschritte in der Kommunikation zwischen Wissenschaft und Entscheidungsträgern gegeben. Damit Evakuierungen erfolgreich verlaufen, braucht man jedoch entsprechende Vorwarnzeiten. Und das ist ein Dilemma, zum Beispiel wenn es zu einer Plinianischen Eruption kommt. Denn nicht immer stehen eine oder sogar mehrere Wochen zur Verfügung, um die Bevölkerung einer Millionenmetropole zu evakuieren. Hier können auch gut ausgearbeitete Notfallpläne und gut ausgebildete Katastrophenhelfer schnell mit Dimensionen konfrontiert sein, die mit der Evakuierung eines Dorfes oder einer Kleinstadt nicht mehr zu vergleichen sind. Da es sich bei Vulkanausbrüchen um hochdynamische Ereignisse handelt, müssen auch Notfallpläne diese Dynamik abbilden und flexibel gegenüber sich verändernden Situationen sein.

Für ein wirksames Risikomanagement braucht es zudem eine gute Koordination und klare Verantwortlichkeiten. Doch wie kann das funktionieren, wenn ein Supervulkan eine globale Krise auslöst. Wer hat das Mandat, eine globale Gefährdungssituation auszurufen? An wen soll zum Beispiel die Wissenschaft ihre Modelle und Empfehlungen adressieren, wenn der Rahmen von Nationalstaaten überschritten wird? Sind es die Vereinten Nationen oder eher das UNHCR, das Flüchtlingshilfswerk der Vereinten Nationen? Wer ist umgekehrt Ansprechpartner auf der Forschungsebene für die politischen Institutionen? Hier gibt es ebenfalls eine Fülle an nationalen wie internationalen Akteuren. Politische Entscheidungsträger vor Ort brauchen hier klar identifizierbare Ansprechpartner, die ihnen geeignete Handlungsempfehlungen auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse geben können.

Die Herausforderungen sind groß und man könnte beinahe resignieren, angesichts der beschriebenen Szenarien. Viele Menschen neigen

dazu, sie in das Reich der Science-Fiction zu verbannen. Sie sehen sie als Ereignisse, die im Reich der Zukunft angesiedelt sind und die wir als Menschen im Hier und Jetzt sowieso nicht erleben. Auch dies ist ein grundsätzliches Problem im Umgang mit dem Thema.

Oppenheimer bleibt jedoch trotz dieser vielen Herausforderungen ein Optimist. So sagt er gegen Ende seines Buches: „Vulkanische Katastrophenrisiken sollten nicht auf Wahrscheinlichkeitsberechnungen reduziert werden, wann ein Ereignis eintritt oder welche möglichen Verluste damit verbunden sind. Natürlich sollte intensiv an besseren Vorhersagen gearbeitet werden. Aber man sollte die Perspektiven, die sich daraus ergeben, weder ignorieren noch ausschließlich mit Furcht betrachten. Schließlich zeigt die Geschichte der Menschheit, dass wir die Fähigkeit haben, vulkanischen Bedrohungen mit Entschlossenheit, Flexibilität und Kreativität zu begegnen“ (Oppenheimer, 2011, S. 354).

## Referenzen

- Elbern, H. (2014, 14. Mai). Ausbreitung der Vulkanasche nach Eyjafjallajökull-Ausbruch. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 1. Aufgerufen am 03.03.2020.
- Oppenheimer, C. (2011). *Eruptions that Shook the World*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511978012

## Wo genau können neue Vulkane entstehen?

Interview mit Dr. Eleonora Rivalta (Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

**Die Menschheit breitet sich immer mehr über den Planeten aus. Das hat zur Folge, dass urbane Räume Vulkanen immer näherkommen. Manche Städte liegen sehr nah an oder sogar auf einem monogenetischen Feld. Beispiele dafür sind Neapel, Mexico City oder auch Auckland. In solchen Fällen wäre es wichtig zu wissen, wo Lava austreten oder sich ein Vulkankegel bilden könnte. Dr. Eleonora Rivalta vom Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) beschäftigt sich unter anderem mit solchen Fragestellungen.**

- 
- Bisher wurden statistische Techniken verwendet, um die Verteilung von Schloten in Vulkanfeldern zu ergründen.
  - Mittels eines neuen Ansatzes soll versucht werden, das Auftreten der Schlote mechanisch zu erklären.
  - Wenn der Ansatz ausreichend weiterentwickelt wird, könnte er dazu dienen, Ausbruchsorte vorherzusagen.
- 

**Sehr geehrte Frau Dr. Rivalta, Sie beschäftigen sich mit den Wechselwirkungen zwischen Plattentektonik, also der Bewegung der Erdplatten, und Vulkanismus. Können Sie uns kurz erklären, was dieses Forschungsfeld umfasst?**

**Dr. Eleonora Rivalta:** Es handelt sich um ein relativ neues Forschungsgebiet, bei dem es um die Interaktion zwischen tektonischen Kräften und Vulkanismus in allen räumlichen Größenordnungen geht, also um die regionalen Auswirkungen, aber auch lokalen Wirkungen an einzelnen Vulkanen. Es geht dabei zum Beispiel um Fragen wie: Warum befinden sich ganze Vulkanfelder dort, wo sie sich befinden? Wie verhalten sich der Transport sowie die Einlagerung von Magma zu sich langsam aufbauenden tektonischen Kräften wie etwa der Entwicklung bzw. Auffaltung von Gebirgen, aber auch zu schnell wirkenden und sich ändernden Kräften wie starken Erdbeben?

**Warum ist es wichtig, sich mit solchen Problemen zu befassen?**

**Rivalta:** In den Geowissenschaften und auch darüber hinaus erweisen sich häufig drei Gründe für unsere Erkenntnisinteresse als wichtig. Zunächst sind wir Menschen ganz einfach neugierig und von der Natur fasziniert und würden daher gerne besser verstehen, wie diese Prozesse funktionieren. Zweitens möchten wir uns besser vor Gefahren schützen: in Vulkangebieten befinden sich Siedlungen und es sind beliebte Touristenziele. Drittens bemühen wir uns um eine nachhaltige Nutzung derjenigen Ressourcen, die uns die Natur zur Verfügung stellt. Im Falle der Vulkane sind dies Wärme und Mineralien. All diese Faktoren sind ein Grund dafür, sich mit Vulkanen sowie den Kräften, welche ihr Verhalten steuern, zu beschäftigen.

**Manche Städte liegen sehr nah bzw. direkt auf einem sogenannten monogenetischen Feld. In der Nähe von Neapel gibt es ein Vulkanfeld, die Phlegräischen Felder, wo sich das Auftreten von Vulkanen häuft, viele Landschaftsformen an frühere vulkanische Aktivität erinnern und immer noch kleinere Vulkankegel entstehen können. In solchen Fällen wäre es wichtig zu wissen, wo ggf. Lava austreten könnte. Wie muss man sich so einen Ausbruch vorstellen? Welche Folgen kann so ein Austritt haben?**

**Rivalta:** Zunächst einmal sind monogenetische Ausbrüche keineswegs selten, sondern eigentlich recht normal. Selbst bei „regulären“ Vulkanen wie dem Ätna oder auf Hawaii kommt es nicht selten zu Eruptionen, die sich im unteren Bereich des Hanges und nicht auf dem Gipfel ereignen. Man darf sich das wie einen Riss vorstellen, vielleicht ein paar hundert Meter lang und einen halben Meter breit, der sich manchmal sprichwörtlich einfach im Hinterhof von jemandem öffnet, und aus dem Lava langsam, aber auch als Fontäne oder sogar explosionsartig austreten kann. Daraus formen sich je nachdem ein oder mehrere Auswurfskegel oder ein Krater. Die Folgen hängen dann vor allem vom Ausmaß der Explosivität ab: Wenn die Lava langsam austritt, dann verlieren eventuell manche Menschen ihr Zuhause, aber wahrscheinlich wird niemand ums Leben kommen. Wenn die Eruption explosionsartig ist, ist sie weitaus gefährlicher, und es kann schwierig werden, ihr zu entkommen. Auch können dann die Auswirkungen auf die Infrastruktur recht bedeutend sein.

**Wie kann man die Ausbruchsorte in den Campi Flegrei eingrenzen? Wie gehen die Forscher\*innen dabei vor?**

**Rivalta:** Im Bereich der Campi Flegrei, eine Einsturzcaldera mit einem Durchmesser von ca. 15 Kilometern, sind etwa 80 kleinere „Krater“ und Auswurfskegel verzeichnet, die uns vermitteln, wo sich in der Vergangenheit Ausbruchsrisse gespalten haben. Ihre Verteilung ist nicht gleichmäßig, sondern es finden sich hier und da Häufungen. Die Wissenschaft hat ausgefeilte statistische Techniken entwickelt, um haupt-

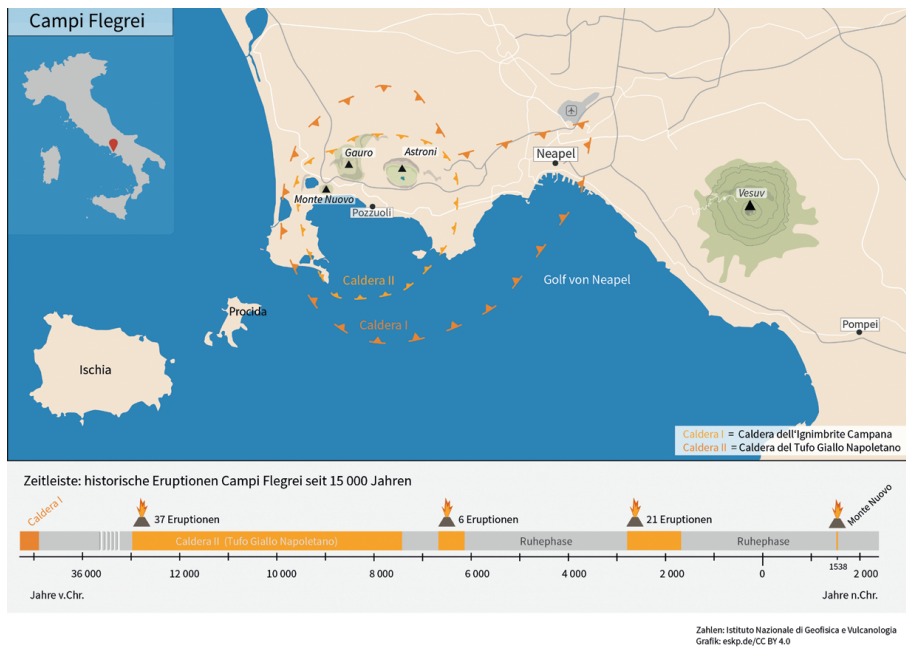
sächlich auf Grundlage der 80 zugänglichen Schloten eine räumliche Dichte zu definieren. Wir haben einen Ansatz entwickelt, mit dessen Hilfe wir feststellen wollen, warum sich diese Schloten als Folge der wirkenden Kräfte – also mechanisch – dort befinden, wo sie sich befinden. Wir hoffen, dass diese Methode sämtliche Tests besteht und sich als vorteilhaft gegenüber rein statistischen Methoden erweisen wird. Wir arbeiten an diversen Tests und Anwendungen.

**Wie gut kann der Ansatz auf andere monogenetische Felder oder Vulkangebiete übertragen werden? Könnte Ihre Vorhersagemethodik auch in Deutschland eingesetzt werden, zum Beispiel in der Eifel? Oder ist der Einsatz an bestimmte Bedingungen geknüpft?**

**Rivalta:** Dieses Konzept lässt sich auf all solche Fälle anwenden, in denen eruptive Prozesse dazu neigen, neue Schloten zu bilden anstatt den zentralen Vulkanschlot zu nehmen. Die Eifel könnte ein großartiges Anwendungsgebiet sein, wir ziehen das bereits in Erwägung. Es gibt keine spezifischen Vorbedingungen, abgesehen davon, dass über das betreffende Gebiet möglichst viele Daten und Informationen vorliegen sollten: ehemalige Schloten sollten verzeichnet und datiert sein, die tektonische und topographische Geschichte des Gebietes sollte möglichst bekannt sein, und im Idealfall sollten weitere Informationen vorliegen, einschließlich Bohrlochdaten jeder Art. Seismische Tomographien, seismische Verzeichnisse, magneto-tellurische Untersuchungen, Informationen über den Herdmechanismus, strukturgeologische Untersuchungen usw.. All das sollte in ein Belastungsmodell eingebracht werden, das mit der Lage der ehemaligen Schloten zu den Zeiten, in denen sie ausbrachen, übereinstimmt.

**Wie wichtig ist bei der Berechnung das Gewicht eines Vulkans?**

**Rivalta:** Es ist sehr wichtig, da es oft die Hauptquelle der Belastung darstellt. Dies betrifft die Verteilung des Gewichtes über das vulkanische Gebilde im gesamten Bereich, einschließlich der Fälle, in denen Gewicht fehlt, z. B. aufgrund einer Caldera oder sektoraler Einbrüche.



**Abb. 1:** Die Karte zeigt die Phlegräischen Felder (Campi Flegrei) westlich der Stadt Neapel. Die historischen Eruptionen sind auf einer Zeitleiste dargestellt. Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de CC BY 4.0

**Ab wann, denken Sie, kann der Ansatz zur Vorhersage von Ausbruchsorten zur Unterstützung von Politik und Behörden eingesetzt werden?**

**Rivalta:** Wir befinden uns noch in einer sehr frühen Entwicklungsphase, doch wenn die entsprechenden Mittel bereitstehen und ein breiteres Interesse besteht, könnte es in wenigen Jahren soweit sein. Wenn eine Gruppe von Wissenschaftlern ihre Kräfte vereint, um die Methode weiterzuentwickeln und in mehreren Gebieten auszuprobieren, und dann das dabei Gelernte in den Prozess einbringt, dann kann das sehr schnell gehen. Hoffentlich werden wir Interesse wecken und dazu kommen.

**Direkt dazu im Anschluss: Ist ein Ausbruch denkbar, wie er in dem bekannten Naturkatastrophenfilm Volcano (USA, 1997) als Aufhänger für eine gewohnt actionreiche Hollywood-Handlung gezeigt wird? In dem Film geht es um einen Vulkanausbruch mitten in Los Angeles.**

**Rivalta:** Mitten in Los Angeles ist kein Ausbruch denkbar, denn dort befinden sich nirgendwo jüngere Vulkanschlote. Doch es gibt überall auf der Welt diverse Stellen mit jüngeren eruptiven Schloten, die lediglich Vulkanolog\*innen be-

kannt sind und nicht Laien. Man kann sie auf Karten finden, zum Beispiel auf der Karte des Smithsonian Volcanism Program in Washington D. C.: Dort sind sämtliche in den letzten zehntausend Jahren aktive Vulkane (mit Ausnahme sehr abgelegener Gebiete) durch Flaggen gekennzeichnet. Um diese Vulkane herum ist es prinzipiell möglich, dass sich eruptive Spalten öffnen, auch mitten in einer Stadt, z. B. in Auckland in Neuseeland.

**Frau Dr. Rivalta, wir danken Ihnen für dieses Gespräch.**

## Referenzen

- Rivalta, E., Corbi, F., Passarelli, L., Acocella, V., Davis, T. & Di Vito, M. A. (2019). Stress inversions to forecast magma pathways and eruptive vent location. *Science Advances*, 5(7):eaau9784. doi:10.1126/sciadv.aau9784

## Die Bedeutung von Informationen zu Vulkan- ausbrüchen für den Flugverkehr

Klaus Sievers (Vereinigung Cockpit)

**Vulkanasche und Vulkanwolken können erhebliche Auswirkungen auf den Flugverkehr haben. Der Flugexperte Klaus Sievers gibt einen Überblick über aktuelle Regelungen und die Chancen für die Flugsicherheit, die sich aus neuen Technologien ergeben.**

- Unter günstigen Voraussetzungen kann eine Eruption kurzfristig vorausgesagt werden.
- Piloten erhalten vor ihren Flügen notwendige Informationen über Vulkanaktivitäten. Diese können für Crew und Passagiere lebenswichtig sein.
- Flugzeuge haben keine Geräte zur Messung von Vulkanasche an Bord, sie sind während des Flugs allein auf Augensicht angewiesen. Dadurch fehlen präzise Echtzeit-Informationen über die Gefährdung durch Vulkanasche.

### Vulkanausbrüche und Luftfahrt

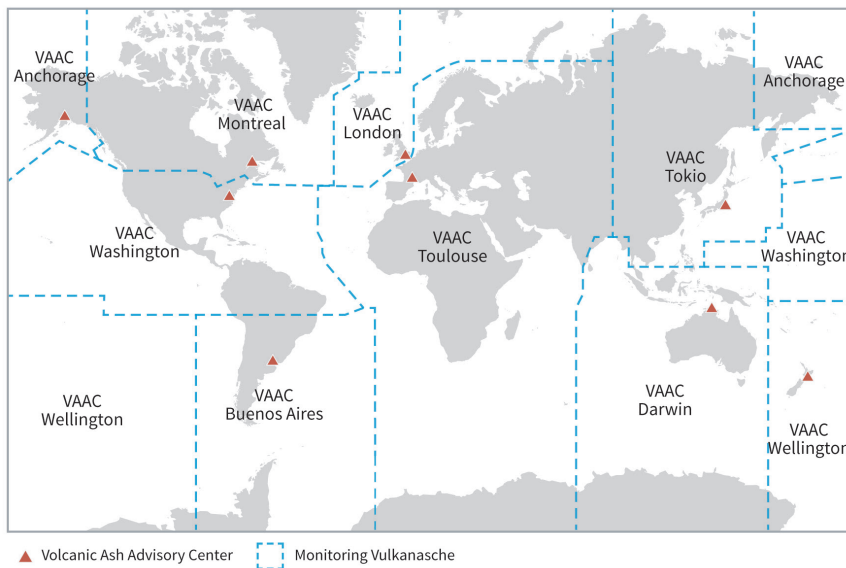
Vulkanausbrüche sind ein Naturphänomen, das große Auswirkungen auf die Luftfahrt haben kann und mit dem sie sicher umgehen muss. Denn fliegt ein Flugzeug durch eine Vulkan-Asche-Wolke kann es zu lebensbedrohlichen und teuren Schäden kommen. Im Folgenden werden die bestehende Vorhersage- und Warnsysteme beschrieben und Informationen zu möglichen Weiterentwicklungen aus dem Blickwinkel der Piloten gegeben.

Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO (englisch International Civil Aviation Organization) hat ein System etabliert, das die Luftfahrt mit den nötigen Informationen und Warnungen bezüglich Vulkaneruptionen versorgt. In diesem System haben die verschiedenen Vulkanobservatorien u. a. die Aufgabe, Vulkane zu beobachten, entsprechende Messungen durchzuführen und Berichte zu erstellen, sowie – falls möglich – Vorhersagen bezüglich des zukünftigen Verhaltens eines Vulkans auszuarbeiten. Ziel der Bemühungen ist es, jegliche Aufeinandertreffen von Flugzeugen und Aschewolken zu vermeiden.

Die Weltorganisation der Vulkanobservatorien (WOVO) ist unter Website [wovodat.org](http://wovodat.org) zu finden.

Derzeit ist es allerdings nicht möglich, genaue Vorhersagen mit einem Vorlauf von Monaten oder Wochen zu treffen. Unter günstigen Voraussetzungen, falls der Vulkan mit dem richtigen Instrumentarium beobachtet wurde, kann eine Eruption kurzfristig vorausgesagt werden. Es werden jedoch nicht alle Vulkane gründlich beobachtet, da die Budgets für Vulkanobservatorien begrenzt sind. In der Praxis kommt es nach wie vor zu unerwarteten Ausbrüchen nur wenig oder gar nicht überwachter Vulkane, wie im Falle des Mount Nabro in Afrika im Jahre 2011.

Vulkanobservatorien übermitteln den Status eines Vulkans an die Luftfahrt im Allgemeinen mit Hilfe des sogenannten „Aviation Volcano Alert Status Colour Code“, eines universellen Warnsystems für die Luftfahrt. Ein universelles System eignet sich besonders für den Luftfahrtsektor, da Piloten oder Fluglotsen, die Flüge über weite Regionen der Welt planen oder durchführen, schnell den Status zahlreicher Vulkane in mehreren Ländern ermitteln und feststellen müssen.



**Abb. 1:** Weltkarte mit Standorten der Advisory Center: 9 Vulkan-Warnzentren überwachen für den internationalen Flugverkehr die Ausbreitung von Vulkanasche nach Eruptionen. Karte: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de / CC BY 4.0

Dies ist wichtig für die Frage, ob eine ständige Aufmerksamkeit der Piloten notwendig ist oder eine Umleitung und zusätzlicher Treibstoff erforderlich sind.

Dieses System verwendet vier Farbcodes. Dieser internationale Farbcode sollte Bestandteil von sogenannten ASHTAMs oder NOTAMs sein. Diese Bulletins für Piloten liefern Informationen über Vulkanaktivitäten und den aktuellen Status eines Vulkans. Entsprechend dem ICAO-Dokument 9766, dem Handbuch der International Airways Volcano Watch (IAVW), sollte folgender Code verwendet werden:

- **GRÜN:** Der Status des Vulkans ist nicht-eruptiv.
- **GELB:** Der Vulkan zeigt Anzeichen erhöhter Unruhe über das übliche Niveau hinaus.
- **ORANGE:** Der Vulkan zeigt erhöhte oder eskalierende Unruhe mit erhöhtem Eruptionspotential.
- **ROT:** Eine Eruption steht unmittelbar bevor oder ist im Anzug – eine deutliche Erhöhung der Aschenemission in die Atmosphäre ist wahrscheinlich.

Abgesehen von der Überwachung von Vulkanen besteht eine weitere wichtige Aufgabe der Vulkanobservatorien im Verfassen von Berichten über Eruptionen. Letztere können verschiedene For-

men annehmen. Dazu zählen etwa Angaben zu Lavaaustritten an die Erdoberfläche in Verbindung mit geringem oder umfangreichem Austritt von Gasen ( $\text{SO}_2$ ) oder die Herausbildung von Eruptionswolken. Diese können eine erhebliche Höhe erreichen – 20 Kilometer oder mehr – wobei sie beispielsweise eine pilzförmige Wolke bilden können.

Die Einzelheiten einer Eruption sind von großer Bedeutung für die Entwicklung und den Betrieb von Vorhersagemodellen sowie zur Verfolgung der Verteilung vulkanischer Asche und Gaswolken. Im Falle einiger Vulkane sind beachtliche Investitionen in die Bestimmung der Eigenschaften von Eruptionswolken geflossen, in Messgeräte wie Lidar sowie spezielle Radar-Instrumente, Infrarot  $\text{SO}_2$ -Kameras oder Flugzeuge/Drohnen zur Entnahme von Luftproben. Beispiele hierfür wären die europäischen vulkanischen Gefahrenzonen auf Island, Sizilien und anderenorts.

### Vulkanwolken (Asche/Aerosol)

Informationen zu Gefahren durch Vulkanasche finden sich in ICAO-Dokumenten wie dem ICAO-Dokument 9974 zu Flugsicherheit und Vulkanasche. Dieses Dokument enthält eine Darstellung der durch Vulkanausbrüche hervorgerufenen Gefahren und informiert über den



Abb. 2: Blick aus Flugzeugfenster auf den Vulkan Mount Baker, USA. Foto: Klaus Sievers

Prozess der Sicherheitsrisikenabschätzung mit Betonung auf Vulkanasche. Weitere Details zu Vulkanwolken und ihren Auswirkungen auf Flugzeugsysteme finden sich im ICAO-Dokument 9691, dem Handbuch zu Vulkanasche, radioaktivem Material und Wolken mit giftigen Chemikalien. Schließlich gibt es noch das ICAO-Dokument 9766 mit dem Titel: „Handbook on the International Airways Volcano Watch“ (IAVW). Dort wird das gesamte System der Vulkanobservatorien und der Volcanic Ash Advisory Centers (VAAC) detailliert dargestellt.

Die Aufgabe der neun Vulkan-Warnzentren (Volcanic Ash Advisory Centers, VAAC), die von der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation zur Beobachtung von vulkanischen Aschewolken beauftragt wurden, besteht darin, aus sämtlichen erreichbaren Quellen Informationen über Eruptionen zu gewinnen. Dazu gehören beispielsweise Berichte von Flugzeugen, von Beobachtern am Boden – auch aus sozialen Netzwerken – Satellitenbilder, Infraschall-Beobachtungen sowie Informationen eines Netzwerkes zur Blitzbeobachtung.

Diese Informationen werden ausgewertet und die Verteilung der Asche wird entsprechend modelliert. Schließlich werden auf der Website der Volcanic Ash Advisory Centers diese Meldungen und Prognosen als Text und Graphik veröffentlicht. Vor allem aber gehen diese Meldungen und Prognosen an die meteorologischen Beobachtungsbüros (Meteorological Watch Offices) der Wetterdienste, an die Flugsicherungszentralen

der Luftfahrt (Area Control Centers) und auch an Betreiber von Fluggerät, also die Fluggesellschaften. Das VAAC London beispielsweise betreibt die Website Metoffice und ist mit allen anderen Warnzentren verbunden.

Die Situation wird verkompliziert durch die Tatsache, dass Vulkane große Mengen vulkanischen Gases, meist  $\text{SO}_2$  und Aerosole (Schwefelverbindungen und Schwefelsäure, Flusssäure) emittieren können. Derzeit betrachten die VAACs diese Gas-/Aerosol-Wolken nicht, obwohl der Geruch dieser Aerosole für Passagiere belästigend sein kann und auch Gesundheitsrisiken bestehen. Auf längere Sicht tragen die  $\text{SO}_2$ -/Aerosol-Wolken zu Maschinenschäden bei.

Im Herbst 2019 beschlossen die ICAO und die Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO), die Aufnahme von  $\text{SO}_2$ -Messungen und Voraussagen in das Arbeitsprogramm und den Aufgabenkatalog der VAAC aufzunehmen. Bisher stellt die Website des Support to Aviation Control Service (SACS) eine vorzügliche Quelle für Informationen über  $\text{SO}_2$  in der Atmosphäre sowie über Aschewolken dar.

### Gefahren durch Vulkanwolken (Asche, Gase & Aerosole)

Es gibt eine Vielzahl an möglichen Gefahren, die durch vulkanische Aschewolken entstehen können. Diese Gefahren sind den Pilotinnen und Piloten in ihrem Arbeitsalltag stets bewusst, da sie zum Teil gravierende Folgen für die Flugsicherheit haben können:

- Rein **mechanische Schäden** aufgrund der Abriebeigenschaften von Vulkanasche können zum Beispiel bewirken: undurchsichtig gemachte Cockpit-Fenster, Verstopfung der Pitot-Rohre und damit einhergehend der Verlust der Geschwindigkeitsmessung, Leistungsverlust oder gar Stillstand der Triebwerke durch Abnutzung der Turbinenblätter.
- Geschmolzene oder teilweise **geschmolzene Aschepartikel** können an Teilen der heißen Bereiche der Triebwerke anhaften. Dadurch wird der Luftstrom innerhalb des Triebwerks



Abb. 3: Vulkanasche und Flugverkehr: Überblick über ausgewählte Schäden am Flugzeug durch Vulkanasche.

Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp. de CC BY 4.0

gestört/blockiert, was zu Leistungsverlust bis hin zu Motorstillstand führen kann. Darüber hinaus können Kühlsysteme innerhalb der Triebwerke blockiert werden, was zu örtlicher Überhitzung der Triebwerksschaufeln führt. Das kann den Ausfall von Triebwerken bedeuten und wegen Schubverlust muss das Flugzeug sinken. Gleichzeitig bedeutet der Triebwerksausfall den Ausfall von Systemen, die für den Betrieb von Flugzeugen wichtig sind wie z. B. der elektrischen, hydraulischen oder pneumatischen Systeme. Weitere Informationen finden sich auf der Webseite von Eurocontrol Skybrary.

- Eher langfristige Auswirkungen auf Triebwerke haben die aggressiven chemischen Eigenschaften **heißer Vulkangase, Aerosole und auch Ascheteilchen**. Diese Substanzen dringen in extrem hitzebeständige Schutzschichten aus speziellem Metall ein, welche die Turbinenblätter bedecken. Zunächst sind nur winzige Bereiche betroffen. Doch wenn die schützende Schicht des „thermal barrier coating“ erst durchbrochen ist, kann es zu Korrosion und Schäden an den Turbinenblättern kommen. Bei der Wartung sind frühe Anzeichen für diese Schädigungen meist feststellbar, allerdings ist es aufgrund

derartiger Entwicklungen schon zum Bruch von Turbinenschaufeln und Triebwerksausfällen gekommen.

- Es kann auch zur **Kontamination** der Luft innerhalb des Flugzeugs mit Vulkanasche bzw. Aerosolen oder Gas kommen. Dies kann so weit gehen, dass die Besatzung Sauerstoffmasken benutzt. Die Kontamination kann zu Geruchsbelästigung in der Kabine und sogar zu gesundheitlichen Schäden führen.
- Vulkanisches Material und Aerosole können sich an der **Elektronik ablagern, die Kühlung beeinträchtigen** und unter Umständen, aufgrund von Korrosion, auch den Ausfällen elektronischer Komponenten herbeiführen.
- **Kontamination des Belüftungssystems** eines Flugzeugs. Dieses ist nicht oder nur sehr schwer zu reinigen.
- Falls sich Vulkanasche auf einer Rollbahn ablagert, muss mit einem **verschlechterten Bremseffekt** gerechnet werden, zuzüglich der allgemein schädlichen Auswirkungen, die entstehen, wenn Asche in laufende Triebwerke eingesogen wird.

## Operationelle Fragen heutzutage

Die ab 2010 entwickelten Verfahren der ICAO folgen dem Prinzip, dass grundsätzlich die Sicherheit von Flugoperationen in der Verantwortung der Betreiber liegt. Die Piloten tragen somit selbst die entsprechende Verantwortung für ihre jeweiligen Flüge. Die Meteorologie- und Flugverkehrsdienste haben die Aufgabe, Informationen und Unterstützung zu bieten. Hier in Europa gilt der sogenannte Volcanic Ash Contingency Plan – European and North Atlantic Regions (EUR/NAT VACP, July 2016).

Entsprechend den ICAO-Regulationen handelt es sich bei den offiziellen Informationen um sogenannte „signifikante Wetternachrichten“ (SIGMETs) sowie Flugverkehrsnachrichten (NOTAMs). Ascheempfehlungen, die sogenannten Volcanic Ash Advisories (VAA; als Grafiken: VAG), sollen von den Vulkan-Warnzentren (VAACs) bereitgestellt werden und als Input für die Erstellung von SIGMETs und NOTAMs dienen. Heutzutage werden sie allerdings zunehmend von den Luftraumnutzern als Planungsmittel eingesetzt.

Die Diagramme zur Konzentration von Asche der Vulkan-Warnzentren in London und Toulouse, die seit 2010 als zusätzliche Informationsstelle fungieren, dienen der Flugplanung. Diese Diagramme, Karten, geben Gebiete mit keiner/niedriger/mittlerer/hoher Aschekonzentration an, mit denen entsprechend einer Abschätzung der Sicherheitsrisiken für Flüge in diesen Gebieten, die Flugplanung durchgeführt werden kann. Weitere Informationen zum Umgang mit den Sicherheitsrisiken finden sich auf der Webseite von Eurocontrol Skybrary.

Die Gesamtverantwortung für die Flugsicherheit liegt beim Betreiber, von dem erwartet wird, dass er eine Abschätzung der Flugsicherheit vornimmt, die den Ansprüchen dieser Aufsichtsbehörde genügt. Diese SRAs (Safety Risk Assessments) dienen als Grundlage für die Flugplanung. Die Betreiber sind dafür verantwortlich, die Crews über die aufgrund der Sicherheitsab-

schätzung bekannten Bedingungen zu informieren und ihnen spezifische Instruktionen an die Hand zu geben.

Die SRAs einzelner Fluglinien können vorschreiben, zusätzliche Informationen zu berücksichtigen, wie zum Beispiel Satellitenbilder, oder sogar die Berücksichtigung „sämtlicher“ Informationsquellen. Manche Fluglinien haben Verträge mit spezialisierten wissenschaftlichen Instituten. Andere haben eventuell einen Vertrag mit einem kommerziellen Wettervorhersageanbieter, der auch Informationen über Vulkanasche bietet.

Die relevanten Details finden sich in der SRA der jeweiligen Fluglinie. SRAs werden nicht veröffentlicht – sollten aber den Piloten der jeweiligen Fluglinie zur Verfügung stehen. Nur um eine Vorstellung davon zu vermitteln, wie wichtig es ist, die jeweilige SRA zu kennen: Dieses Dokument kann sogar einen Flug durch ein Gebiet erlauben, das im Zusammenhang mit einer Eruption als Gefahrengebiet ausgewiesen wurde – oder eben nicht.

Die Piloten sind dafür verantwortlich, ihre Flüge sicher durchzuführen. Empfehlungen finden sich auf der Website der Europäischen Agentur für Flugsicherheit EASA. Diese Website enthält auch die aktuelle Ausgabe des EASA Safety Information Bulletin, SIB 2010-17/R7 (korr. Fassung) vom 02. Juli 2015.

## Informationsquellen

Vulkanausbrüche führen dazu, dass eine große Menge an Informationen produziert wird, allerdings sind diese unter Umständen nicht konsistent. Betreibern und Piloten wird geraten, vorliegende Informationen sorgfältig zu bewerten und Flüge mit größter Vorsicht durchzuführen.

Maßgebliche und detaillierte Informationen finden sich unter den folgenden Links (dies sind nur einige Beispiele; es gibt viele weitere gute Einrichtungen dieser Art überall auf der Welt):

VAAC London, mit Links zu allen weiteren VAACs:

<https://www.metoffice.gov.uk/aviation/vaac>

Informationen zu bestimmten Gebieten/  
Vulkanen finden sich z. B. hier:

**Icelandic Met Office:** <https://en.vedur.is/earthquakes-and-volcanism/volcanic-eruptions/>

**Alaska Volcano Observatory:** <https://www.avo.alaska.edu/>

**Kamchatka Volcanic Eruption Response Team:** [http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index\\_eng.php](http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index_eng.php)

**CENAPRED Mexico, Popocatepetl:** <http://smn.cna.gob.mx/es/pronosticos/avisos/aviso-especial-por-la-actividad-del-volcan-popocatepetl>

ATM-Organisationen verfügen möglicherweise über Informationen zu den Auswirkungen von Asche. Ein Beispiel hierfür ist das Eurocontrol Network Ops Portal: <https://www.public.nm.eurocontrol.int/PUBPORTAL/gateway/spec/index.html>

Allgemeine Informationen zu Vulkanasche findet man bei Eurocontrol Skybrary: [http://www.skybrary.aero/index.php/Volcanic\\_Ash](http://www.skybrary.aero/index.php/Volcanic_Ash)

## Vulkanasche aus Sicht der Piloten

Die International Federation of Air Line Pilots' Associations (IFALPA) ist ein weltweiter Zusammenschluss nationaler Berufsverbände der Flugzeugführer. Die IFALPA beschäftigt sich mit Problemen der Luftfahrt, die durch Vulkanasche, Aerosole und Gasemissionen verursacht werden. Entsprechend dem Prinzip, dass Flugoperationen im Falle von Vulkanasche nur durchgeführt werden sollten, wenn die Sicherheit gewährleistet ist, finden sich untenstehende Anforderungen. Diese sind so zu verstehen, dass auch die derzeitigen, recht weit entwickelten Systeme noch einige Verbesserungen erfahren können:

**1. Notfallpläne** beziehen sich auf realistische Worst-Case-Szenarien wie zum Ausbruch des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull im Jahre 2010, sodass auf dieser Basis auch im Falle eines Vulkanausbruchs Flüge noch sicher geplant werden können. Diese Pläne sollten umfassend und global einheitlich sowie harmonisiert sein, sodass Staaten, Flugsicherung (Air navigation

service provider, ANSPs), Fluglinien, Piloten und alle anderen, die mit Luftfahrt befasst sind, die Pläne auch anwenden können. Kurzfristige Änderungen im Falle konkreter Eruptionen sollten nicht vorgenommen werden.

Derzeit liegen Pläne bereit, die auf Vorhersagen über Vulkanaschewolken und auch deren Aschenkonzentration beruhen. Der grundsätzliche Rat an Piloten besteht darin, dass sie sichtbare Asche vermeiden sollten. Hier besteht eine Diskontinuität, weil Piloten eben kein Messgerät für Asche haben – d. h. sie lediglich ihre Augen vertrauen müssen. Aber gerade der persönliche Eindruck kann täuschen, wie Studien gezeigt haben (Weinzierl & Diehl, 2014) haben. Fazit: Gerade in diesem Bereich gibt es dringenden Verbesserungsbedarf!

**2. Vulkanische Kontamination – grundsätzliche Überlegungen:** Derzeit gibt es keine weltweiten Standards bezüglich der zulässigen Anteile bzw. Mengen vulkanischer Aerosole und Asche, im Hinblick auf die Sicherheit von Flugzeugen, und Flugzeugsystemen wie Turbinen, Cockpitscheiben, Elektronik und Luftzufuhr. Es ist bekannt, dass die Hersteller von Flugzeugen und Flugzeugsystemen an diesem Thema arbeiten – allerdings firmenintern.

Viele Pilotinnen- und Pilotenvertretungen sind der Ansicht, dass es an der Zeit wäre, die Entwicklung von Standards anzudenken, die für Zertifizierungsinstitutionen wie Federal Aviation Administration (FAA), die Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten oder ihr europäisches Pendant EASA akzeptabel sind. Dies sollte auch die Aerosol-/Gas-Komponenten von Vulkanwolken umfassen, die hauptsächlich aus  $\text{SO}_2$  sowie dessen Reaktionsprodukten wie z. B. Schwefelsäure bestehen.

Flugzeuge sollten mit Sensoren bzw. entsprechenden Einrichtungen ausgestattet sein, welche die Präsenz und Menge vulkanischer Asche sowie  $\text{SO}_2$ -Wolken sowohl in der umgebenden Luft als auch rechtzeitig in Flugrichtung anzeigen, um die Piloten in die Lage zu versetzen, entsprechende (Ausweich-)Maßnahmen einzuleiten.

Solche Einrichtungen müssten ähnlich dem Wetterradar arbeiten, mit dessen Hilfe Wasserdampfwolken angezeigt werden. Es gab dazu bereits Prototyp-Entwicklungen wie das AVOID-System, doch es wurde nicht zur Einsatzreife gebracht.

Die visuelle Identifizierung durch den Piloten sollte nicht das einzige oder hauptsächliche Mittel sein, um die Bedeutung vulkanischer Wolken für die Flugsicherheit bzw. das Flugverkehrsmanagement (englisch Air Traffic Management, ATM) sein – schließlich wird ein Flugzeug mit Hilfe von Instrumenten geflogen, welche die Flughöhe, die Fluggeschwindigkeit, die Außentemperatur und anderes angeben. Dasselbe sollte auch für vulkanische Wolken (Asche, Gas, Aerosole) gelten. Dies wird besonders dann relevant, wenn wie von Herstellern wie Rolls-Royce und anderen verbreitet, ein System verwendet würde, das auf einer Asche-„Dosis“ beruht, d. h. auf einer bestimmten Maximalmenge an Asche innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Clarkson, 2017): Hier sollte ein Sensor den Piloten die zum gegebenen Zeitpunkt aufgenommene Dosis/Dosisrate, anzeigen. Es ist schwer nachzuvollziehen, dass zur Zeit das Thema „Vulkanasche“ nicht Bestandteil des Themenkataloges der Europäischen Behörde für Flugsicherheit, der EASA, ist.

Es ist ein Anliegen der Piloten, eine Ausbildung zur Erkennung vulkanischer Wolken, zur Flugplanung im Falle vulkanischer Wolken sowie zum Betrieb eines Flugzeugs innerhalb vulkanischer Wolken zu erhalten. Dazu sollte eine gründliche Instruktion bezüglich der Sicherheitsrisikobewertung der jeweiligen Fluglinie gehören, die den Piloten leicht zugänglich sein müsste.

**3. Information über vulkanische Kontaminationen für den Flugbetrieb:** Aktuelle, farblich markierte Informationen über vulkanische Ereignisse, Satellitenbilder, Abfragen bezüglich sowie Analysen von Asche- und SO<sub>2</sub>-Wolken, welche die Anwesenheit wahrnehmbarer Asche und SO<sub>2</sub> anzeigen, müssen Bestandteil der Flugvorbereitung sein und müssen im Verlaufe des

Fluges kontinuierlich aktualisiert werden. Im Zuge der Weiterentwicklung der Modellierung von Asche- und SO<sub>2</sub>-Wolken sollten 3D-Vorhersagen für Gefahren und ihre zeitliche Entwicklung publiziert werden. Dieses ist bei ICAO/WMO in Planung – eine Realisierung dürfte jedoch noch einige Jahre in Anspruch nehmen. Diese 3D-Informationen, publiziert im Stundentakt, sollen dereinst die Planung von sicheren und ökonomischen 4D-Flugbahnen ermöglichen.

Aber die Frage ist vielleicht: Gibt es möglicherweise etwas Vergleichbares schon? Die Antwort ist ja. Im Rahmen des Projektes EUNADICS-AV wurde bereits ein Verfahren entwickelt und bei einer Übung unter Einbeziehung aller am Luftverkehr Beteiligten umgesetzt. Eine Nutzung der Ergebnisse des im September 2019 beendeten Projektes durch die Wetterdienste Europas bzw. Ash-Advisory Centers Toulouse und London fand jedoch bisher nicht statt.

**4. Weitere Überlegungen:** Über das bisher Gesagte hinaus lässt sich eine verstärkte Resilienz gegenüber vulkanischen Eruptionen mit Hilfe folgender Überlegungen erreichen:

- Informationen über hypothetische Eruptionen könnten zu Planungszwecken veröffentlicht werden.
- Eruptionswarnungen sollte über zwei unabhängige Systeme generiert und zum Piloten, zum Flugzeug und zu anderen maßgeblichen Stellen des Luftverkehrs übermittelt werden.
- Informationen über Asche sowie Vorhersagen über Aschewolken sollten in modernen elektronischen Formaten veröffentlicht werden wie z. B. KML (Key Markup Language), einer international gebräuchlichen Auszeichnungssprache für Geodaten oder IWXXM, ein Format für die Meldung von Wetterdaten.
- Eine von sämtlichen Vulkan-Warnzentren (VACC) unterstützte Website sollte alle Informationen, die für Asche- und SO<sub>2</sub>-Wolken relevant sind, anzeigen, einschließlich aktueller Warnungen.

## Referenzen

- Clarkson, R. (2017). *Volcanic Ash and Aviation – Rolls-Royce Position*, May 2017 [www.wmo.int]. Rolls-Royce plc.
- European Aviation Safety Agency – EASA. (2015). *Safety Information Bulletin. Flight in Airspace with Contamination of Volcanic Ash* (SIB No.: 2010-17R7) [tinyurl.com].
- International Civil Aviation Organization – IACO. (2004). *Handbook On The International Airways Volcano Watch (IAVW). Operational Procedures And Contact List* (Second Edition) [www.icao.int/publications]. Montréal, Kanada.
- International Civil Aviation Organization – IACO. (2012). *Flight Safety and Volcanic Ash. Risk management of flight operations with known or forecast volcanic ash contamination* (First Edition, Doc 9974-AN/487) [www.skybrary.aero/bookshelf]. Montréal, Kanada.
- International Civil Aviation Organization – IACO. (2015). *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds* (Third Edition, Doc 9691-AN/954). Montréal, Kanada.
- International Civil Aviation Organization – IACO/European and North Atlantic Office. (2016). *Volcanic Ash Contingency Plan. European And North Atlantic Regions* (Edition 2.0, EUR Doc 019, NAT Doc 006, Part II) [www.icao.int]. Neuilly-sur-Seine, Frankreich.
- Weinzierl, B. & Diehl, A. (2014). Warnung vor Vulkanasche: Was haben wir aus den isländischen Vulkanausbrüchen 2010 und 2011 gelernt? *Promet*, 39(1/2), 91-103.

## Vulkanausbruch auf Island: Was lässt sich für die Risikovorsorge lernen?

Interview mit PD Dr. Thomas Walter (Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

**Im Jahre 2010 brach der Vulkan Eyjafjallajökull auf Island aus. Monatelang war der Flugverkehr über Europa lahmgelegt. Was würde heute anders laufen? Wie sinnvoll sind Grenzwerte für Vulkanasche in der Atmosphäre? Ein Rück- und Ausblick von dem Experten des Deutschen GeoForschungsZentrums PD Dr. Thomas Walter.**

- Die Asche isländischer Vulkane kann für den europäischen Flugverkehr zu einem Problem werden.
- Vulkanische Aschewolken können erhebliche wirtschaftliche Schäden zur Folge haben.
- Die Warnung von Piloten vor Aschewolken ist nach wie vor ausbaufähig.
- Grenzwerte machen nur bedingt Sinn, da die Wirkung von Vulkanasche von der Asche selbst, vom Turbinentyp und von der Nutzungsdauer der Turbinen abhängt.

**Sehr geehrter Herr Privatdozent Dr. Walter, ist ein Ausbruch wie der des Eyjafjallajökull auf Island im Jahre 2010 wirklich ein so seltenes Ereignis?**

**PD Dr. Thomas Walter:** Im Mittel finden in Europa ähnlich starke Eruptionen alle sechs bis sieben Jahre statt. Der starke Nordwind, den wir im Jahre 2010 damals hatten und der die Aschewolke auch bis Deutschland verfrachtet hat, ist in der Tat relativ selten. Mit ähnlichen Aschewolken wird etwa alle 40 Jahre gerechnet. Im Jahr 2014 dann brach der Bárðarbunga auf Island aus. Dabei handelt es sich um einen großen Vulkan unter dem größten Gletscher Europas. Zur Zeit des Ausbruchs gab es mehrfach Wetterlagen, die mit einer starken Nordströmung einhergingen. Also auch dort hätten große Mengen von heißer Lava in direkten Kontakt mit Gletscherwasser aufeinandertreffen und gewaltige Aschemengen produzieren können. Warum also keine erneute Aschewolke? Ich glaube wir haben einfach nur Glück gehabt, dass der Hauptteil des Ausbruches neben dem Eisschild stattfand. Deshalb kam Lava nicht in Kontakt mit Schmelzwasser, und es wurden keine großen Tephramengen produziert.

**Erinnern Sie wie das damals, im Jahre 2010, gelaufen ist. Was funktionierte gut, was nicht?**

**Walter:** Zu Zeiten des Ausbruchs gab es zwar bereits Ideen die Vulkan- und Risikoforschung europaweit zu koordinieren, allerdings war das noch nicht umgesetzt. Dieses Projekt (FUTUREVOLC) kam erst zwei Jahre darauf, sodass im Jahr 2010 viel Lehrgeld gezahlt wurde. Es gab sehr unterschiedliche Ideen der Messverfahren und auch keinen Konsens der Modellierung und Prognosen von Aschewolken. Insbesondere gab es damals auch kaum geeignete Ansprechpartner und Informationen, man hatte sich auf Einzeldarstellungen von Wissenschaftlern und auf ihre Webseiten zu verlassen. Bei der Vernetzung der Wissenschaften gab es seither deutliche Fortschritte. Aber nicht nur die Wissenschaft war damals überrascht, die Konzentration der Asche über Deutschland und Effekte für den Luftraum trafen auch die Luftfahrtbranche und Entscheidungsträger weitgehend unvorbereitet, sodass sogar so mancher Ministerposten wackelte.

### Was passierte daraufhin in Deutschland?

**Walter:** Man begann sich rasch dem eigentlichen Problem zuzuwenden: Grenzwerte wurden festgelegt, Modellierungen verbessert, und ein längst überfälliges Überwachungssystem erneuert. Es gab zwar schon 2010 in Mitteleuropa und Deutschland ein sogenanntes Lidar-System, welches teils auch durch europäische Fördergelder aufgebaut wurde. Dabei handelt es sich um eine laser-basierte Methode um die Aerosol- und Partikelgröße und Konzentration in der Atmosphäre zu vermessen. Allerdings war das Forschungsprojekt zu diesem Zeitpunkt 2010 bereits weitgehend vorüber, und die Notwendigkeit eines operativen Einsatzes nicht gesehen worden – zumindest bis zum Ausbruch des Eyjafjallajökull. Man hatte sich also 2010 weitgehend auf Angaben anderer Wissenschaftler und Behörden sowie auf deren Modellierungen stützen müssen, ohne diese prüfen, validieren und korrigieren zu können.

### Woher kamen die Modellierungen, vom Volcanic Ash Aviation Center in London?

**Walter:** Genau. Der Globus ist von der ICAO (International Civil Aviation Organization) in Sektoren unterteilt und den Volcanic Ash Aviation Centers (VAAC) zugeordnet. Neun dieser Vulkan-Warnzentren gibt es weltweit. Zwei davon liegen in Europa: das VAAC in Toulouse in Südfrankreich sowie das VAAC in London. Island und der Luftraum über dem Nordatlantik liegen im Einflussbereich des Londoner Met Office, d. h. des dortigen Wetterdienstes. Wenn der Ätna oder eine der Kanarischen Inseln hingegen aktiv wird, würde Toulouse übernehmen und diese Warnungen aussprechen. Die hier verwendeten Modellierungsverfahren werden schrittweise verbessert; das Problem damals war allerdings eher, dass alle Modellierungen nicht belastbar waren, da es kaum solide Daten gab.

### Hat es denn mit den Prognosen gut funktioniert? Was waren Probleme, die auftauchten?

**Walter:** Das hat grundsätzlich funktioniert, insbesondere wenn man bedenkt, dass kaum Daten verfügbar waren und die damaligen Modellierungsverfahren nicht die modernsten waren. Ein Problem sah ich damals darin, dass es in Deutschland kaum koordinierte Bemühungen gab, um hier einen signifikanten Beitrag zur kritischen Prüfung, Validierung und Verbesserung zu leisten. Die Modelle sagten nichts darüber aus, wie hoch die Konzentration der Asche oder deren Zonierung war. Teils konnten Messungen des DLR-Forschungsflugzeugs eine hohe Aschenkonzentration bestätigen, teils zeigten sich aber auch Abweichungen. Eyjafjallajökull war impulsiv und brach in Pulsen aus, diese Details waren in Prognosen nicht berücksichtigt. Daher meine ich, muss man unbedingt das Nahfeld und Transportwege verknüpfen.

### Bedeutet das, es würde heute nichts großartig anders laufen als im Jahre 2010, d. h.: es gibt jetzt keine Beratungskommission, für die schon Personen nominiert sind? Im Zusammenspiel der Institutionen hat sich seitdem auch nicht viel verändert?

**Walter:** Es gibt viele Bemühungen, aber diese sind noch nicht ideal koordiniert. Einzelne Länder in Europa haben tatsächlich sehr viel in eine verbesserte Vermessung, Früherkennung und -warnung investiert. Die VAAC Kompetenz wurde öffentlich kritisiert, und es wurden vor allem nationale Ideen vorgebracht. Ich hoffe das läuft in Zukunft anders! Auch in Deutschland hat sich insbesondere die Vermessung mittels Lidar verbessert; eigene und neue Expertisen wurden aufgebaut. Dennoch sind aber auch zahlreiche Disziplinen und Verfahren nicht weiterverfolgt worden. Ein Früherkennungssystem, welches unter anderem Geophysiker, Vulkanologen, Wetter- und Atmosphärenforscher zusammenbringt, um Entscheidungsträger und Katastrophenschutz zu integrieren, haben wir bislang noch immer nicht. Das wäre aber meiner Meinung nach dringend notwendig.

## ” Aschewolken können in wenigen Minuten Höhen erreichen, die für die Luftfahrt relevant sind.

**Heißt das, für den Flugverkehr hat sich auch nichts geändert?**

**Walter:** Ja und Nein. Zum Teil gibt es deutlich bessere Informationen, Messungen und Modelle. Zuständigkeiten und Handbücher wurden überarbeitet. Aber so manches ist auch wieder vergleichbar mit damals. Beispielsweise höre ich von Piloten, die Ausschau nach sichtbarer Asche halten sollen. Wie soll das gehen? Wir sprechen hier von feinen Glaspartikeln, die je nach Sonnenstand und Blickwinkel ganz verschiedene visuelle Effekte haben können. Manche Airlines haben on-board Sensoren installiert, um Aschewolken in der Flugbahn zu detektieren, und somit die Entscheidung des Piloten mit Daten zu untermauern. Jedoch sind solch freiwilligen Initiativen bald wieder verschwunden, vermutlich aus Kostengründen. Piloten der Vereinigung Cockpit beklagen sich bei uns Vulkanologen, dass sie zumeist auf sich gestellt sind und die Informationsketten zu langsam seien. Diese Sicht aus Perspektive der Piloten war überraschend und erschreckend zugleich. „Albtraum aller Piloten“ titelte bereits vor 10 Jahren eine große deutsche Wochenzeitschrift, das gilt auch heute noch. Aschewolken können in wenigen Minuten Höhen erreichen, die für die Luftfahrt relevant sind.

**Das heißt, Piloten fliegen auf Sicht?**

**Walter:** Ein Pilot schilderte kürzlich bei einer Vulkanologie-Tagung seinen Flug von Deutschland nach Catania zur Weihnachtszeit 2018. Der Flughafen liegt, wie die Stadt, am Fuße des Ätna auf Sizilien. Beim Anflug erkennt das Piloten-Team die massive Eruptionswolke des Ätna, prüft

eventuelle Fluginformationen und fliegt eine Schleife. Erst dann erscheint die Textnachricht vom VAAC in Toulouse auf den Displays: der Ätna ist aktiv, Details aus den kryptischen Angaben muss sich das Flugpersonal selber erarbeiten. Diese Information kommt einerseits viel zu spät und ist noch dazu ungenau und unhandlich. Ähnliche Berichte gibt es auch von Island. Es genügt nicht die Höhe und Verdriftung von Eruptionswolken anzugeben. Insbesondere die Randbereiche sind mit großen Unsicherheiten behaftet und können zu Fehleinschätzungen führen. Daher ist die Empfehlung der ICAO an die Piloten weiterhin: auf Sicht fliegen. Es muss sich hier also was tun, und als Wissenschaftler ist es schwer nachvollziehbar, warum hier keine Konsequenzen und länderübergreifenden Lehren aus 2010 gezogen werden.

**Beraten Sie auch politische Entscheidungsträger oder Verwaltungen?**

**Walter:** Ja, die Beratung ist ganz wichtig, auch wenn politische Entscheidungen natürlich oftmals ihre eigene Dynamik haben. Bei Vulkanen ist der Kontakt meist dann da, wenn es brenzlich wird. Im Jahr 2010 wurde ich in den Forschungsausschuss des Deutschen Bundestages eingeladen, es war eine wichtige Möglichkeit, Wissenschaft zu kommunizieren und zeigt auch, dass der Wille da ist, Experten zu Rate zu ziehen. Dort ging es darum, wie man die Asche des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull über Deutschland deuten muss, und inwiefern ein Grenzwert der Aschekonzentration hilfreich ist. Wohlgedenkt zu einem Zeitpunkt als es kaum verlässliche Daten zur Aschekonzentration gab.

**Wie viel Sinn machen Grenzwerte für Asche in der Atmosphäre, um in einer solchen Krisensituation sichere Entscheidungen zu treffen?**

**Walter:** Grenzwerte sind politisch sinnvoll und geben vermutlich auch die richtige Richtung an. Daher ist der Beschluss ein Flugverbot dann zu erteilen, wenn mehr als zwei Milligramm Asche pro Kubikmeter Luft nachgewiesen werden praktikabel und nachvollziehbar. Vorher war die

Regel „zero ash tolerance“, d. h., es galt ein Flugverbot, sobald Asche vorhanden war. Dies lag auch am fehlenden Grundverständnis und der stockenden Forschung zum Thema. Ganz wichtig ist dabei noch immer die Kontrolle der Aschenkonzentration. Es gilt, diese flächendeckend und europaweit zu bestimmen. Wissenschaftlich und technisch machen allgemeingültige Grenzwerte jedoch nur bedingt Sinn, da möchte ich sehr deutlich sein, weil mögliche Schäden sehr von der Vulkanasche selbst, vom Turbinentyp und der Nutzungsdauer der Turbinen abhängen. So manches Flugzeug und auch so mancher Hubschrauber kann selbst dann fliegen, wenn hocheffiziente Düsentriebwerke aufgrund der hohen Temperaturentwicklung bereits deutliche Schäden davortragen.

#### **Welche Flugzeuge können bei Vulkanasche in der Atmosphäre nicht fliegen?**

**Walter:** Diesbezüglich gab es nach 2010 einige neue Untersuchungen, unter anderem von der NASA und der Industrie gefördert. Man hat verstanden, dass Vulkanasche sich in Turbinen deutlich anders verhält als kristalline Sande etwa in Wüstenregionen. Vulkanasche wird schon bei 600 °C weich und schmilzt bei basaltischer Zusammensetzung häufig bei Temperaturen von etwa 1.000 °C. Moderne Passagiermaschinen entwickeln mittlerweile deutlich höhere Temperaturen, teils über 1.600 Grad. Dadurch bilden sich aus der Vulkanasche Schmelztröpfchen, die an der Turbinen-Schaufel und Lüftungslöchern kleben, Temperaturbrücken bilden und somit sogar die hitzeresistente Keramikschicht abplatzen lassen. Hinzu kommen Korrosionsschäden und Langzeitschäden. Studien schlagen vor, dass neben festen Grenzwerten der Aschenkonzentration auch das Volumen der eingezogenen Luft pro Sekunde und die Zeitdauer der Nutzung in der Aschewolke berücksichtigt werden sollten. Daher ist es nicht nur vom Flugzeugtyp, sondern auch der Nutzung und Wartung abhängig. Die Frage ist also nicht ganz so leicht zu beantworten. Die derzeitige Lösung, die finale Entscheidung in der Verantwortung der Fluggesellschaft zu lassen, die das

wiederum an den Piloten weiterleitet, halte ich für nicht optimal und wird auch von großen Rückversicherern angemahnt.

#### **Wo liegt der Grenzwert heute?**

**Walter:** Es gibt eine mehrstufige Teilung. Der für die zivile Luftfahrt vermutlich wichtigste Grenzwert liegt bei 2 Milligramm Vulkanasche pro Kubikmeter Luft. Unter Auflagen kann auch darüber geflogen werden. Wichtig ist es nun, diese Konzentrationen zu überwachen und zwar im Nahfeld und im Fernfeld. Einen Flug auf Sicht finde ich da weniger beruhigend und würde erwarten, dass in Kombination Lidar-, Satellitendaten, experimentelle Daten erhoben und Testflüge durchgeführt werden müssen. Auch hier liegen die Tücken im Detail: Boden- und satellitengestütztes Lidar und Bildverfahren erlauben es, insbesondere hohe und weit entfernte Transportwege abzubilden. Aber die nahen und scharfen Grenzen von Grenzwerten können sie nur unscharf abbilden. Aus vulkanologischer Sicht ist besonders wichtig, schnell Überwachungsdaten vom Umfeld der Vulkane zu liefern und die Pulse, Chemie, Schmelzpunkt und Korngröße der Asche, wie auch die Verdriftung der Aschewolke zu messen.

#### **Angenommen, es gäbe Vulkanausbrüche wie 2010 in Island, die Europa und Deutschland betreffen: An welche Stellen oder Gremien könnten sich die Politik in der Wissenschaft wenden? Wie sähe hier eine Informationskette aus?**

**Walter:** Wichtig wäre meines Erachtens, unterschiedliche Expertisen in ein Gremium einzuladen. Deutschland hat enorme technische Möglichkeiten, was die Untersuchung von Vulkanen direkt etwa auf Island angeht, um schon dort den Eruptionsverlauf zu vermessen und in der Ferne mit Lidar die Aschenkonzentration und Windverdriftung zu überwachen. Bei einem neuen Ausbruch gehe ich davon aus, dass zügig ein solches Expertengremium zusammengestellt wird. Das verlief im Jahr 2010 noch etwas holprig, wichtige Brücken zwischen den unterschiedlichen Fachdisziplinen wie Vulkanologie,

Atmosphärenforschung, Wettermodellen, bis hin zur Anwendung waren gänzlich neu. Auf dieser Information kann man nun aufbauen, auch wenn es noch große Herausforderungen gibt.

Das wird insbesondere jetzt interessant, da gegenwärtig (Juni 2020) isländische Behörden vor dem Vulkan Grimsvötn warnen – auch dieser Riese liegt unter einem großen Eisschild. Wichtig bei einem neuen Ausbruch wird es auch sein, komplexe wissenschaftliche Daten für Entscheidungsträger und die Luftfahrtbranche verständ-

lich aufzuarbeiten. Die Politik würde insbesondere etwa auch in den Helmholtz-Zentren Ansprechpartner\*innen finden, welche gut vernetzt und ausgestattet sind, und über die erforderliche technische und fachliche Expertise verfügen.

**Herr Privatdozent Dr. Walter, wir danken für das Gespräch.**

Das Interview führte Jana Kandarr (ESKP).

## Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung von Vulkanasche

Dr. Volker Matthias (Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung, HZG)

**Durch Aerosolpartikel, die bei Vulkanausbrüchen in die Atmosphäre geschleudert werden, gelangt weniger Licht an die Erdoberfläche. Dies kann zum Beispiel landwirtschaftliche Erträge mindern, die Partikel können aber auch Flugzeug-Triebwerke schädigen. Besonders feinste Aschepartikel werden großräumig transportiert. Ihre Verteilung in der Atmosphäre gut zu kennen, ist daher von hoher Bedeutung. Der Ferntransport von Aerosolen lässt sich mit Modellen beschreiben, die auch bei den Vorhersagen der neun großen Warnzentren, den Volcanic Ash Advisory Centers, genutzt werden.**

- Die großräumige Ausbreitung von Vulkanasche hat vielfältige Auswirkungen auf Wetter, Klima, Luftqualität und Trübung der Atmosphäre.
- Um die Ausbreitung von Aerosolpartikeln in der Atmosphäre zu berechnen, muss bekannt sein, wie viele Partikel welcher Größe in die Atmosphäre gelangen.
- Die regionale und globale Transportmodellierung von Vulkanpartikeln erfolgt auf Grundlage komplexer Berechnungen. Sie sind notwendig, um im Falle eines Vulkanausbruchs für Sicherheit im Flugverkehr zu sorgen.

Vulkane gehören zu den bedeutenden natürlichen Quellen für atmosphärische Spurengase und Partikel. Neben permanenten, aber eher niedrigen Emissionen von aktiven Vulkanen, können besonders explosive Vulkanausbrüche erhebliche Mengen von Gasen und Partikeln in sehr kurzer Zeit in die Atmosphäre, und dort in große Höhen von vielen Kilometern, schleudern. Bei den Gasen handelt es sich, neben Kohlendioxid und Wasserdampf, vornehmlich um Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff. Die emittierten Partikel werden als Asche bezeichnet, sie besteht chemisch zum überwiegenden Anteil aus Siliziumdioxid.

### Feine Aschepartikel werden in der Regel weit verfrachtet

Nur die kleinen Aschepartikel mit einem Durchmesser von kleiner als 63 Mikrometern, die sogenannte feine Asche, sind in der Atmosphäre für den Transport über weite Strecken hinweg

geeignet. Bei einem Vulkanausbruch beträgt der Anteil dieser kleinen Aschepartikel an der gesamten emittierten Masse meist nur wenige Prozent (Mastin et al.; 2009, Langmann et al., 2012). Dennoch kann ihr Einfluss bedeutend sein.

Die großräumige Ausbreitung von Vulkanasche über die Atmosphäre geht mit vielfältigen Wirkungen auf Wetter, Klima, Luftqualität und Trübung der Atmosphäre einher. Dies wiederum kann Folgen für den Luftverkehr oder die Qualität unserer Atemluft haben, aber auch landwirtschaftliche Erträge und die Erzeugung von Solarstrom mindern.

Sowohl Vorhersagen der Ausbreitung von Vulkanasche als auch rückblickende Analysen der Folgen von hohen Vulkanaschekonzentrationen in der Atmosphäre sind daher von hoher Bedeutung. Hierfür können unterschiedliche Modellsysteme benutzt werden, die typischerweise eng mit Wettervorhersagemodellen verknüpft

sind. In der regionalen und globalen Transportmodellierung unterscheiden wir in erster Linie zwischen sogenannten lagrangeschen Modellen und eulerschen Modellen.

Im **lagrangeschen Modellansatz** betrachten wir eine Vielzahl von Teilchen oder ein Luftpaket und verfolgen diese dann auf ihrem Weg durch Zeit und Raum. Dabei unterliegen diese Teilchen Einflüssen, die aus den physikalischen Eigenschaften der sie umgebenden Luft resultieren. So kann die Ausbreitung und Verdünnung von Emissionen aus einer Punktquelle wie einem Vulkan sehr genau modelliert werden. Modellierungen der chemischen Umwandlungen durch die Interaktion mit anderen Stoffen und die Berücksichtigung vieler Quellen sind hingegen aufwändig.

Im **eulerschen Modellansatz** ist das zu betrachtende Gebiet vollständig in Gitterzellen unterteilt, die in sich homogen sind. Das bedeutet, dass sie überall die gleichen physikalischen Eigenschaften und eine homogene Stoffverteilung haben. Der Transport von Teilchen findet durch Austausch mit den umgebenden Gitterzellen statt, der Verlust von Teilchen durch Ablagerung an der Oberfläche in den bodennahen Gitterzellen. Die unmittelbare Verdünnung einer emittierten Schadstoffmenge im Volumen der die Quelle umgebenden Gitterzelle stellt hier einen Nachteil dar, der zur Überschätzung der Diffusion durch das Modell führt.

Beide Typen von Modellen nutzen meteorologische Daten aus Wettervorhersagemodellen oder auch sogenannte Re-Analysedaten. Diese beziehen zahlreiche meteorologische Beobachtungen mit ein, um den Transport von Stoffen in der Atmosphäre zu berechnen.

Werden auch zusätzlich noch chemische Reaktionen berücksichtigt, spricht man von Chemietransportmodellen. In diesen können auch physikalische Umwandlungsprozesse von Aerosolpartikeln berücksichtigt werden. Für die Ausbreitung von Vulkanasche sind chemische Reaktionen von untergeordneter Bedeutung. In der Regel kann die Asche als nicht-reaktiv angenom-

men werden, ohne dass hierdurch Fehler in der Modellierung entstehen. Soll die Ausbreitung und Wirkung von Schwefeldioxid untersucht werden, das bei Vulkanausbrüchen ebenfalls in großer Menge ausgestoßen werden kann, so müssen chemische Reaktionen aber miteinbezogen werden.

### **Kleine Aerosolpartikel können Tausende Kilometer weit transportiert werden**

In der Atmosphäre befinden sich stets zahlreiche Teilchen, sogenannte Aerosolpartikel. Sie sind von sehr unterschiedlicher Größe, chemischer Zusammensetzung und optischer Wirkung. Wichtige anthropogene bzw. von Menschen verursachte Quellen für Aerosolpartikel sind Verbrennungsprozesse, beispielsweise durch Kohlekraftwerke oder durch den Automobilverkehr. Natürliche Quellen für Aerosolpartikel sind Ozeane (Seesalzpartikel), Wüsten (Staubpartikel) und eben Vulkane.

Die Größe von Aerosolpartikeln wird meist mit ihrem Durchmesser beschrieben, auch wenn die allerwenigsten Partikel im trockenen Zustand tatsächlich kugelförmig sind. Atmosphärische Partikel haben Durchmesser von wenigen Nanometern bis zu ca. 100 Mikrometern. Partikel, die sehr viel größer sind, fallen durch ihr Gewicht schnell herunter. Die Partikelmasse und die Partikelform sind entscheidend für die Sinkgeschwindigkeit. Ein Transport sehr großer Partikel über viele Kilometer ist nur in Extremsituationen, wie bei sehr starken Winden, großen Feuern oder eben Vulkaneruptionen möglich. Kleinere Partikel werden jedoch durch Turbulenzen in der Atmosphäre immer wieder nach oben transportiert und sinken teilweise nur sehr langsam bis zum Boden. Sie können so über viele tausend Kilometer transportiert werden.

### **An Aerosolpartikeln sammelt sich Wasser**

Je nach chemischer Zusammensetzung können Aerosolpartikel verschiedene Eigenschaften haben. Von großer Bedeutung ist dabei die Eigenschaft Wasser zu binden, d. h. hygroskopisch zu sein. Solche Teilchen eignen sich gut als so-

nannte Kondensationskerne. Das bedeutet, dass – je nach atmosphärischen Bedingungen – zuvor gasförmiger Wasserdampf auf der Oberfläche dieser Teilchen kondensieren kann und diese dann möglicherweise zu Wolkentröpfchen anwachsen können, die abregnen. Diese Auswaschung durch Niederschlag ist ein Hauptweg, über den insbesondere hygroskopische Partikel aus der Atmosphäre entfernt werden können. Bei trockenem Wetter können Aerosolpartikel viele Tage oder sogar Wochen in der Atmosphäre verweilen. Dies trifft auch auf Vulkanasche zu, die meist nicht sehr hygroskopisch ist.

Aerosolpartikel streuen das auf sie treffende Sonnenlicht in andere Richtungen. Dadurch vermindern sie das direkt auf die Erdoberfläche fallende Licht. Ein weiterer Teil des Sonnenlichts wird, je nach Zusammensetzung des Aerosols, absorbiert. Beide Prozesse zusammen sorgen für eine Schwächung des Lichts, die wir als Extinktion bezeichnen. Betrachtet man die gesamte Extinktion auf dem Weg durch die Atmosphäre, spricht man von der optischen Dicke der Atmosphäre.

### Höhe der Eruptionssäule und Aschevolumen: Wichtige Informationen zur Berechnung von Emissionen

Um die Ausbreitung und den Verbleib von Aerosolpartikeln in der Atmosphäre zu berechnen, muss in erster Linie bekannt sein, wie viele Partikel welcher Größe in die Atmosphäre gelangen. Zusätzlich sollte die chemische Zusammensetzung bekannt sein. Bei Vulkanaerosolen kann man einerseits vereinfacht annehmen, dass es sich weitgehend um mineralische Partikel handelt. Diese sind dann weder stark hygroskopisch, d. h. in der Lage, Feuchtigkeit aus der Umgebung aufzunehmen, noch sind sie chemisch aktiv.

Jedoch ergeben sich andere große Unsicherheiten. Erstens lässt sich nur sehr schwer abschätzen, wie viel Material während der Eruption in die Atmosphäre geschleudert wird. Zum Zweiten sind für den Ferntransport nur die sehr kleinen Aschepartikel relevant. Eine möglichst gute Kenntnis über die Größenverteilung aller emit-

tierten Partikel, besonders aber für die feine Asche (Durchmesser kleiner als 63 Mikrometer), ist für die Transportmodellierung von großer Bedeutung.

Zum Dritten spielt die Höhenverteilung der Partikelemission eine große Rolle. Vulkanische Eruptionen können bis in Höhen von mehr als 15 Kilometer reichen und damit auch große Mengen von Asche und Gasen in die Stratosphäre einbringen. Es ist leicht vorstellbar, dass die Höhenverteilung der Emission eine große Rolle für den Transport der Aschepartikel spielt, da Windrichtung und Geschwindigkeit stark mit der Höhe variieren können. Als Faustformel und erste Annahme gilt ein Zusammenhang zwischen der Höhe (H) der Eruptionssäule in Kilometer (km) und dem Volumenfluss (V) der gesamten Asche in Kubikmeter pro Sekunde gemäß Mastin et al. (2009):

$$H = 2.0 \times V^{0.241}$$

Aus dem Volumenfluss kann durch Multiplikation mit der Dichte der Massenfluss berechnet werden. Der sehr geringe Anteil kleiner Partikel, die für den Ferntransport geeignet sind, muss anschließend geschätzt werden. Der gesamte Massenfluss feiner Asche sowie ihre Höhenverteilung sind also mit hohen Unsicherheiten behaftet.

### Eine Kombination von Beobachtungen verbessert die Ferntransportmodellierung

Die für die Transportmodellierung wichtigen Eingangsparameter lassen sich für Vulkaneruptionen in der Regel also nur sehr schwer bestimmen. Sie unterliegen zudem einer starken zeitlichen Variation, da die Vulkanaktivität enorm stark schwanken kann. Daraus folgt, dass Transportrechnungen mit Beobachtungen kombiniert werden müssen, um verlässliche Resultate über die Verteilung der Asche in der Atmosphäre zu liefern. Diese können sowohl die Eruption selbst betreffen, insbesondere die Vertikalverteilung lässt sich am besten vor Ort beobachten. Dies betrifft aber auch verschiedene Messungen der

Ausdehnung der Aschewolke, ihrer Bestandteile und deren optischer Wirkung.

Die optische Wirkung ist von besonderem Interesse, da viele Beobachtungen, die sich aus größerer Distanz mit Fernerkundungsverfahren machen lassen, die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit den Aschepartikeln ausnutzen. Beispiele hierfür sind Satellitenbeobachtungen, die Laserfernerkundung (Lidar), bodengebundene optische Messungen der Schwächung von Sonnen- oder Mondlicht (Sonnenphotometer, seltener: Mondphotometer) und in-situ Messungen von Aschepartikeln mit optischen Verfahren (z. B. Optical Particle Counter, OPC). Nachteile der optischen Fernerkundungsverfahren sind allerdings, dass Wolken sie entscheidend behindern können.

### Berechnungen zur Ausbreitung von Vulkanasche am Beispiel des Eyjafjallajökull-Ausbruchs

Am 14. April 2010 brach der isländische Vulkan Eyjafjallajökull aus. In einer großen Eruption schleuderte er große Mengen Vulkanstaub bis in viele Kilometer Höhe in die Atmosphäre. Allerdings verblieb die Vulkanasche innerhalb der Troposphäre und wurde so nicht über die gesamte nördliche Erdhalbkugel verteilt. Durch die vorherrschenden nordwestlichen Winde zum Zeitpunkt des Ausbruchs wurden die kleinsten Partikel direkt nach Zentraleuropa transportiert und verblieben dort für viele Tage in der Atmosphäre. Ein fast völliger Stillstand des Flugverkehrs in Europa war die Folge, da nicht ausgeschlossen werden konnte, dass es durch die Vulkanasche zu schweren Triebwerksschäden kommen könnte. Abbildung 1 zeigt die Ausbreitung der Vulkanasche im Bereich von 2000 bis 7000 Metern Höhe. Die Daten stammen aus einer Simulation mit dem eulerschen Chemietransportmodell CMAQ (Matthias et al., 2012). Die Emissionsstärke, die Größenverteilung der Aschepartikel und deren Höhenverteilung waren zum damaligen Zeitpunkt nicht sehr gut bekannt. Sie wurden durch Vergleich mit Beobachtungen innerhalb des Sonnenphotometer-Mess-

netzes Aeronet (Holben et al., 1998) so angepasst, dass die modellierte und die beobachtete optische Dicke durch die Vulkanasche gut zusammenpassten.

Das Aeronet-Messnetz verfügt über einige Dutzend automatisierter Messstationen, deren Daten schnell und leicht verfügbar sind, sodass sie sich ideal für eine Kombination mit Modellergebnissen im Falle eines Vulkanausbruchs eignen. Beim Ausbruch des Eyjafjallajökull kam hinzu, dass in den ersten Tagen wolkenfreie und damit ideale Beobachtungsbedingungen über Europa herrschten.

Für die Simulation mussten weitere Annahmen gemacht werden. So wurde ein mittlerer Durchmesser der feinen Asche von 6 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) angenommen und die Schwächung des Sonnenlichts durch sämtliche in der Atmosphäre vorhandenen Aerosolpartikel musste aus den vom Modell gelieferten Aerosolkonzentrationen (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) berechnet werden. Die Nutzung eines eulerschen Chemietransportmodells, in dem auch die Bildung und der Transport von nicht-vulkanischen Aerosolpartikeln berücksichtigt wird, erlaubte erst einen ausreichend genauen Vergleich mit vielen räumlich verteilten Sonnenphotometer-Messungen. Diese messen die Schwächung des Lichts zwischen ihrer meist bodennahen Position und der Sonne und damit ebenfalls die Wirkung sämtlicher Aerosolpartikel. Durch die Einbeziehung vieler Messstandorte konnte auch die Verteilung der Aschewolke erfasst werden.

Am Ende wurden die Ergebnisse nochmals mit unabhängigen Beobachtungen durch Lidarsysteme und an Bord von Flugzeugen überprüft. Es stellte sich heraus, dass die Ergebnisse gut zueinander passten. Allerdings erkennt man auch deutlich, dass das Modell die Höhenverteilung stark verschmiert wiedergibt. Dies ist u. a. ein Effekt der oben beschriebenen unmittelbaren Verdünnung von Stoffen auf das gesamte Volumen einer Gitterzelle in eulerschen Modellen.

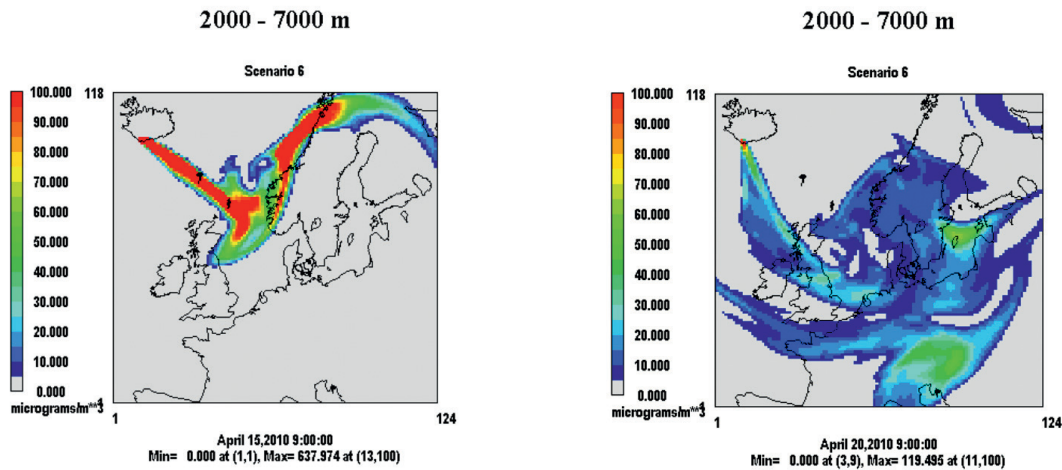


Abb. 1: Screenshots aus der Modellsimulation der Ausbreitung der Vulkanasche beim Ausbruch des Eyjafjallajökull auf Island am 14. April 2010. Gezeigt ist der Mittelwert der Aschekonzentration im Bereich zwischen 2000 m und 7000 m. GIF: HZG

### Volcanic Ash Advisory Centers: Genauere Vorhersagen bleiben eine Herausforderung

Auf der Erde gibt es viele aktive Vulkane, von denen einige jederzeit ausbrechen und große Mengen Asche in die Atmosphäre schleudern können. Für die Sicherheit des Flugverkehrs ist es sehr wichtig, jederzeit gute Vorhersagen der Ascheverteilung aufgrund von Vulkanausbrüchen zu erhalten. Hierfür sind weltweit neun operationell arbeitende Warnzentren, die Volcanic Ash Advisory Center (VAAC), zuständig, die die Vorhersagen für jeweils einen ihnen zugewiesenen Teil der Erde machen.

Entscheidend ist hier, in welchem Gebiet der jeweilige Vulkan liegt. Für Island ist beispielsweise das VAAC in London zuständig, das am UK Met Office angesiedelt ist. Für die Vorhersage wird das lagrangeschen Modell NAME genutzt, mit dem z. B. auch Vorhersagen bei großen Industriebränden oder bei der Havarie des Atomkraftwerks in Fukushima 2011 gemacht wurden (Witham et al., 2019). Aufgrund der Unsicherheiten in der Bestimmung der Quellstärken während eines Vulkanausbruchs (Quellstärke = Menge der ausgeworfenen Asche) bleiben gute Vorhersagen der atmosphärischen Aschekonzentrationen auch in Zukunft eine Herausforderung. Sie müssen stets durch Kombination mit geeigneten Beobachtungen überprüft werden.

## Referenzen

- Ansmann, A., Tesche, M., Gross, S., Freudenthaler, V., Seifert, P., Hiebsch, A., Schmidt, J., Wandinger, U., Mattis, I., Müller, D. & Wiegner, M. (2010). The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany. *Geophysical Research Letters*, 37(13):L13810. doi:10.1029/2010GL043809
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I. & Smirnov, A. (1998). AERONET- A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1-16. doi:10.1016/S0034-4257(98)00031-5
- Langmann, B., Folch, A., Hensch, M. & Matthias, V. (2012). Volcanic ash over Europe during the eruption of Eyjafjallajökull on Iceland, April-May 2010. *Atmospheric Environment*, 48, 1-8. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.03.054
- Mastin, L. G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., ... Waythomas, C. F. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(1), 10-21. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008
- Matthias, V., Aulinger, A., Bieser, J., Cuesta, J., Geyer, B., Langmann, B., Serikov, I., Mattis, I., Minikin, A., Mona, L., Quante, M., Schumann, U. & Weinzierl, B. (2012). The ash dispersion over Europe during the Eyjafjallajökull eruption - Comparison of CMAQ simulations to remote sensing and air-borne in-situ observations. *Atmospheric Environment*, 48, 184-194. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.06.077
- Schumann, U., Weinzierl, B., Reitebuch, O., Schlager, H., Minikin, A., Forster, C., ... Sturm, K. (2011). Airborne observations of the Eyjafjalla volcano ash cloud over Europe during air space closure in April and May 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(5), 2245-2279. doi:10.5194/acp-11-2245-2011
- Witham, C., Hort, M., Thomson, D., Leadbetter, S., Devenish, B., Webster, H., Beckett, F. & Kristiansen, N. (2019). *The current volcanic ash modelling set-up at the London VAAC* (Technical Summary v1.5). Exeter: Met Office.

## Mit Katastrophen unterhalten. Zur Faszination von Vulkanen im Film

PD Dr. Dierk Spreen (Earth System Knowledge Platform | ESKP)

**In Vulkankatastrophenfilmen werden die zerstörerischen Wirkungen eines Vulkanausbruchs zu einem unterhaltsamen und faszinierenden Ereignis. Naturgewalt wird als Unterhaltungserlebnis rezipiert. Was können die Zuschauer dabei gewinnen? Warum lässt sich mit Naturkatastrophenfilmen und cineastischen Vulkanausbrüchen ein Publikum anlocken?**

- Im Film können Vulkankatastrophen unterhaltsam sein.
- Vulkankatastrophenfilme thematisieren häufig aber auch gesellschaftliche Grenzen wissenschaftlicher Expertise.
- Untersucht werden *Dante's Peak* (USA, 1997), *Volcano* (USA, 1997), *The Core* (USA, 2003) und *Vulkan* (BRD, 2009).
- Es lassen sich vier Ebenen oder Grundformen der medialen Unterhaltung unterscheiden.
- Um sich von einem Vulkankatastrophenfilm unterhalten zu fühlen, ist der Wechsel in eine medienkompetente Rezipientenrolle wichtig.

Das lateinische „fascinare“ bedeutet „behexen“. Es wurde zuerst in der Bedeutung von „bezaubern“, später von „anziehen“ in die deutsche Sprache übernommen. Faszinierend können nun ganz offensichtlich auch schreckliche Dinge sein. Die Unterhaltungskultur kennt eine Vielzahl von Genres, in denen der Schrecken im Mittelpunkt steht. Die dabei ausgelöste Angstlust liefert sogar ein Motiv zum Genuss entsprechender Angebote.

Die klassischen Beispiele hierfür sind das Horror-, Zombie- und Splatter-Genre, Teile der Science-Fiction und der publikumsstarke Katastrophenfilm mit dem wichtigen Untergenre des Naturkatastrophenfilms (Piper, 2012, S. 69). Zu letzterem zählen selbstverständlich auch Filme, die Vulkanausbrüche in den Mittelpunkt des Geschehens stellen. Mithilfe des anthropologisch-phänomenologischen Ansatzes der Medienforschung lässt sich verstehen, warum der Ausbruch eines Vulkans im Film nicht nur unterhalt-

sam sein kann, sondern in genretypischen Filmen in aller Regel auch ist. Die Faszination, die die auf Leinwand oder Bildschirm zur Darstellung gebrachte Naturgewalt ausübt, wird medial und ästhetisch gebannt. Die realweltliche Wirkung des Schreckens bleibt aus; vielmehr eröffnet sich für das Publikum ein Raum vielfältiger, entlasteter Erfahrungen.

### Aufklärung und Mythos

In einem der wohl einflussreichsten kultur- und sozialtheoretischen Texte zur modernen Gesellschaft haben Max Horkheimer und Theodor W. Adorno ihre Enttäuschung darüber auf den Begriff gebracht, dass die Aufklärung unvollendet geblieben ist. Auf der einen Seite gelingt es dem Menschen, sich mittels Wissenschaft und Technologie immer mehr aus Naturverhältnissen zu befreien. Auf der anderen Seite bleibt die Aufklärung in gesellschaftlicher Hinsicht zwar nicht wirkungslos, aber hier ist sie doch in zahlreiche

## ” Unterhaltung ist nicht einfach eine Flucht vor der Wirklichkeit.

innere soziale Widersprüche, Mythenbildungen und Ambivalenzen verstrickt, die ihre Umsetzung behindern oder ihr sogar entgegenstehen (Horkheimer & Adorno, 1987).

Horkheimer und Adorno nannten den Prozess des Ineinandergreifens von Aufklärung und Mythos die „Dialektik der Aufklärung“. So komplex und anspruchsvoll ihre Beschreibung dieser Dialektik auch ist, es ist sicher nicht falsch, sie so zu lesen, dass die beiden Autoren mit ihrem Werk auf inhärente strukturelle Widersprüche der modernen Gesellschaft aufmerksam machen wollten, die moderne Menschen für neue Mythen anfällig machen können. In Zeiten, in denen angesichts erheblicher krisenhafter gesellschaftlicher Herausforderungen – Klimawandel, Artensterben, Pandemien, Finanzkrisen –, die Mythenbildung wieder an der Tagesordnung ist und politisch instrumentalisiert wird, sollte man über die Thesen in der „Dialektik der Aufklärung“ daher vielleicht neu nachdenken.

Das Buch von Horkheimer und Adorno enthält auch ein Kapitel über die Kulturindustrie, das oftmals verkürzend als eine generelle Kulturkritik gelesen wird. Das ist aber nicht die Intention der Autoren, die sich bei genauerem Lesen als fleißige Kinogänger entpuppen. Dennoch ist auch dieses Kapitel Ausdruck einer Enttäuschung. Der Moment der Entlastung, der Unterhaltung und der Suspendierung von den alltäglichen Zwängen, die das Publikum im Kinosaal erleben kann, bestätigte zuletzt doch die sozialen Verhältnisse. Das bedeutet bei aller Kritik aber auch, dass die beiden Autoren die populäre Kultur nicht einfach aus der Perspektive einer Kulturrelite verdammen. Vielmehr verteidigen sie „den unverkürzten, materiell sinnlichen Glücksanspruch der Vielen“ eben gegen Bevormundung (Maase, 1997, S. 29).

## Vulkane im Unterhaltungsfilm

Die filmische Thematisierung der Macht der Erde, die sich mittels der Inszenierung von Vulkanausbrüchen gut darstellen lässt, ist ein geeigneter Gegenstand, um die Bedeutung der Unterhaltungskultur vor dem Hintergrund der Dialektik der Aufklärung in den Blick zu nehmen. Denn im magmatischen Katastrophenfilm taucht die Aufklärung in Gestalt von Vulkanologen oder Geologinnen explizit als Akteur auf. Andererseits wird auf die Grenzen der Aufklärung in verschiedener Hinsicht hingewiesen. In Gestalt eines Vulkans erscheint eine „höhere Macht [...], die der Mensch nicht zu bändigen vermag“ (Piper, 2012, S. 49). Zudem drängen sich insbesondere zu Filmbeginn andere gesellschaftliche Interessen – in der Regel Macht- und Wirtschaftsinteressen – in den Vordergrund. Sie bremsen die wissenschaftliche Expertise aus, verhindern Prävention und drohen damit, die Wirkkraft der Katastrophe noch zu vergrößern.

Der Vulkanfilm zählt zum Genre des Katastrophenfilms. Katastrophenfilme gehören „zu den kommerziell erfolgreichsten Filmen überhaupt“ (Piper, 2012, S. 18). Wie andere Katastrophenfilme auch, erzählen Vulkanfilme Geschichten über das Verhalten von Menschen in Ausnahmezuständen. Sie erzählen dabei auch Geschichten über die Wissenschaft und die Rolle der Wissenschaft in der Gesellschaft.

Exemplarisch nehme ich vier Magma-Schocker in den Blick. Im Anschluss greife ich auf den phänomenologisch-anthropologischen Ansatz zurück, um den Wert und die Bedeutung dieser Filme für das Publikum zu verstehen. Dieser Ansatz wurde von Thomas Hausmanninger und Thomas Bohrmann entwickelt (Hausmanninger & Bohrmann, 2002). Die beiden fordern eine dichte Beschreibung der Rezeption von Unterhaltungsangeboten in deren alltäglichen und gewöhnlichen Nutzungskontexten. Es handelt sich also um einen nutzungsorientierten Zugang, der mediale Unterhaltung in ihrer leiblich-sinnlichen Totalität zu erfassen sucht und auf ihre spezifischen ästhetischen Erlebnisqualitäten sowie Selbsteffekte hin abklopft. Dieser

Ansatz erfüllt somit die Forderung, den Glücksanspruch der Vielen ernst zu nehmen und herauszuarbeiten, welche Rollen medialen Unterhaltungsangeboten in der gegenwärtigen Gesellschaft zukommen kann.

Unterhaltung ist nicht einfach eine Flucht vor der Wirklichkeit, sondern sie ist Teil unserer Wirklichkeit. Kultur- und sozialtheoretisch ist es daher wichtig zu verstehen, wie Unterhaltungsfilme genutzt werden können. Vulkankatastrophenfilme erlauben ihren Nutzerinnen und Nutzern einen Zugang zur Naturgewalt aus dem Erdinneren, aber im Rahmen ihrer Publikumsrolle bleiben sie vom Ernst einer solchen Lage befreit. Zugleich werden Reaktionsweisen von Betroffenen sowie die die Rolle der Wissenschaft in der Gesellschaft thematisiert.

### Dante's Peak

Die Vergleichsfolie für neuere Vulkankatastrophenfilme ist zweifellos *Dante's Peak* mit Pierce Brosnan als dem Vulkanologen Dr. Harry Dalton und Linda Hamilton in der Rolle von Rachel Wando, der Bürgermeisterin des Ortes unterhalb des Vulkans. Der Streifen kam 1997 in die Kinos. Im Film wird der Mount St. Helens, der 1980 ausbrach, mehrfach erwähnt. Tatsächlich sieht der Vulkan in *Dante's Peak* dem berühmten Feuerberg im US-Bundesstaat Washington doch sehr ähnlich. Der Name des Films ist natürlich auch eine Anspielung auf die Göttliche Komödie, in der eine Reise durch Inferno und Fegefeuer geschildert wird.

Dr. Dalton wird in den kleinen Ort Dante's Peak beordert, weil der gleichnamige Vulkan über dem Ort verdächtige seismische Aktivitäten zeigt. Der Vulkan gehört wie der St. Helens zur Kaskadenkette an der nordwestlichen Pazifikküste. Dalton registriert weitere Phänomene, die auf einen baldigen Ausbruch hindeuten. Er alarmiert die Bürgermeisterin und den Stadtrat, wird aber von seinem Vorgesetzten zurückgepfiffen, der dies für verfrüht hält. In der Stadt befindet sich zeitgleich auch ein Investor, den man nicht verunsichern möchte, um nicht 800 neue

Arbeitsplätze zu gefährden. Aber die Warnzeichen verdichten sich. Just als die Bürgerversammlung einberufen wird, bricht Dante's Peak dann aus und mit ihm die Panik in der Bürgerversammlung. Im Gedränge am Ausgang stürzt ein Bürger und droht von der Masse zu Tode getreten zu werden, die Ordnungsrufe vom Podium verhallen ungehört. Damit wird klar, was droht, wenn die soziale Ordnung zerfällt.

Mit dem Ausbruch beginnt auch die Phase der Spezialeffekte, die nicht zuletzt dadurch ihre eigene Faszination entwickeln, dass sie verdichtete Sinneseindrücke vermitteln, wie sie selbst Vulkanexperten im Rahmen ihrer Berufserfahrung in der Regel nicht vergönnt sind. *Dante's Peak* zieht alle Register: kochende Quellen, Explosion, Ascheregen, Lavabomben, Lavaflüsse, Lahare, Säureseen und am Schluss auch noch der pyroklastische Strom. Da bleibt in dem beschaulichen Örtchen kein Stein auf dem anderen. Dalton und Wando mittendrin, die versuchen, Wandos Kinder aus erster Ehe zu retten, welche wiederum ihre störrische Großmutter retten möchten. Der Film wird zu einer Abhandlung über Solidarität, Verantwortung und Umsicht. Gemeinsam bewältigt die sich anbahnende, neue Kleinfamilie alle Gefahren, vor allem durch Solidarität und moralische Stärke, überlegtes und entschlossenes Handeln, aber auch durch Opfer. Der Wissenschaftler erweist sich als erstaunlich praxistauglicher Partner beim Durchgang durch das Fegefeuer. Am Ende ist es der Berg selbst, der der Solidaritätsgruppe in einer Höhle den notwendigen Schutz vor der pyroklastischen Wolke gewährt. Die Rettung wird möglich, weil das Ortungsgerät der NASA, das Dalton vorsorglich eingepackt hatte – „das kann ganz nützlich sein“ –, Signal gibt. So endet der Film mit der Geburt einer neuen Familie. Deren Mitglieder entsteigen inklusive Hund einer nach dem anderem der Gebärmutter des Vulkans. Verantwortung, Gefühle und Moral, Wissen und Technologie und am Ende auch der Berg selbst wirken zusammen und sorgen so für ein Happy End. Die Heldenreise endet im Garten Eden der amerikanischen Mittelklasse-Kleinfamilie.

## Volcano

Wenige Monate nach *Dante's Peak* kam *Volcano* heraus. Das Filmplakat warb: „It's hotter than hell“. In den Hauptrollen sieht man Tommy Lee Jones als Leiter des Office of Emergency Management (OEM) und Anne Heche als Geologin Dr. Amy Barnes in der klassischen Rolle des Scientist-Who-Nobody-Listens-To-Until-It's-Nearly-Too-Late. Der Film erzählt von einem Vulkanausbruch mitten in Los Angeles – ein im Übrigen sehr weit hergeholtes Szenario (Rivalta, 2020). Ein paar warnende Anzeichen, die Dr. Barnes identifiziert, werden ignoriert, weil die daraus resultierenden Interventionen, die logistischen Abläufe in der Stadt stören würden und sie im Unsicherheitsraum der wissenschaftlichen Vorhersage verbleiben müssen. Allerdings hält sich *Volcano* ohnehin nicht lange mit solchen Vorgesichten auf. Der Film lebt von der Inszenierung des eigentlichen Hauptdarstellers und das ist die Lava, die sich tückisch aus der Tiefe heranschleicht, um dann den Wilshire Boulevard zu fluten und sich ihre Wege durch U-Bahn-Tunnel zu einem weiteren Ausbruchsort zu suchen. Wie im Genre üblich, wird die Zerstörung mit erheblicher Lust an Spezialeffekten auf die Leinwand gebracht. Begleitend wird auf Plünderungen und damit auf den drohenden Ordnungszusammenbruch hingewiesen, der auf die Katastrophe folgen kann.

Katastrophenmanagement ist also nötig. Der sich mitten im Geschehen aufhaltende Leiter des OEM hat im richtigen Moment die richtige Idee und behält den Überblick. Feuerwehr oder Polizei sind immer zur rechten Zeit zur Stelle. Nicht zuletzt aber lässt die Bedrohung durch die Naturgewalt die vorhandenen gesellschaftlichen Divergenzen – dargestellt anhand der rassistischen Konflikte in der Stadt, für die L. A. in den 1990ern international bekannt wurde – vergessen. Alle ziehen an einem Strang. Mittels Beton-Absperrungen und einer großen Menge Löschwasser gelingt es, den ersten Lavastrom aufzuhalten. Dem zweiten kann durch ein gesprengtes Hochhaus der Weg verlegt werden, so dass er durch den Ballona Creek in den Pazifik umgeleitet werden kann.

*Volcano* erzählt eine Erfolgsgeschichte über die Institutionen und ihre Akteure, die sich über alle gesellschaftlichen Konflikte hinwegsetzen, für die Bürger und sogar für die schwarze Bevölkerung der Stadt da sind. Am Ende sehen alle, wie es ein Kind bemerkt, gleich aus, weil die Vulkanasche auf den Gesichtern die Hautfarben verdeckt. Die Lava wird durch das Katastrophenmanagement besiegt, innere Konflikte werden beigelegt. Die eigentlichen Helden in *Volcano* sind die Behörden und die Staatsorgane.

## The Core

Der 2003 in den Kinos gelaufene Katastrophen- und Actionfilm *The Core* erzählt auch eine Geschichte über Magma, allerdings in einer ganz anderen Variante. Auch hier sendet die Natur Warnzeichen, die erst einmal richtig verstanden werden müssen: Ausfallende Herzschrittmacher, desorientierte Vögel, falsche Positionsdatenmeldungen.

Dem Geophysiker Dr. Joshua Keyes (Aaron Eckhart) gelingt es, zusammen mit dem Hochenergieexperten Dr. Serge Leveque (Tchéky Karyo) und dem überheblichen Dr. Conrad Zimsky (Stanley Tucci) die Ursache zu identifizieren, nämlich den Ausfall des Geodynamos im Erdkern, der der Erde ihr elektromagnetisches Feld beschert und das Leben auf der Erde damit vor dem Sonnenwind und der kosmischen Strahlung schützt. Das Magnetfeld entsteht durch Induktionsvorgänge im äußeren, flüssigen und elektrisch leitfähigen Erdkern, der den festen Kern umschließt. Im Film hat der äußere Kern seine Bewegung eingestellt, weshalb der Schutzschirm der Erde zusammenzubrechen droht. *The Core* ist ein Film mit starken Science-Fiction-Elementen, eine zeitgemäße Version der Reise nach dem Mittelpunkt der Erde. Technische Neuerungen sind in diesem Genre ein normales Stilmittel (Suvin, 1979). In diesem Falle wird eine Art Bohrschiff oder Magmatauchboot gebaut, mit dessen Hilfe man durch die Lithosphäre und den Mantel bis zum Erdkern vorstoßen kann. Dort sollen einige Atombomben gezündet werden, um den Dynamo wieder in Gang zu bringen. Das alles gelingt auch nach

einer Reihe von Abenteuern und Opfertagen. Nur die NASA-Pilotin Major Rebecca Childs (Hilary Swank) und Dr. Keyes kehren heil an die Erdoberfläche zurück.

Während ihrer Reise kommt die Crew des Bohrschiffs dahinter, dass der Geodynamo seine lebensschützende Tätigkeit nicht von selbst eingestellt hat. Vielmehr wurde die Katastrophe überhaupt erst durch Tests des DESTINI-Projekts (Deep Earth Seismic Trigger Initiative) ausgelöst. Dabei handelt es sich um eine Entwicklung des US-Militärs, die Erdbeben verursachen soll. Wissenschaft und Technik helfen also, eine Katastrophe abzuwenden, die sie selbst mitausgelöst haben.

## Vulkan

Der Fernsehweiteiler *Vulkan* ist eine deutsche Produktion und lief Ende der Nullerjahre auf RTL. Hier geht es um einen Vulkanausbruch in der Eifel nahe der fiktiven Ortschaft Lorchheim. Der erste Teil erzählt vor allem von den zerrütteten Beziehungen in dem beschaulichen Provinzstädtchen. Die privaten Katastrophenverläufe werden aber immer wieder durch seismische oder vulkanische Phänomene unterbrochen, die sich nicht ignorieren lassen. Das ruft die junge Doktorandin der Geologie Daniela Eisenach (Yvonne Catterfeld) aus Potsdam auf den Plan, was zunächst die libidinösen Krisen vor Ort weiter anheizt. Die Warnungen der Nachwuchswissenschaftlerin verhallen dagegen ungehört.

Nachdem sich die Warnzeichen aber mehren, beginnt man mit der Evakuierung, die schnell chaotische Züge annimmt, als der Lorchheimer See am Ende des ersten Teils effektiv und explosiv ausbricht und den ordentlichen Abtransport der Bevölkerung durch die Bundeswehr stört. Der zweite Teil erzählt dann von den weiteren Folgen des Ausbruchs. Auch hier bekommen Ascheregen, Lavaflüsse und ein pyroklastischer Strom ihren Auftritt. Die Wirkung des Ausbruchs auf die verschiedenen Protagonisten ist unterschiedlich und erscheint differenzierter als bei den anderen Filmen. Die Naturgewalt wirkt eher wie ein moralischer Katalysator sowohl im gu-

ten als auch im bösen Sinne auf die Menschen ein. Sie macht innere und zwischenmenschliche Konflikte sowie anomische Regungen wie durch ein Brennglas sichtbar. Manche drohen mit der Waffe oder morden sogar, um kurzfristige Ziele zu erreichen, wie z. B. die Durchfahrt an einer Straßensperre zu erzwingen, sich ein Fahrzeug anzueignen oder Rache an despektierlichen Jugendlichen zu nehmen. Manche werden sich grundlegender Werte wieder bewusst, manche ihrer wahren Gefühle, was aber durchaus nicht ausschließt, dass sie sich genau deshalb leichtsinnig verhalten und sowohl sich selbst als auch andere in Gefahr bringen. Auch die kalt kalkulierende Rationalität der organisierten Hilfe und emotional gefühlte Verpflichtungen geraten aneinander, wenn etwa Eisenach – letztlich erfolglos – versucht, ihre sich in der Anbahnung befindliche Affäre aus dem Lavastrom zu retten.

## Vulkanspaß

Dem phänomenologisch-anthropologischen Ansatz der Medienforschung zufolge lassen sich mehrere Grundformen des ästhetischen Sich-Vergnügens differenzieren (Hausmanning, 2002, S. 235–245; Spreen, 2012, S. 24 f.). Auf der *sensomotorischen und emotionalen Ebene* wären das etwa Aufregung, Empathie, seelische Spannung oder auch Angst-Lust (thrill). Unterhaltung basiert auf dem „Feel-Good-Faktor“ (Dörner, 2001). Es geht hier immer auch darum, sein eigenes Erleben in einem entlasteten Kontext zu erleben („Erleben erleben“).

Es können also Erfahrungen mit verschiedensten Emotionen gemacht werden, ohne dass man in Kalamitäten gerät. Das ist eine Funktion von Unterhaltung, die man nicht geringschätzen sollte. Die exzessive Zerstörung, die in Vulkanfilmen mit viel Pyrotechnik und Spezialeffekten in Szene gesetzt wird, ergreift auch das Publikum. Man sieht, wie die Monumente der Zivilisation in sich zusammenbrechen, wird vielleicht eines unverdinglichten Rests gewahr, der sich einer Zivilisation, die sich die „technische Reproduzierbarkeit der Natur“ (Böhme, 1992) auf die Fahnen geschrieben hat, doch noch entzieht. Spektakuläre Katastrophenszenarien sind offen-

sichtlich beliebt, solange sie realitätsfern im Kinosaal oder Wohnzimmer erlebt werden können, also im Rahmen eines entlasteten und auf ästhetisch-sinnliche Erfahrung eingestellten Weltverhältnisses.

Diese Beliebtheit der absehbaren Katastrophen im Film erklärt sich u. a. daraus, dass solche Inszenierungen emotionale Kicks auslösen. Das Spektakel der Spezialeffekte ist ein starker Attraktor der Katastrophenfilme, denn dank der erheblichen technischen Möglichkeiten ermöglichen diese Effekte ein intensives leiblich-sinnliches Erleben beim Publikum (Piper, 2012, S. 21). Die Zuschauerinnen und Zuschauer spüren die eigene Lebendigkeit – ein Selbsterleben, das durch die Zufuhr reizstarker Nahrungshappen oder Getränke noch verstärkt werden kann. Dieses Selbsterleben kann durch Angstlust gesteigert werden – und gerade diese Lust wird im Naturkatastrophenfilm ausgiebig bedient (Piper, 2012, S. 45-56). Man ist froh, noch da zu sein, wenn die pyroklastische Wolke über einen hinweggezogen ist. Man hat überlebt. Man erhascht trotz des fiktiven Charakters des Films einen Zipfel jedes Triumphgefühls des Überlebenden, dem Elias Canetti eine genaue Untersuchung gewidmet hat. „Der Schrecken über den Anblick des Todes“, schreibt Canetti gleich zu Beginn seiner Analyse, „löst sich in Befriedigung auf, denn man ist nicht selbst der Tote“ (Canetti, 1960, S. 267). Spektakuläre Szenarien mit Schock-Charakter im Film geben seinem Publikum daher die Möglichkeit zu einem „spielerische[n] Erleben der eigenen Gefühle“ (Hroß, 2002, S. 89).

Auf der *kognitiven Ebene* geht es um die Entschlüsselung der Bedeutung der miterlebten Naturgewalt, ihres Sinngehaltes, ihrer Ursachen und ihrer Folgen. Die Überlegungen können auch Unterschiede und mögliche Verzahnungen zwischen anthropogenen Ursachen, etwa in Bezug auf Klimawandel, Artensterben oder technologische Risiken, und natürlichen Ursachen wie Plattentektonik oder Hot Spots einschließen. Auch der Zusammenhang zwischen zivilisatorischer Erschließung der Natur einerseits und der Gefährdung durch Naturkatastrophen ande-

rerseits kann Thema werden. *Volcano* lebt genau davon, wenn er den Ausbruch eines Vulkans in einer Großstadt zum Thema macht. *The Core* thematisiert dagegen die anthropogene Verursachung von Naturkatastrophen.

Auf der *moralischen Ebene* können die mit der Katastrophe verbundenen Werthaltungen wie zum Beispiel Solidarität mit anderen, die gesellschaftliche Bedeutung von evidenzbasiertem Wissen u. dergl. thematisiert werden. Katastrophenfilme sind „höchst moralischer Natur“ (Piper, 2012, S. 88). *Vulkan* stellt die ambivalenten moralischen Effekte des Ausnahmezustands heraus. Das notorische Ignorieren wissenschaftlicher Warnungen, das zu Beginn in *Dante's Peak* eindrücklich in Szene gesetzt wird, kann dazu dienen, über wirtschaftliche oder persönliche Interessen und die mit ihnen unter Umständen verbundene Bereitschaft, Gesundheit und Leben anderer (ungefragt) mit zu riskieren zu sinnieren. Im gegenwärtigen Kontext liegt auch eine Übertragung auf die Covid-19-Krise nahe. *The Core* wiederum verweist darauf, dass Wissenschaft nicht nur die Lösung für Herausforderungen ist, sondern durchaus auch als Teil des Problems gesehen werden kann. Was hier aufscheint, ist letztlich jene von Horkheimer und Adorno markierte Dialektik, wonach in der modernen Gesellschaft die Möglichkeiten der Aufklärung immer auch durch andere Interessen oder Motive eingeschränkt oder verkehrt werden. Moralische Aspekte des Films zu erkennen und selbsttätig zu bewerten, ist allerdings in erster Linie Moment des Unterhaltungscharakters. Moralische Effekte verbleiben primär im Unterhaltungsrahmen und dienen der Involvierung der Publikums ins fiktive Geschehen. Mag das Kino auch ähnlich wie ein Hörsaal aussehen, es ist keiner.

Auf der *reflexiven Ebene* geht es um die „entlastete experimentelle [...] Beschäftigung des Individuums mit sich selbst“ (Hausmanning, 2002, S. 243). Das kann etwa Fragen betreffen, in der man sich selbst in ähnlichen Situationen vorstellt. Wie würde ich handeln? Wie würde ich gemeinsam mit meinen Freundinnen und Freun-

den oder meiner Familie handeln? Wie kann ich die verschiedenen Motive, die mein Handeln leiten könnten, gegeneinander abwägen? Hier können durchaus überraschende Selbsterkenntnisse möglich sein, wenn spontane Regungen mit moralischen Überzeugungen abgeglichen werden. Auch die Übertragung des filmischen Kontextes auf eigene und reale Erfahrungen ist denkbar. Aufgrund der entlasteten Rahmensituation – es besteht kein Handlungs- oder Positionierungsdruck – kann sich das Subjekt dabei als autonom und souverän erfahren; ein Zustand, der in der kontrollierten Welt insbesondere unter gesellschaftlichen oder persönlichen Krisenbedingungen eher selten ist.

Zusammengefasst bedeutet das, dass der filmische Vulkanspaß darin besteht, dass die Zuschauerinnen und Zuschauer nicht trotz, sondern wegen des Anblicks eines Katastrophengeschehens auf vielfältige Weise in ein positiv gestimmtes und entlastetes Selbstverhältnis eintreten können. Insbesondere ermöglicht es der (Natur-)Katastrophenfilm seinem Publikum, das für die moderne Sicherheitsgesellschaft charakteristische „Katastrophenbegehren“ bzw. „Begehren nach dem Ernstfall“ (Horn, 2011, S. 52 f.) virtuell zu bedienen. Dieses Begehren erklärt sich daraus, dass Prävention, Vorsorge, Resilienz, Anpassung, Risikoabschätzung und das Prinzip Verantwortung eine „Grundhaltung der Angst und des Misstrauens“ voraussetzen (Horn, 2011, S. 50). Es bildet das Hintergrundrauschen all jener Sicherheitsdispositive und Notstandsdiskurse, an denen kein Mangel herrscht. Es ist daher auch kein Zufall, dass sich Katastrophenfilme gerade in solchen Zeiten großer Beliebtheit erfreuen, die von Verunsicherung und Wandel gekennzeichnet sind (vgl. Piper, 2012, S. 47).

### Kleine Filmografie zu Vulkan-Katastrophenfilmen

- **The Last Days of Pompeii**  
Katastrophenfilm, USA 1935
- **The Devil at 4 O'Clock**  
Abenteuerfilm, USA 1961
- **Die letzten Stunden von Pompeji**  
Italien, Frankreich 1962
- **Krakatoa, East of Java**  
Katastrophenfilm, USA 1969
- **Dante's Peak**  
Katastrophenfilm, USA 1997
- **Volcano**  
Katastrophenfilm, USA 1997
- **The Core – Der innere Kern**  
Katastrophenfilm, USA 2003
- **Disaster Zone: Volcano in New York**  
Katastrophenfilm, USA 2006
- **Lava Storm**  
Katastrophenfilm, Kanada 2008
- **Journey to the Center of the Earth**  
Abenteuerfilm, USA 2008
- **Vulkan**  
Katastrophenfilm, Deutschland 2009
- **Eyjafjallajökull – Der unaussprechliche Vulkanfilm**  
Komödie, Frankreich 2013
- **Pompeii**  
Katastrophenfilm, USA 2014
- **Lava**  
Animationsfilm, USA 2015
- **Ashfall**  
Actionfilm, Südkorea 2019

(ausgewählte Filme von 1935 bis heute)

## Rezipientenrolle, Medienkompetenz und genretypische Künstlichkeit

Um im Angesicht einer sich vor den eigenen Augen vollziehenden Naturkatastrophe zu positiven (Selbst-) Erfahrungen zu kommen, darf man, um eine von Hans Blumenberg (1979) näher untersuchte, klassische Katastrophenmetapher zu bemühen, am „Schiffbruch“ nur als Zuschauer und nicht als Schiffbrüchiger teilhaben. Darüber hinaus muss man, was die moderne Unterhaltungskultur angeht, aber auch wissen, dass der angeschaute Schiffbruch nur gespielt ist, also dass die Wahrnehmungsinhalte fiktiver und ästhetischer Natur sind.

Soziologisch übersetzt bedeutet das, dass die Zuschauerinnen und Zuschauer eine ganz bestimmte soziale Rolle einnehmen. Diese Rezipientenrolle ist der medienpezifische Sonderfall der von Niklas Luhmann für verschiedene Funktionssysteme komplementär zu den Leistungsrollen bestimmten Publikumsrollen, wie z. B. der zur Rolle der Ärztinnen und Ärzte komplementären Rolle der Patientinnen und Patienten im Gesundheitssystem. Publikumsrollen stellen die Inklusion „der Laien“ in die Funktionssysteme sicher (Luhmann, 1977, S. 236 f.; Stichweh, 1988). Die Rezipientenrolle kennt wie jede andere soziale Rolle bestimmte Regeln, die eingehalten werden müssen, will man das beabsichtigte Ergebnis – in diesem Falle den Unterhaltungsgewinn – auch erzielen (Spreen, 2012, S. 22-27).

Ein wesentlicher Aspekt der Rezipientenrolle im Kontext von Unterhaltung ist dabei die Umstellung des Weltverhältnisses. Das Publikum eines filmischen Unterhaltungsangebotes nimmt ein entlastetes und von Alltagszwecken oder Notsituationen freies Weltverhältnis ein. Man läuft nicht selbst vor der pyroklastischen Wolke davon, sondern man sitzt im Kinosessel oder auf dem Sofa. Diese Abstraktion von Wirklichkeitskontexten und ihren Zwängen ist die Bedingung der Möglichkeit dafür, den Film zu genießen und mit einer Reihe von positiven und selbstermächtigenden Erfahrungen zu verbinden.

Unterstützt wird der subjektive Wechsel in die Rezipientenrolle durch Formen oder Zeichen, die den Unterhaltungsangeboten selbst innewohnen. Mediale Unterhaltungsangebote zeichnen sich durch eine „genretypische Künstlichkeit“ (Hausmanning, 2002) aus, die es ihrem Publikum erlaubt, sie als Unterhaltungsangebote zu erkennen. Beim Katastrophenfilm sind das häufig Zerstörungssorgien, in denen die Monumente der Zivilisation lustvoll eingerissen werden. Unrealistische oder überdrehte Settings sind in Katastrophenfilmen nicht selten und eben ein Zeichen für das Genre, wie zum Beispiel der Ausbruch eines Vulkans mitten in L. A. Auch das Auftreten von Stars wie Pierce Brosnan oder Linda Hamilton oder aus anderen Kontexten bekannter Sternchen wie Yvonne Catterfeld trägt dazu bei, die Künstlichkeit des Dargestellten und damit den Unterhaltungssinn des Angebots herzustellen.

Wichtig für die Rezipientenrolle ist zudem Medienkompetenz, insbesondere bezogen auf die Bereiche der Mediennutzung und der eigenen Nutzungsgestaltung (Baacke, 1996).

Medienkompetenz zielt nicht zuletzt darauf ab, die ästhetischen Erlebnismöglichkeiten des Individuums zu fördern. Zugleich aber darf das Realitätsprinzip nicht grundsätzlich ausgehebelt werden. Unrealistische Technologien, wie zum Beispiel das Magmatauchboot in *The Core*, sind ein Genre-Stilmittel aus der Science-Fiction. Solange die innere Logik der erzählten Geschichte erhalten bleibt, hilft eine solche Science-Fiction-Technologie einem mit entsprechenden Medienkompetenzen ausgestatteten Publikum dabei, das Genre zu identifizieren und eine Rezeptionserwartung einzunehmen, die das Unterhaltungsvergnügen fördert. Allerdings können realitätsferne Technologiedarstellungen durchaus auch überzogene Erwartungen in Bezug auf die technischen Möglichkeiten des Menschen unterstützen und somit mythologisierend wirken. Diese Interpretationsoffenheit macht deutlich, dass es auch bei Unterhaltungsformaten immer auf die Rezeptions- und Medienkompetenz des Publikums ankommt.

Aufgrund dieser Entwirklichung und Künstlichkeit, die das Genre des Naturkatastrophenfilms auszeichnet, „verhext“ bzw. „fasziniert“ die Naturgewalt im Film ihr Publikum also nicht in dem Sinne, dass sie es vor Schreck erstarren lässt und zur Anrufung der höheren Gewalt nötigt, wie es vielleicht ursprünglich, am Grund des Mythos einmal gewesen sein mag (Horkheimer & Adorno, 1987, S. 37). In der antiken Mythologie war Vulcanus ein Gott – der Gott des Feuers. Im Verlauf der cineastischen Heldenreisen eines typischen Katastrophenfilms werden die „anstürmenden Chasmächte“ dagegen in Mustern „souveräner Identität“ gebannt (Loretan & Martig, 1999, S. 68).

Allerdings muss man auch genau deshalb immer wieder darüber diskutieren, inwiefern und inwieweit das Kino als „Ritual der Entängstigung“ eine ideologische Rechtfertigung der bestehen-

den Natur- und Herrschaftsverhältnisse impliziert (Loretan & Martig 1999, S. 62). Schließlich besteht das Publikum eines Vulkankatastrophenfilms aus Überlebenden, die sich mit Helden identifizieren, die selbst noch Volcanos' feurige Gewalt mittels Wissen und Einfallsreichtum unter Kontrolle bekommen.

Aber immerhin ermöglicht das Betreten des Raums unterhaltsamer Faszination den Rezipientinnen und Rezipienten zumindest zeitweise ein entlastetes Weltverhältnis und einen autonomen Selbstbezug – unter der Bedingung allerdings, dass die Rezipientenrolle normgerecht ausgefüllt wird. Das ist aus der Perspektive des anthropologisch-phänomenologischen Rezeptionsansatzes im Ganzen letztlich positiv zu bewerten und kann zudem, wie gezeigt, durchaus Anlass zur Reflexion der Natur- und Herrschaftsverhältnisse geben.

## Filmografie

- **Dante's Peak**, USA 1997, Regie: Roger Donaldson, einige Darsteller: Pierce Brosnan, Linda Hamilton, Jamie Renée Smith
- **The Core** (The Core – Der innere Kern), USA 2003, Regie: Jon Amiel, einige Darsteller: Aaron Eckhart, Hilary Swank, Delroy Lindo, Bruce Greenwood
- **Volcano**, USA 1997, Regie: Mick Jackson, einige Darsteller: Tommy Lee Jones, Anne Heche, Gaby Hoffmann
- **Vulkan**, zweiteiliger Fernsehfilm, BRD 2009, Regie: Uwe Janson, einige Darsteller: Matthias Koeberlin, Yvonne Catterfeld, Heiner Lauterbach

## Referenzen

- Baacke, D. (1996). Medienkompetenz als Netzwerk. Reichweite und Fokussierung eines Begriffs, der Konjunktur hat. *medien praktisch*, 20(78), 4-10.
- Blumenberg, H. (1979). *Schiffbruch mit Zuschauer. Paradigma einer Daseinsmetapher*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Böhme, G. (1992). *Natürlich Natur. Über Natur im Zeitalter ihrer technischen Reproduzierbarkeit*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Canetti, E. (1960). Der Überlebende. In E. Canetti, *Masse und Macht* (S. 265-329). Hamburg: Claassen.
- Dörner, A. (2001). *Politainment. Politik in der medialen Erlebnisgesellschaft*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Hausmanninger, T. (2002). Vom individuellen Vergnügen und lebensweltlichen Zweck der Nutzung gewalthaltiger Filme. In T. Hausmanninger & T. Bohrmann (Hrsg.), *Mediale Gewalt. Interdisziplinäre und ethische Perspektiven* (S. 231-259). München: Wilhelm Fink.
- Hausmanninger, T. & Bohrmann, T. (Hrsg.). (2002). *Mediale Gewalt. Interdisziplinäre und ethische Perspektiven*. München: Wilhelm Fink.
- Horkheimer, M. & Adorno, T. W. (1987). Dialektik der Aufklärung. Philosophische Fragmente. In M. Horkheimer, *Gesammelte Schriften, Bd. 5, Dialektik der Aufklärung und Schriften 1940-1950* (S. 11-238). Frankfurt am Main: Fischer.
- Horn, E. (2011). Die Zukunft der Dinge. Imaginationen von Unfall und Sicherheit. *Behemoth*, 4(2), 26-57. doi:10.1515/behemoth.2011.012
- Hroß, G. (2002). Horror: »Friday the 13th« und der Schrecken des Erwachsenenwerdens. In T. Hausmanninger & T. Bohrmann (Hrsg.), *Mediale Gewalt. Interdisziplinäre und ethische Perspektiven* (S. 81-95). München: Wilhelm Fink.
- Loretan, M. & Martig, C. (1999). Weltuntergang im Film: zwischen Spektakel und Vision. Sinn und Gefahren apokalyptischer Rede. Kritische Auseinandersetzung mit ethischen, ästhetischen und theologischen Aspekten zeitgenössischer Filme. In J. Müller & R. Zwick (Hrsg.), *Apokalyptische Visionen. Film und Theologie im Gespräch* (S. 47-95). Schwerte: Katholische Akademie.
- Luhmann, N. (1977). *Funktion der Religion*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Maase, K. (1997). *Grenzenloses Vergnügen. Der Aufstieg der Massenkultur 1850-1970*. Frankfurt am Main: Fischer.
- Piper, B. (2012). *Kulturanalyse des Katastrophenfilms* (Schriften zur Medienwissenschaft, Band 32). Hamburg: Verlag Dr. Kovač.
- Rivalta, E. (2020). Wo genau können neue Vulkane entstehen? In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 51-53). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.3.2
- Spreen, D. (2012). Jugend und gewalthaltige Massenkultur. Zur Soziologie der Unterhaltung und der Sozialisationsfunktion der Medien. In J. Herrmann, J. Metelmann & H.-G. Schwandt (Hrsg.), *Wissen sie, was sie tun? Zur filmischen Inszenierung jugendlicher Gewalt* (S. 16-48). Marburg: Schüren-Verlag.
- Stichweh, R. (1988). Inklusion in Funktionssysteme der modernen Gesellschaft. In R. Mayntz, B. Rosewitz, U. Schimank & R. Stichweh (Hrsg.), *Differenzierung und Verselbständigung. Zur Entwicklung gesellschaftlicher Teilsysteme* (S. 261-293). Frankfurt am Main: Campus.
- Suvin, D. (1979). Die Science Fiction und das Novum. In D. Suvin, *Poetik der Science Fiction. Zur Theorie und Geschichte einer literarischen Gattung* (S. 93-119). Frankfurt am Main: Suhrkamp.

## 3. Vulkanismus und Klima

### Einleitung

Kaum eine geologische Aktivität hat das Klima auf der Erde so stark beeinflusst wie Vulkanismus. Klimarelevant sind vor allem starke, explosive Vulkanausbrüche in den Tropen. Sie verbreiten ausgestoßene Partikel in den oberen Atmosphärenschichten beider Hemisphären und sind dadurch weltweit klimawirksam. Sie können auch zu einer Abkühlung führen und die veränderte Sonneneinstrahlung kann Missernten mitverursachen. Gleichzeitig kann das Wetter die Aktivität von Vulkanen beeinflussen. Wettereinflüsse können gar zum Ausbruch eines Vulkans führen.

### Themen-Überblick

---

- ▶ Vulkanismus und Klima in der Vergangenheit
- ▶ Die Wechselwirkungen von Vulkanismus und Klima
- ▶ Der Einfluss von Wetter auf Vulkanaktivität

## Vulkanismus und Klima in der Vergangenheit: Was lässt sich für die Zukunft lernen?

Dr. Sebastian Wagner (Helmholtz-Zentrum Geesthacht - Zentrum für Material- und Küstenforschung, HZG)

**Insbesondere große Vulkanausbrüche in den Tropen können weltweit Wirkungen zeigen, da sich Partikel in beide Hemisphären der Erde verteilen. Sulfat-Aerosole spielen bei diesem Ferntransport in andere Regionen eine wichtige Rolle. Aus Eisbohrkernen der Polarregionen lässt sich ablesen, wie stark Vulkanausbrüche in der Vergangenheit waren. Die genauen Auswirkungen werfen zahlreiche Forschungsfragen auf.**

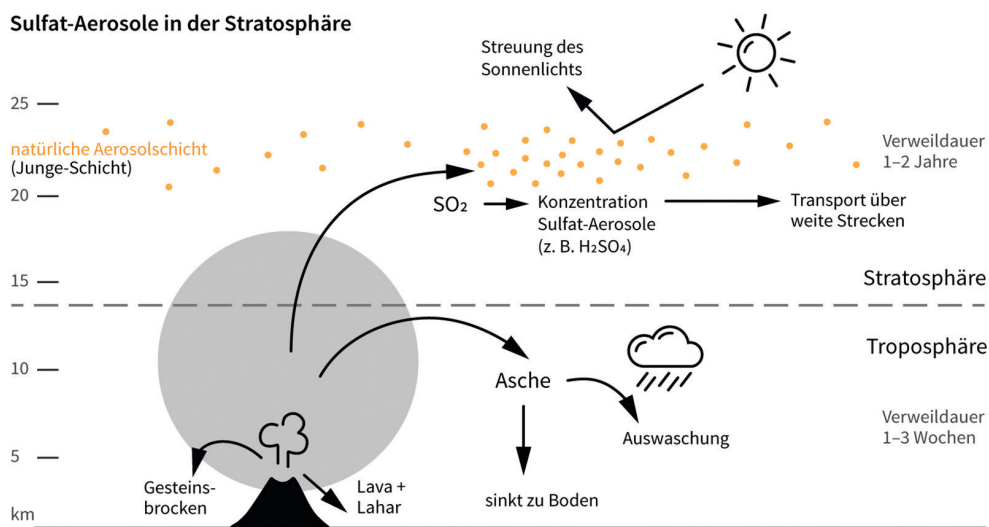
- 
- Wenn wir wissen, wie stark die Auswirkungen von großen Vulkanausbrüchen in der Vergangenheit waren, wäre dies ein wesentlicher Baustein für künftige Klimamodelle und Vorsorgemaßnahmen.
  - Bei der Auswertung von Forschungsdaten erkennt man deutliche Parallelen zwischen dem Temperaturverlauf und Vulkanismus.
  - Insbesondere sehr große Vulkanausbrüche in den tropischen Breiten führen im globalen Mittel in der Regel zu einer Abkühlung der bodennahen Luftschichten.
- 

Vulkane haben einen direkten Einfluss auf die sie umgebende Umwelt und vor allem auf die in unmittelbarer Nähe lebende Bevölkerung. Bei entsprechender Stärke eines Vulkanausbruchs ergeben sich darüber hinaus indirekte klimatische Auswirkungen (Strehlow, 2020). Zu wissen, wie stark diese Wirkungen waren, wäre ein wesentlicher Baustein für künftige Klimamodelle und auch Vorsorgemaßnahmen, die bereits in der Gegenwart getroffen werden können. Wie können wir nun aber genauer abschätzen, wie groß der Einfluss von Vulkanausbrüchen auf das Klima in der Vergangenheit und auch die damals lebenden Menschen und ihre Umwelt war? – Und sind wir darüber hinaus in der Lage, diese Erkenntnisse aus vergangenen Perioden für die zukünftige Klimaentwicklung mit zu berücksichtigen?

### Vulkanpartikel im Eis: Das Vulkanobservatorium der Vergangenheit

Da Vulkanausbrüche für Menschen stets eindrückliche Ereignisse waren, gibt es bereits aus frühen Zeiten historische Aufzeichnungen, zum Beispiel von Plinius dem Jüngeren, der den Ausbruch des Vesuvs im Jahr 79 live als Augenzeuge erlebte. Es stellt sich jedoch die Frage, wie man solche Informationen für solche Zeiträume rekonstruieren kann, in denen Menschen noch nicht systematisch die Ausbrüche großer Vulkane dokumentierten. Eine gute Möglichkeit bieten hier Ablagerungen im Eis der Polargebiete – erstaunlicherweise also in Regionen, die von den Gebieten starker Vulkanaktivität weit entfernt liegen.

Klimarelevant sind nämlich vor allem starke, explosive tropische Vulkanausbrüche, welche ausgestoßene Partikel in den oberen Atmosphären-



**Abb. 1:** Bei Vulkanausbrüchen können Asche- und Sulfatpartikel in große Höhen (bis in die Stratosphäre) transportiert werden. Während Asche-Aerosole wieder zu Boden sinken oder ausgewaschen werden, verbleiben die Sulfat-Aerosole über einen langen Zeitraum in der Atmosphäre. In der sogenannten „Junge-Schicht“ (natürliche Aerosolschicht) kommt es durch den zusätzlichen Sulfateintrag zu einer so hohen Konzentration, dass das Sonnenlicht absorbiert bzw. gestreut wird. Dadurch kann es zu einer Temperaturabnahme an der Erdoberfläche und damit zu Klimaveränderungen kommen.

Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de / CC BY 4.0

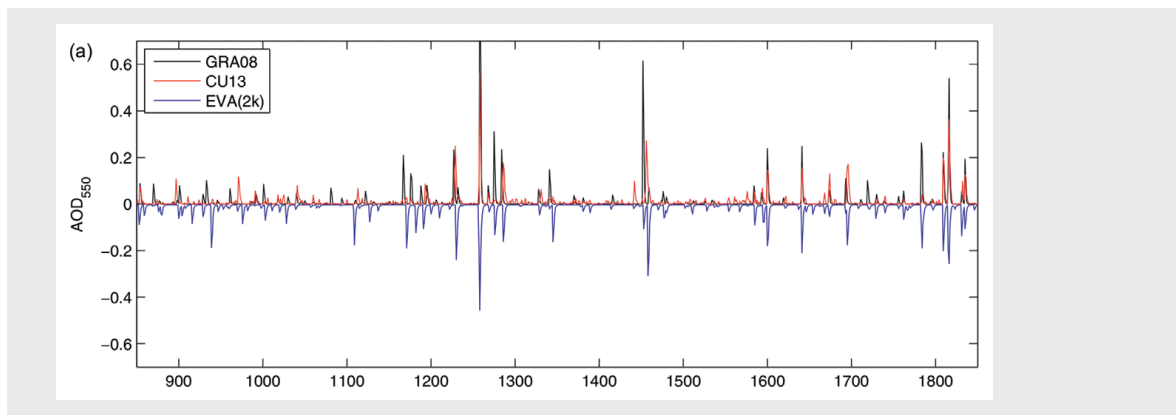
schichten beider Hemisphären verbreiten und die somit global klimawirksam werden. Durch die hohen Atmosphärenschichten werden die Partikel aus Vulkanausbrüchen bis zu den Polarregionen transportiert. Dort lagern sie sich im herabfallenden Schnee, der später zu Eis verhärtet, ab. Durch die Untersuchung von Eisbohrkernen lassen sich deshalb heute vergangene Vulkanausbrüche rekonstruieren.

### Sulfat-Aerosole haben besonderen Erkenntniswert

Da große klimarelevante Vulkanausbrüche vor allem in den weit von den Polarregionen entfernten tropischen Regionen stattfinden, findet man in den Eisbohrkernen fast keine Asche. Asche wird bereits relativ nah am Ausbruchsort durch Regen wieder aus der Atmosphäre entfernt oder rieselt trocken allmählich wieder zu Boden. In der Wissenschaft wird letzterer Vorgang als trockene Deposition bezeichnet.

Im Ferntransport besonders beachtenswerte Partikel sind die sogenannten Sulfat-Aerosole, die bei Vulkanausbrüchen in die Atmosphäre gelangen (Matthias 2020 in diesem Band). Sie bewirken in den „oberen Stockwerken der Atmosphäre“, der Stratosphäre, einerseits eine direkte Absorption der Sonnenstrahlung. Gleichzeitig streuen sie einen nicht unerheblichen Anteil in den Weltraum zurück.

Besonders bei Vulkanausbrüchen in den Tropen werden solche Sulfat-Aerosole weiträumig verteilt und es ist ein globaler Klimaeffekt festzustellen. Sehr große Vulkanausbrüche in den tropischen Breiten führen im globalen Mittel in der Regel zu einer Abkühlung der bodennahen Luftschichten. Die Konzentration der im Eis abgespeicherten Sulfatpartikel gibt Wissenschaftler\*innen auch Auskunft über die Stärke des Vulkanausbruchs – wie z. B. der des Tambora im Jahr 1815, welcher im darauffolgenden Jahr das „Jahr ohne Sommer“ mit globalen Auswirkungen und Missernten verursachte.



**Abb. 2:** Rekonstruktionen der globalen Vulkan-Aktivität für das letzte Jahrtausend, dargestellt in der Reduktion der optischen Dichte (AOD) in der Stratosphäre. Die Abbildung zeigt unterschiedliche Rekonstruktionen mit verschiedenen Quellen der Eisbohrkerne (hinter den Akronymen oben links verbergen sich verschiedene Autorennamen). Zur besseren Unterscheidbarkeit wurde die untere Zeitserie mit dem Faktor -1 multipliziert. Grafik: Abbildung aus Jungclaus et al., 2017. *Climate of the Past*, CC BY 3.0

### Vulkane und Klima während der letzten 1.000 Jahre – Welchen Einfluss haben Vulkanausbrüche wirklich?

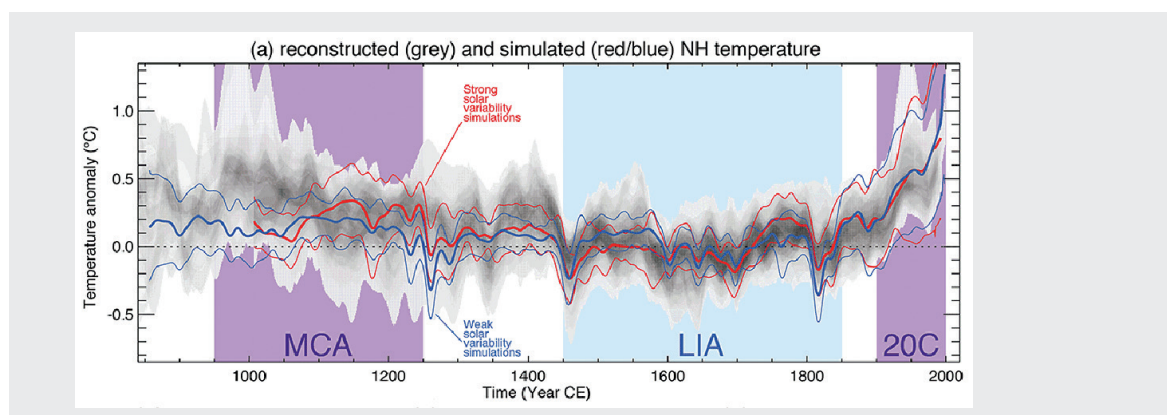
Aufbauend auf den Rekonstruktionen aus Eisbohrkernen, welche auch am Helmholtz-Zentrum Geesthacht durchgeführt und begleitet werden, und/oder bereits bekannten und schriftlich dokumentierten Zusammenhängen, kann man Erkenntnisse aus Eisbohrkernen auch nutzen, um ganze historische Zeitserien von Vulkanausbrüchen zu rekonstruieren (s. Abb. 2). Wissenschaftler\*innen sehen dabei deutlich, dass sich zum einen die großen und kleineren Ausbrüche nicht in einer regelmäßigen zeitlichen Abfolge aneinanderreihen, sondern teilweise sehr große zeitliche Lücken auftreten. Andererseits jedoch gibt es Perioden, welche ein gehäuftes Auftreten von Vulkaneruptionen andeuten. Welchen Einfluss hatten diese Vulkanausbrüche nun auf das Klima der historischen Zeit und wie können wir dieses abschätzen?

Ein wichtiges Werkzeug sind hierbei komplexe Klima- und Erdsystemmodelle, die auf Supercomputern gerechnet werden müssen. Diese Modelle simulieren die verschiedenen Komponenten des Erdsystems und versuchen so realitätsnah wie möglich das Klima darzustellen. Wichtige Eingabeparameter, um das Klima der Vergangenheit darzustellen, sind hierbei unter

anderem Vulkanausbrüche aber auch Änderungen in den langfristigen Schwankungen der Sonnenaktivität.

Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Mitteltemperaturen in der nördlichen Hemisphäre, wie sie aus einer ganzen Reihe von globalen Erdsystemmodellen erstellt wurden, die auch mit dem Einfluss von Vulkanen als Eingabeparameter angetrieben wurden. Zusätzlich ist eine ganze Bandbreite von verschiedenen Rekonstruktionen der Mitteltemperaturen zum Vergleich dargestellt, welche mit Hilfe von sogenannten Proxyarchiven oder auch Analysen historischer Dokumente erstellt wurden. Basis für Proxyarchive zum Beispiel für Baumring- oder Pollenanalysen.

Bei der Auswertung der Daten erkennt man sehr deutlich Parallelen zwischen dem Temperaturverlauf und Vulkanismus: Angefangen mit einer Periode sehr schwacher Vulkanaktivität in den Jahren 900 – 1200 AD sieht man die sogenannte „Mittelalterliche Klimaanomalie“, die in einer Reihe von Regionen überdurchschnittliche Temperaturen hervorbrachte. Wie wir aus historischen Schriftstücken wissen, konnte beispielsweise zu dieser Zeit Grönland durch Erik den Roten besiedelt werden und auch Getreideanbau war bis in den Norden Schottlands und Skandinaviens möglich.



**Abb. 3:** Gemittelte 2m-Temperaturen über der Nordhemisphäre einer Reihe von Klimamodellen (rote und blaue Kurven) sowie verschiedenen Proxy-Rekonstruktionen (graue Kurven) des Weltklimarates IPCC, die u. a. mit Änderungen in der Vulkanismusaktivität angetrieben wurden. Die Vulkanausbrüche zeigen sich durch starke negative Abweichungen in der Temperaturkurve. Die verschiedenen Modelle zeigen Unterschiede, weil sie einerseits unterschiedliche Vulkanrekonstruktionen verwenden und durch unterschiedlich starke langfristige Schwankungen der Sonnenaktivität angetrieben wurden. **Ausschnitt aus der Grafik:** Figure 5.8 from Masson-Delmotte et al., 2013, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Dieser Wärmeperiode im Mittelalter folgt eine globale Temperaturdepression, die von ca. 1450 bis 1850 reichte. Diese Periode ging einher mit einer Zunahme und Intensivierung des Vulkanismus bei gleichzeitigem Absinken der Solaraktivität. Diese sogenannte „Kleine Eiszeit“ war durch überdurchschnittlich kalte Winter und teilweise kühl-feuchte Sommer geprägt. Eine Folge dieser kühlen Periode war das Vorschreiten der Gletscher in weiten Teilen der Alpen und Skandinaviens. Einige Forschergruppen schreiben den Vulkanen sogar eine so große Bedeutung zu, dass sie die Kleine Eiszeit erst ermöglicht und ausgelöst haben. Manche Studien vermuten sogar einen Zusammenhang zwischen Klima und kriegerischen Auseinandersetzungen wie dem 30-jährigen Krieg aufgrund der ungünstigen Klimabedingungen während dieser Periode.

Unsere jüngste Vergangenheit – inklusive des 20. Jahrhunderts – ist vor allem durch einen starken Anstieg der Temperaturen, bedingt durch den menschlichen Treibhausgasausstoß, charakterisiert. Auch in dieser Phase konnten eine Reihe mittelgroßer Vulkanausbrüche während der 1960er und 1970er Jahre den Temperaturanstieg abschwächen und in einigen Regionen wieder kalte Winter und nass-kühle Sommer verursachen.

### Die Vergangenheit für die Zukunft nutzen – Das Vulkanarchiv als Grundlage für Szenarien

Die Erkenntnisse aus der Vergangenheit liefern interessante Einblicke in vergangene KlimaePOCHen und die Auswirkungen auf historische Gesellschaften. Aber können wir sie auch für die heutige Zeit, respektive für die zukünftige Entwicklung nutzen? Gegenwärtig können wir kaum gesicherte Aussagen treffen, weil große Vulkane nur einen relativ schwachen Einfluss auf das jüngste Klimageschehen hatten. Daher stehen diese großen Vulkanausbrüche und deren klimatische Auswirkungen nicht im Fokus der aktuellen Klimadiskussion.

Die Einblicke in den Vulkanismus der historischen Zeit liefern jedoch wichtige Einblicke in die Bandbreite des Auftretens und der Intensität von Vulkanismus. Durch das Erstellen verschiedener Szenarien unter Zuhilfenahme der Kataloge vergangener Ausbrüche können wir versuchen, einen möglichen Einfluss der Vulkane auch auf das Klima der kommenden Jahre mit Erdsystemmodellen abzuschätzen.

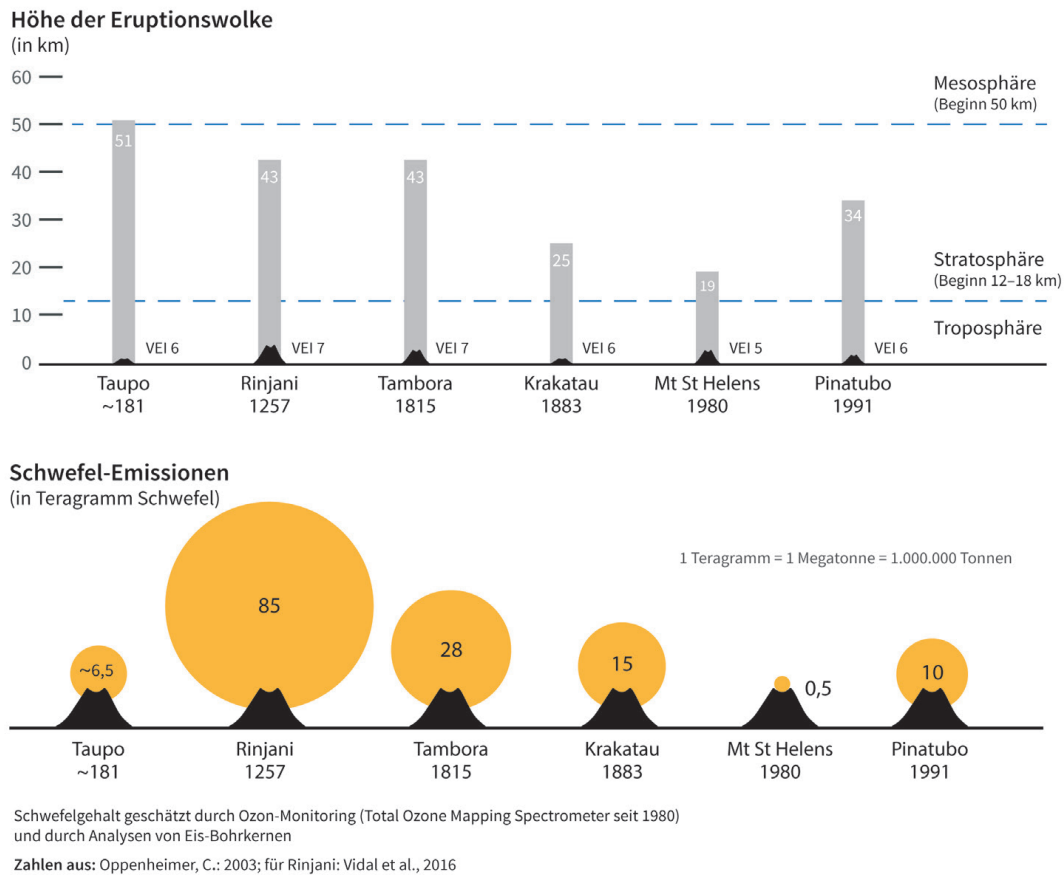


Abb. 4: Eruptionshöhe (oben) und Schwefel-Emissionen (unten) ausgewählter Vulkane im Vergleich. Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de / CC BY 4.0

### Vulkanausbrüche können Klimawandel langfristig voraussichtlich nicht mindern

Ein wichtiges Ergebnis dieser Klimamodellierungen stellt das grundsätzliche Erreichen eines sehr ähnlichen Temperaturniveaus bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in einem Klimaszenario mit weiter ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen dar, auch wenn dieser Zeitraum von starken vulkanischen Aktivitäten begleitet wäre. Die Ergebnisse der Modellanordnung zeigen: Selbst nach einer Reihe von großen Vulkanausbrüchen erreichen die weltweiten Temperaturen nach spätestens 10 oder 20 Jahren wieder ihr ursprüngliches Niveau, welches auch ohne die starken Vulkanausbrüche aufgetreten wäre.

Allerdings können starke Ausbrüche, und hier das Auftreten einer Reihe sehr starker Vulkanausbrüche, den Temperaturentwicklungspfad

sehr stark beeinflussen und in extremen Fällen zu starken Temperaturrückgängen über mehrere Jahre führen. Die Temperaturen erreichen dann im Laufe der Zeit aber wieder das ursprüngliche Niveau vor den Vulkanausbrüchen. Eine Unsicherheit bei diesem Modell besteht darin, dass die Bandbreite und Intensität der Vulkanausbrüche künftig sogar größer ausfällt als in der Vergangenheit beobachtet.

### Quo vadis – Was wir unternehmen, um auf Vulkanausbrüche besser vorbereitet zu sein

Wann, wo, und in welcher Stärke der nächste Vulkan bzw. eine Reihe von Vulkanen ausbrechen wird, kann niemand sagen. Durch Studien, die den Einfluss der Vulkane auf das vergangene und künftige Klima untersuchen, können allerdings Auswirkungen auf die Umwelt und damit

auch auf die menschliche Gesellschaft abgeleitet werden. Dabei darf man allerdings nicht vergessen, dass historische Gesellschaften andere Verletzlichkeiten beziehungsweise auch Widerstandsfähigkeiten aufwiesen als moderne Gesellschaften des 21. Jahrhunderts.

Durch eine Reihe internationaler Projekte soll genau dieses Spannungsfeld vergangener Auswirkungen (z. B. VICS – Volcanic Impacts on Climate and Society mit Beteiligung von HZG-Forschenden und künftiger Folgen (z. B. VolClim – Volcanic impact on surface climate) untersucht werden, um entsprechende Handlungs- und Entwicklungsoptionen beim Auftreten großer Vulkanausbrüche bereit zu stellen.

Diese Initiativen beleuchten in größeren Details die Auswirkungen auch auf angrenzende Bereiche der Gesellschaft wie z. B. Landwirtschaft, globale Wirtschaftsbeziehungen und Wechselwirkungen mit globalen Lieferketten. Außerdem versuchen sie gezielt aus den Erfahrungen der Vergangenheit zu lernen, um in Zukunft besser auf derartige Naturereignisse gewappnet zu sein. Ausschlaggebend wird allerdings das Bewusstsein von Gesellschaften sein auf derartige Ereignisse adäquat und zeitnah reagieren zu können, um bereits im Frühstadium die Weichen für einen richtigen Umgang mit den Auswirkungen zu stellen.

## Referenzen

- Bethke, I., Outten, S., Otterå, O. H., Hawkins, E., Wagner, S., Sigl, M., & Thorne, P. (2017). Potential volcanic impacts on future climate variability. *Nature Climate Change*, 7, 799-805. doi:10.1038/nclimate3394
- Jungclaus, J. H., Bard, E., Baroni, M., Braconnot, P., Cao, J., Chini, L. P., ... & Zorita, E. (2017). The PMIP4 contribution to CMIP6 – Part 3: The last millennium, scientific objective, and experimental design for the PMIP4 past1000 simulations. *Geoscientific Model Development*, 10(11), 4005-4033. doi:10.5194/gmd-10-4005-2017
- Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J., ... & Timmermann, A. (2013). Information from Paleoclimate Archives. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Hrsg. von T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley, S. 383-464). Cambridge/New York: Cambridge University Press.
- Matthias, V. (2020). Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung von Vulkanasche. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 67-72). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.3.5
- Oppenheimer, C. (2003). Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27(2), 230-259. doi:10.1191/0309133303pp379ra
- Strehlow, K. (2020, 31. Januar). Vulkanismus auf den Philippinen und die Taal Eruption im Januar 2020. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 7. doi:10.2312/eskp.005
- Vidal, C. M., Métrich, N., Komorowski, J.-C., Pratomo, I., Michel, A., Kartadinata, N., Robert, V., Lavigne, F. (2016). The 1257 Samalas eruption (Lombok, Indonesia): the single greatest stratospheric gas release of the Common Era. *Scientific Reports*, 6:34868. doi:10.1038/srep34868

## Die Wechselwirkungen von Vulkanismus und Klima

Dr. Julie Christin Belo (GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

**Hochexplosive Vulkanausbrüche können immense Wirkungen auf die Ozonschicht haben und beeinflussen die schädliche UV-Strahlung, die auf der Erde ankommt. Auch kann es vermehrt regnen oder regional durch Verdunklung und Abkühlung zu Missernten kommen. Eine umgekehrte Wirkung wird ebenfalls diskutiert: Der Klimawandel könnte sich zeitlich versetzt auf vulkanische Aktivität auswirken.**

- Nach einem Plinianischen Vulkanausbruch sind noch jahrelang deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen zu verzeichnen.
- Gleichzeitig kann die Ozonschicht soweit geschädigt werden, dass die biologisch zerstörerische UV-Strahlung deutlich zunehmen könnte.
- Es gibt Hinweise darauf, dass es auch zu umgekehrten Effekten kommt und globale klimatische Effekte wiederum für vermehrte Vulkanaktivitäten sorgen.

Vulkanausbrüche können einen direkten Einfluss auf das regionale und sogar das globale Wetter haben. Auch längerfristig können sie auf das Klima einwirken. Im besonderen Fokus stehen hier große, hochexplosive Plinianische Vulkanausbrüche. Sie transportieren mit ihren teils bis zu 40 Kilometer hohen Eruptionssäulen große Volumina an klimawirksamen Gasen wie Schwefel und Halogene sowie Asche direkt in die Stratosphäre.

Dort bilden diese zum einen eine Aerosolschicht. Diese Schicht verhindert, dass die wärmenden Sonnenstrahlen weiter mit der gleichen Intensität wie vorher auf die Erdoberfläche gelangen können. Zum anderen zerstören die in die Stratosphäre gelangenden vulkanischen Gase die schützende Ozonschicht nachhaltig (Brenna et al., 2019a).

Nach einem Plinianischen Vulkanausbruch sind als klimatische Auswirkung in den Jahren nach dem Ausbruch im Jahresdurchschnitt deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen zu verzeichnen. Modelle gehen davon aus, dass Plinianische Eruptionen in den Tropen die Ozonschicht soweit schädigen können, dass die

biologisch zerstörerische UV-Strahlung um 80 bis 400 Prozent im Vergleich zur gegenwärtigen Situation zunehmen könnte. Bei sehr großen Eruptionen, sogenannten Supereruptionen, könnte diese für Organismen so schädliche UV-Strahlung sogar auf 550 Prozent über eine Dauer von fünf Jahren ansteigen (Brenna et al., 2020).

Andererseits halten Aerosole und Aschepartikel auch die wärmende Sonnenstrahlung ab. Einige der historisch „kältesten“ Jahre stehen in direktem Zusammenhang mit Großeruptionen. So ist zum Beispiel das Jahr 1816, das Jahr nach dem Ausbruch des Mount Tambora in Indonesien, als das „Jahr ohne Sommer“ bekannt. Der damalige Ausbruch wirkte sich global aus. Es kam zu Missernten und Hungersnöten in Mitteleuropa und Nordamerika. Die beeindruckenden Farben am Himmel, die durch die Wechselwirkung von Asche in der Atmosphäre und Sonnenstrahlen entstehen, wurden von Künstlern wie dem englischen Maler William S. Turner (1775–1851) anschaulich auf Leinwand festgehalten. Ein anderes Beispiel ist Caspar David Friedrichs Ansicht des Hafens in Greifswald (Zerefos et al., 2014).



**Abb. 1:** Die „Alte Brücke“ über den Neckar in Heidelberg. Am südwestlichen Brückenpfeiler befinden sich die Hochwassermarken der letzten Jahrhunderte (rechts). Die Brücke wurde am 27. Februar 1784 durch ein katastrophales Eishochwasser zerstört. Dieses Hochwasser folgte einem besonders kalten und schneereichen Winter in Nord- und Mitteleuropa, der durch die Laki-Spalteneruption auf Island im Jahr 1783 verursacht wurde. Das Hochwasser von 1784 ist das bislang höchste, welches am Neckar gemessen wurde.  
Copyright: Das Foto wurde freundlicherweise von Janet Harvey aufgenommen und zur Verfügung gestellt.

## Die Folgen der Laki-Spalteneruption

Die Laki-Spalteneruption auf Island von 1783 stellte für Nord- und Mitteleuropa eines der katastrophalsten historischen Ereignisse dar. Auf Island selbst kam es zu einem dramatischen Sterben: Zehntausend Menschen kamen ums Leben und hunderttausende Nutztiere verendeten, vermutlich durch die zu hohe Aufnahme von Fluorid.

Im darauffolgenden Winter wurde in Neuengland eine durchschnittlich fünf Grad niedrigere Temperatur gemessen (Sigurdsson, 1982). Zudem war 1784 das niederschlagsreichste Jahr in den letzten 1.000 Jahren und führte in Mitteleuropa zu Hochwassern und Fluten. Die Asche fungiert als Kondensationskern an dem sich Wasser sammelt und abregnet. In Heidelberg zeugen noch heute die damals gemessenen Hochstände des Neckars von den Folgen dieses Ausbruches (Abbildung 1). Hier sieht man ganz deutlich, dass der höchste jemals gemessene Wasserstand im Neckar aus dem Jahr 1784 stammt.

## Erstmalige Beobachtung der globalen Verbreitung

Die globale Verbreitung von Vulkanasche und vulkanischen Gasen konnte 1983 während des Ausbruches des mexikanischen Vulkans El Chichón und 1991 während des Ausbruches des Pinatubos auf den Philippinen mit Hilfe von Satellitenaufnahmen erstmals rund um den Globus beobachtet und nachgewiesen werden. In geologischen Zeiträumen ist man bei der Rekonstruktion von Schwefelemissionen und dem Einfluss auf das Klima auf die Analyse von Eisbohrkernen und andere Näherungswerte (Proxies) angewiesen (s. auch Wagner, 2020 in diesem Band). Die daraus gewonnenen Ergebnisse wiederum können für Klimamodellierungen genutzt werden.

## Auch umgekehrt: Klimaveränderungen wirken auch auf den Vulkanismus

Weitaus weniger erforscht und bekannt sind bislang jedoch die Auswirkungen von Klimaverän-



Abb.2: Schiffe im Hafen von Greifswald. Gemalt von Caspar David Friedrich, ca. 1820.

Quelle: ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Caspar\\_David\\_Friedrich\\_038.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Caspar_David_Friedrich_038.jpg)), als gemeinfrei gekennzeichnet, Details auf Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Template:PD-old>

derungen auf den Vulkanismus. Die Erkenntnis, dass globale Klimaveränderungen auch einen Einfluss auf vulkanische Aktivitäten haben, stammt aus Island (z. B. Sigvaldason et al., 1992) und anderen vergletscherten Regionen wie zum Beispiel Alaska (Praetorius et al., 2016). Dort konnte eine deutliche Steigerung der Vulkanaktivität nach dem Ende der letzten Eiszeit dokumentiert werden. Aber auch in nicht vergletscherten Regionen wie dem Mittelmeerraum zeigen Studien (McGuire et al., 1997), dass Eruptionszyklizitäten mit den Klimazyklen korrelieren (Rampino et al., 1979).

Diese Beobachtungen haben aktuell eine besondere Brisanz, da sich die Frage aufdrängt, wie sich der von Menschen (anthropogen) verursachte Klimawandel auf die Vulkanaktivität und damit verbundene Gefahren auswirken wird (Tuffen, 2010; Pagli & Sigmundsson, 2008; Albino et al., 2010).

Die physikalischen Prozesse, die dieser Interaktion von Vulkanismus und Klima zugrunde liegen, sind noch nicht vollständig verstanden und werden noch diskutiert. In vergletscherten Regionen ist es naheliegend, dass ein Zusammenhang zwischen dem Rückgang der Gletscher und der damit verbundenen Entlastung der Lithosphäre besteht. Ob aber lediglich Wegbarkeiten für das aufsteigende Magma (z. B. entlang von Klüften oder Störungen) geschaffen wurden oder tatsächlich die Schmelzproduktion von Magma gesteigert wurde, ist fraglich.

### Aufschlussreiche Aschelagen in marinen Sedimenten

Ein Problem bei der Findung der zugrunde liegenden Prozesse sind auch die vorhandenen geologischen Zeitreihen, da diese meist nur die letzte Warm- und Kaltzeit umfassen. Eine Chance bieten lange, mehrere Eiszeitzyklen umfassende Zeitserien von Aschelagen, die in marinen Sedimenten abgelagert wurden und ein Archiv des explosiven Vulkanismus in einer Region oder auch global darstellen. Und tatsächlich haben mehrere Studien gezeigt, dass die Tephra-Zeitserien regelmäßig wiederkehrende Ereignisse, sogenannte Zyklizitäten, beinhalten und dass diese mit den globalen Klimazyklen korrelieren, wenn auch mit einer zeitlichen Verschiebung.

Die globalen Klimazyklen werden von den globalen Orbitalparametern, den sogenannten Milankovitch-Zyklen (Präzession (23 ky), Neigung der Erdachse (41 ky) und Exzentrizität der Erdbahn (100 ky)) beeinflusst. Hierbei handelt es sich um langperiodische Schwankungen in der Sonneneinstrahlung, die ihre Ursache in verschiedenen zyklischen Veränderungen haben, die die Lage der Erde bei ihrem Umlauf (Orbit) um die Sonne betreffen.

Die Beobachtungen der Übereinstimmung von periodischen Schwankungen in der Vulkanaktivität und orbitalabhängigen Klimaveränderungen sind momentan der stärkste Hinweis dafür, dass der Vulkanismus entweder durch die Orbitalparameter selbst (z. B. Erdzeiten) oder durch deren globale klimatische Effekte, wie zum Bei-

spiel die Veränderungen von Eisauflasten während dem Wechsel von Eis- und Warmzeiten beeinflusst wird. Die verschiedenen Studien kommen allerdings zum Beispiel für vergletscherte und nicht vergletscherte Regionen zu unterschiedlichen Ergebnissen und es bedarf daher weiterer umfassenderer Studien, um alle offenen Fragen zu beantworten.

Für alle Leser\*innen, die sich noch tiefergehend mit diesem Thema beschäftigen möchten, haben wir zum Schluss noch folgende Empfehlung: Eine ausführliche Betrachtung und Auswertung aller bisher veröffentlichten wissenschaftlichen Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Vulkanismus wurde 2019 in der Fachzeitschrift *Quaternary Science Reviews* von Dr. Steffen Kutterolf (GEOMAR) und seinen Kollegen veröffentlicht.

## Referenzen

- Albino, F., Pinel, V. & Sigmundsson, F., (2010). Influence of surface load variations on eruption likelihood: application to two Icelandic subglacial volcanoes, Grímsvötn and Katla. *Geophysical Journal International*, 181(3), 1510-1524. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04603.x
- Brenna, H., Kutterolf, S. & Krüger, K. (2019a). Global ozone depletion and increase of UV radiation caused by pre-industrial tropical volcanic eruptions. *Scientific Reports*, 9(1):9435. doi:10.1038/s41598-019-45630-0
- Brenna, H., Kutterolf, S., Mills, M. J. & Krüger, K. (2020). The potential impacts of a sulfur- and halogen-rich supereruption such as Los Chocoyos on the atmosphere and climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 6521-6539. doi:10.5194/acp-20-6521-2020
- Kutterolf, S., Schindlbeck, J. C., Jegen, M., Freundt, A. & Straub, S. M. (2019). Milankovitch frequencies in tephra records at volcanic arcs: The relation of kyr-scale cyclic variations in volcanism to global climate changes. *Quaternary Science Reviews*, 204, 1-16. doi:10.1016/j.quascirev.2018.11.004
- McGuire, W. J., Howarth, R. J., Firth, C. R., Solow, A. R., Pullen, A. D., Saunders, S. J., Stewart, I. S. & Vita-Finzi, C. (1997). Correlation between rate of sea-level change and frequency of explosive volcanism in the Mediterranean. *Nature*, 389, 473-476. doi:10.1038/38998
- Pagli, C. & Sigmundsson, F. (2008). Will present day glacier retreat increase volcanic activity? Stress induced by recent glacier retreat and its effect on magmatism at the Vatnajökull ice cap, Iceland. *Geophysical Research Letters*, 35(9). doi:10.1029/2008GL033510
- Praetorius, S., Mix, A., Jensen, B., Froese, D., Milne, G., Wolhowe, M., Addison, J. & Prah, F. (2016). Interaction between climate, volcanism, and isostatic rebound in Southeast Alaska during the last deglaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 452, 79-89. doi:10.1016/j.epsl.2016.07.033
- Rampino, M. R., Self, S. & Fairbridge, R. W. (1979). Can Rapid Climatic Change Cause Volcanic Eruptions? *Science*, 206(4420), 826-829. doi:10.1126/science.206.4420.826
- Sigurdsson, H. (1982). Volcanic pollution and climate: the 1783 Laki eruption. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 63(32), 601-602. doi:10.1029/EO063i032p00601
- Sigvaldason, G. E., Annertz, K. & Nilsson, M. (1992). Effect of glacier loading/deloading on volcanism: postglacial volcanic production rate of the Dyngjufjöll area, central Iceland. *Bulletin of Volcanology*, 54, 385-392. doi:10.1007/BF00312320
- Tuffen, H. (2010). How will melting of ice affect volcanic hazards in the twenty-first century? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1919), 2535-2558. doi:10.1098/rsta.2010.0063
- Wagner, S. (2020). Vulkanismus und Klima in der Vergangenheit: Was lässt sich für die Zukunft lernen? In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 84-89). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.4.1
- Zerefos, C. S., Tetsis, P., Kazantzidis, A., Amiridis, V., Zerefos, S. C., Luterbacher, J., Eleftheratos, K., Gerasopoulos, E., Kazadzis, S. & Papayannis, A. (2014). Further evidence of important environmental information content in red-to-green ratios as depicted in paintings by great masters. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 2987-3015. doi:10.5194/acp-14-2987-2014

## Beeinflussen extreme Wetterereignisse Vulkanaktivitäten?

Stefan Bredemeyer (GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

**Es ist bekannt, dass unsere Atmosphäre durch vulkanische Gasemissionen geformt wurde. Ebenfalls bekannt ist, dass Vulkane aufgrund ihrer Gas- und Aerosol-Emissionen, insbesondere nach großen explosiven Eruptionen, maßgeblich das Klima beeinflussen. Weit weniger bekannt ist jedoch, dass Vulkane gewissermaßen „wetterfähige“ Gebilde sein können und Vulkanaktivität vom Wetter und dem Zustand der Atmosphäre beeinflusst werden kann.**

- Starke Regenfälle können viele Folgeereignisse an Vulkanen auslösen. Dazu zählen Lahare oder Steinschläge.
- Auch kann der Lavadom durch Starkregen auf gefährliche Weise destabilisiert werden. Dies kann sogar eine Dampfexplosion zur Folge haben.
- Vulkanausbrüche können zudem durch starke Regenereignisse ausgelöst werden, wenn sich durch Flankenrutschungen der Magmendruck verändert.

Auf den ersten Blick erscheint es etwas seltsam, dass etwas scheinbar Festes auf der Erdkruste durch atmosphärische Prozesse verändert werden kann. Bei Schlammströmen kann jedoch genau dies passieren: Regenwasser vermischt sich mit Erde und weicher nasser Schlamm rutscht einen Hügel hinunter.

Zu solchen Schlammströmen kann es auch auf Vulkanen kommen, welche in Anlehnung an den indonesischen Begriff für „vulkanische Schlammströme“ auch Lahare genannt werden. Die Mehrzahl dieser Lahare entsteht infolge von Starkregenereignissen während oder nach dem Ausbruch eines Vulkans. Dabei handelt es sich um Schlammströme aus vulkanischer Asche und Lockermaterial, die die Berge herunterstürzen. Lahare haben die Konsistenz von nassem Beton und können metergroße Gesteinsblöcke und Baumstämme mit sich führen. Sie sind wegen ihrer großen Masse und hohen Geschwindigkeit mit bis zu 100 Stundenkilometern besonders gefährlich. Zudem können sie ihre zerstörerische Kraft noch viele Kilometer vom Vulkan entfernt

entfalten, da sie über weite Strecken fließen können.

Lahare sind nicht die einzige Gefahr. Regenwasser kann Steinschläge auslösen, indem es in die Risse zwischen den Felsen gelangt und diese schwächt. Der gleiche Erosionsprozess kann zudem Gesteinsmaterial vom Gipfel und den Flanken eines Vulkans abtragen. Wenn sehr zähflüssige Lava langsam aus dem Vulkanschlot austritt, kann es zur Bildung eines Lavadoms kommen. Dabei handelt es sich um eine Art Pfropfen, der entsteht, wenn die austretende Lava sehr schnell abkühlt, fest wird und den Vulkanschlot verschließt. Lavadome wachsen bevorzugt in Zeiten ohne Niederschlag.

Wenn es jedoch regnet, sickert Wasser in die Risse zwischen den Felsen des Lavadoms. Seine Oberfläche kann einige 100 °C heiß sein, sodass der niederfallende Regen sofort verdampft. Daher ist eine große Regenrate erforderlich, um weiter in die Risse im Felsen zu gelangen. Einmal tief im Inneren angekommen, verdampft das

Regenwasser sobald es Temperaturen über 300 °C ausgesetzt ist. Der überhitzte Dampf nimmt enorm an Volumen zu und kann sich in den engen Spalten nicht frei ausdehnen. Daher kann der plötzliche interne Druckanstieg den Lavadom destabilisieren. Manchmal führt dies zu einem Zusammenbruch des Doms oder direkt zu einer Dampfexplosion.

Einstürzende Lavadome erzeugen pyroklastischen Ströme, eine hochdichte Mischung aus glühendem Vulkangestein und Gas, die mit hoher Geschwindigkeit die Hänge eines Vulkans hinunterschleift und fast alles zerstört, was sich auf ihrem Weg befindet. Diese bis zu 1000 °C heißen Glutwolken können sich zudem mit den Wasserkörpern vermischen, die sie überqueren, wie z. B. mit dem Wasser der vulkanabwärts fließenden Flüsse, und so zu Laharen werden.

Es wird angenommen, dass beispielsweise die Zusammenbrüche des Lavadoms vom Soufrière-Hills-Vulkan auf der karibischen Insel Montserrat in den Jahren 2001 und 2003 durch Regen ausgelöst wurden. Bei letzterem Domkollaps wurden innerhalb von 18 Stunden über 210 Mio. m<sup>3</sup> Material abgetragen, was eine stark explosive Aktivität zur Folge hatte. Die stärkste Explosion produzierte eine über 15 Kilometer hohe vertikale Eruptionswolke, die unzählige pyroklastische Ströme generierte. Die stärksten pyroklastischen Ströme hatten sogar tsunamigene Wirkung. Ähnliche Beobachtungen zum Einfluss des Regens wurden auch an anderen Domvulkanen gemacht wie dem Mount Unzen in Japan, dem Mount Merapi in Indonesien, sowie dem Vulkan Piton de la Fournaise auf der Insel Réunion.

Grundsätzlich ist die Bildung und explosive Freisetzung von unter hohem Druck stehenden Dämpfen nicht an solche Domstrukturen gebunden. Ähnliche durch Regen ausgelöste Dampfexplosionen wurden bereits an anderen Vulkanen beobachtet wie dem Cerro Azul auf Galapagos, dem Láscar, in Nord-Chile oder kürzlich auch auf White Island in Neuseeland.

Überhaupt finden viele Vulkanausbrüche erst nach extremen Starkregenereignissen statt. So kann es durch ein Unwetter zu Erdbeben und Flankenrutschungen am Vulkan kommen. Dadurch verändert sich der Druck auf emporsteigendes Magma und der Magmendruck sinkt. Durch die Drucksenkung setzt das Magma gelöste Gase frei, die sich ausdehnen. Sie drücken nach oben und als Folge kommt es zu einer Eruption.

Die hohe Aktivität des Ätna in Italien beispielsweise ist nicht zuletzt auf eine ständige Druckentlastung durch die kontinuierliche seewärts gerichtete Bewegung der instabilen Ostflanke des Vulkans zurückzuführen. Größere Flankenbewegungen, wie sie insbesondere infolge von Unwetterereignissen zu beobachten sind, haben häufig eruptive Aktivität zur Folge.

Aber auch in Zeiten ohne Extremwetterereignisse stehen Vulkane unter dem permanenten Einfluss atmosphärischer Änderungen, welche u. a. maßgeblich die Entgasungsaktivität von Vulkanen beeinflussen. Signifikante Änderungen in der Entgasungsaktivität eines Vulkans können bereits bei geringfügigen Wetterveränderungen wie zum Beispiel Luftdruckschwankungen auftreten.

Gasemissionsraten verschiedener Vulkane haben gezeigt, dass ihre Entgasungsaktivität während der Passage von Tiefdruckgebieten um ein Vielfaches zunimmt. Bei geringem Luftdruck stoßen die Vulkane die größten Gasmengen aus. Gleichzeitig besteht während der Passage von Tiefdruckgebieten die Gefahr von starken Niederschlägen. Sie können die Abgasschote von Vulkanen überfluten und verstopfen, aber auch Erdbeben auslösen. In Kombination mit durch Regen verstopften Abgasschloten kann sich oberflächennah relativ schnell ein Überdruck im Vulkan aufbauen. Bei vielen Vulkanen gehört ein in regelmäßigen Zeitabständen auftretendes oberflächliches Versiegeln und wieder Freisprengen zum typischen Verhaltensmuster.

Übermäßiger Niederschlag kann sich also stark auf Vulkane auswirken. Aus diesem Grund sind an vielen Vulkanen Wetterstationen installiert, um die Niederschlagsmengen zu registrieren. Allerdings sind große Stürme, die eine solche hohe Niederschlagsrate aufweisen, damit Wasser in den Lavadom eines Vulkans eindringt, hauptsächlich in den Tropen zu finden. Aufgrund einer zu erwartenden Zunahme von extremen Wetterereignissen im Zuge des aktuellen Klimawandels auch in anderen Regionen, bleibt zu untersuchen, ob die Häufigkeit solcher wetterbedingten Eruptionen in Zukunft zunimmt.

## Referenzen

- Mason, B. G., Pyle, D. M., Dade, W. B., & Jupp, T. (2004). Seasonality of volcanic eruptions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B4). doi:10.1029/2002JB002293
- Bredemeyer, S., Ulmer, F. G., Hansteen, T. H., & Walter, T. R. (2018). Radar path delay effects in volcanic gas plumes: the case of Láscar Volcano, Northern Chile. *Remote Sensing*, 10(10), 1514. doi:10.3390/rs10101514
- Friedel, S., Byrdina, S., Jacobs, F., & Zimmer, M. (2004). Self-potential and ground temperature at Merapi volcano prior to its crisis in the rainy season of 2000–2001. *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 134(3), 149-168. doi:10.1016/j.jvolgeores.2004.01.006
- Gaete Rojas, A. B., Walter, T. R., Bredemeyer, S., Zimmer, M., Kujawa, C., Franco Marin, L., San Martin, J. & Bucarey Parra, C. (2020). Processes culminating in the 2015 phreatic explosion at Lascar volcano, Chile, evidenced by multiparametric data. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 20(2), 377-397. doi:10.5194/nhess-20-377-2020

## 4. Unterseeischer Vulkanismus

### Einleitung

Die meisten Ausbrüche von Vulkanen im Meer geschehen, ohne dass wir davon erfahren. Dabei kann das Gefahrenpotential submariner Vulkane beträchtlich sein. Eine vulkanisch besonders aktive Zone im Meer sind die Mittelozeanischen Rücken. Vulkangebiete im Meer sind wirtschaftlich interessant, da sich hier bedeutende Erzlagerstätten befinden. Die Erforschung von submarinem Vulkanismus öffnet uns auch ein Fenster in der Vergangenheit. So war sogenannter Flutbasalt-Vulkanismus mehrfach Auslöser für das Massenaussterben von Arten.

### Themen-Überblick

---

- ▶ Die unbekannte Welt von Unterwasser-Vulkanen
- ▶ Die Mittelozeanischen Rücken
- ▶ Vulkanismus und erzbildende Prozesse an Subduktionszonen
- ▶ Magmatismus in Sedimentbecken
- ▶ Hotspots und Inselketten
- ▶ Marine Supervulkane und deren Auswirkungen in der Erdgeschichte

## Die unbekannte Welt von Unterwasser-Vulkanen

Dr. Karen Strehlow, Dr. Philipp A. Brandl (GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

**Die meisten Vulkanausbrüche finden dort statt, wo wir sie nur schwer beobachten können: unter Wasser. – Ein kleiner Einblick in die noch junge Forschungsdisziplin der Erkundung submariner Vulkane.**

- Das Wissen über Vulkane an Land lässt sich nur begrenzt auf Vulkane unter Wasser übertragen, weil die Bedingungen dort ganz andere sind.
- Die Erforschung submariner Vulkane ist eine junge Forschungsdisziplin und die meisten submarinen Eruptionen geschehen, ohne dass wir davon erfahren.
- Wenig erforscht ist das Gefahrenpotential submariner Vulkane. Dies gilt insbesondere für Vulkane im flachmarinen Bereich. Sie können sehr explosiv sein. Zudem gibt es eine erhöhte Tsunamigefahr.

Unser Verständnis von Vulkaneruptionen basiert fast ausschließlich auf Eruptionen an Land. Das hat schlicht den Grund, dass die direkte Beobachtung von Eruptionen an Land vergleichsweise einfach ist. Wir verfügen über eine immense Menge an Überwachungsdaten und auch die Eruptionsprodukte von Landvulkanen sind zugänglicher. Unser Wissen über Vulkane an Land lässt sich jedoch nur begrenzt auf Vulkane unter Wasser übertragen, weil die Bedingungen dort in der Tat ganz andere sind.

Unter Wasser herrscht ein hoher Druck und die Umgebungstemperaturen sind niedrig. Hinzu kommt, dass sich Wasser als umgebendes Medium ganz anders verhält als Luft: Wasser lässt sich zum Beispiel weniger zusammendrücken, es ist weniger kompressibel. Wenn also Gase während einer Eruption freigesetzt werden, übt das Wasser einen größeren Widerstand gegen deren Ausdehnung aus. Daher ist insbesondere die explosive Ausdehnung von Gasen in größeren Tiefen nur eingeschränkt möglich, explosive Eruptionen werden so weniger wahrscheinlich. Wasser hat zudem eine höhere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität als Luft, gleichzeitig ist es dichter. All dies beeinflusst submarine vulkanische Aktivität stark. Auch die

Fließ-Eigenschaften und das Verhalten der Lava selbst ändern sich.

Die meisten submarinen Eruptionen geschehen, ohne dass wir davon erfahren. Obwohl der größte Anteil des Vulkanismus auf der Erde unter Wasser abläuft, bleibt es eine Glückssache, eine submarine Eruption zu beobachten oder gar Messungen durchführen zu können. Insgesamt ist die Forschung an submarinen Vulkanen noch eine sehr junge Disziplin und im Vergleich zu Vulkanen an Land wissen wir immer noch sehr wenig über die komplexen Prozesse, die dort eine Rolle spielen. Das macht das Thema umso spannender!

Lange Zeit nahm man beispielsweise an, dass der Druck der Wassersäule jeglichen explosiven Vulkanismus in größerer Tiefe unterdrücken würde. Es gibt aber inzwischen durch die intensivere Erforschung des Meeresbodens mehr und mehr Hinweise darauf, dass Vulkane auch in größerer Wassertiefe eine große Bandbreite an Eruptionstilen zeigen können: von effusiven Lavaströmen, über kleine strombolianische Explosionen und Feuerfontänen, bis hin zu pyroklastischen Strömen und großen Caldera-bildenden Eruptionen.

Erst sehr wenige submarine Eruptionen konnten direkt beobachtet werden. Dazu zählen effusive und explosive Eruptionen am West Mata Vulkan ca. 200 Kilometer südwestlich von Samoa (1.200 m unter dem Meeresspiegel), sowie eine kleine explosive Eruption am NW Rota-1 (550 m unter dem Meeresspiegel), nordwestlich der Rota-Insel, die zu den nördlichen Mariannen-Inseln gehört.

Hohe Bekanntheit erhielt – zumindest unter Vulkanologen – auch die letzte Eruption des Havre-Vulkans. Dieser liegt im Kermadec Arc, 900 m unter dem Wasserspiegel. Der Havre-Vulkan brachte während seiner Eruption im Jahre 2012 eineinhalb Mal so viel Material wie die gewaltige Eruption des Mount St. Helens im Jahr 1980 hervor. Die Havre-Eruption wurde nur entdeckt, weil ein 400 Quadratkilometer großer Floß aus Bims (d. h. eine auf dem Meer schwimmende Decke aus Bimsbrocken) und eine Gaswolke auf Satellitenbildern entdeckt wurden und bis zum Havre-Vulkan zurückverfolgt werden konnten. Auch die Eruption des „Vulkan F“ im Tofua-Bogen (Tonga) im August 2019 verriet sich durch einen Floß aus Bims. Dessen Weg im Pazifik wurde mithilfe von Satellitenbildern rekonstruiert und in Kombination mit seismischen Signalen konnte der genaue Ort und Zeit des Vulkanausbruchs ermittelt werden.

Es gibt ein paar wenige submarine Vulkane, die überwacht werden: der Axial Seamount und das Endeavour Segment des Juan-de-Fuca-Rückens (englisch: Juan de Fuca Ridge) vor Vancouver Island. Beide Vulkane werden mithilfe von Kabel-Observatorien überwacht: mehr als 1700 km Kabel und 14 Unterwasserstationen stellen Energie und Kommunikationswege für hunderte von Instrumenten am Meeresboden zur Verfügung. Ebenfalls systematisch überwacht wird der Monowai-Vulkan nördlich von Neuseeland nahe der Kermadec-Inseln. Dieser Unterwasser-Vulkan wird mittels Hydroakustik beobachtet, d. h. durch die Aufzeichnung von akustischen Wellen im Ozean, die durch Erdbeben am Vulkan entstehen.

” Die meisten submarinen Eruptionen geschehen, ohne dass wir davon erfahren.

Noch vergleichsweise wenig erforscht ist auch das Gefahrenpotential submariner Vulkane. Vor allem Vulkane im flachmarinen Bereich stellen eine potenzielle Gefahr dar. Diese können durchaus sehr explosiv sein und entstehende Eruptionswolken können die Wasseroberfläche durchbrechen. Außerdem besteht eine erhöhte Tsunamigefahr durch diese Vulkane, die in nicht so großer Tiefe unter der Wasseroberfläche liegen.

Die Erforschung und kontinuierliche Beobachtung submariner Vulkane ist technisch aufwendig und daher sehr teuer. Die für Landvulkane existierenden Computermodelle müssen erst noch mit komplexeren physikalischen Formeln angepasst werden. Aber angesichts vielfältiger Gefahren wie großen Explosionen, plötzlichen Gasaustritten oder Tsunamis und auch mit Hinblick auf den unter Umständen wirtschaftlichen Nutzen von submarinen vulkanischen Systemen (s. auch ESKP-Redaktion 2018), lohnt sich der intensive Blick auf die Meeresvulkane.

## Referenzen

- Bandl, P. A., Schmid, F., Augustin, N., Grevemeyer, I., Arculus, R. J., Devey, C. W., Petersen, S., Stewart, M., Kopp, H. & Hannington, M. D. (2020). The 6-8 Aug 2019 eruption of 'Volcano F' in the Tofua Arc, Tonga. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 390:106695. doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.106695
- Carey, R., Soule, S. A., Manga, M., White, J. D. L., McPhie, J., Wysoczanski, R., ... McKenzie, W. (2018). The largest deep-ocean silicic volcanic eruption of the past century. *Science Advances*, 4(1):e1701121. doi:10.1126/sciadv.1701121
- Cas, R. A. F. & Simmons, J. M. (2018). Why Deep-Water Eruptions Are So Different From Subaerial Eruptions. *Frontiers in Earth Science*, 6:198. doi:10.3389/feart.2018.00198
- Dziak, R. P., Bohnenstiehl, D. R., Baker, E. T., Matsumoto, H., Cplan-Auerbach, J., Embley, R. W., Merle, S. G., Walker, S. L., Lau, T.-K. & Chadwrich Jr, W. W. (2015). Long-term explosive degassing and debris flow activity at West Mata submarine volcano. *Geophysical Research Letters*, 42(5), 1480-1487. doi:10.1002/2014GL062603
- Embley, R. W., Chadwick Jr, W. W., Baker, E. T., Butterfield, D. A., Resing, J. A., de Ronde, C. E. J., ... Tamura, Y. (2006). Long-term eruptive activity at a submarine volcano. *Nature*, 441, 494-497. doi:10.1038/nature04762
- Jorzik, O., Kandarr, J. & Klinghammer, P. (2018). ESKP-Themenspezial Rohstoffe in der Tiefsee. Metalle aus dem Meer für unsere High-Tech-Gesellschaft. Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2018.2
- Kelley, D.S., Delaney, J.R. & Juniper, S. K. (2014). Establishing a new era of submarine volcanic observatories: Cabling Axial Seamount and the Endeavour Segment of the Juan de Fuca Ridge. *Marine Geology*, 352, 426-450. doi:10.1016/j.margeo.2014.03.010
- Resing, J. A., Rubin, K. H., Embley, R. W., Lupton, J. E., Baker, E. T., Dziak, R. P., ... Thomas, H. (2011). Active submarine eruption of boninite in the northeastern Lau Basin. *Nature Geoscience*, 4, 799-806. doi:10.1038/ngeo1275
- Watts, A. B., Peirce, C., Grevemeyer, I., Paulatto, M., Stratford, W., Bassett, D., Hunter, J. A., Kalnins, L. M. & de Ronde, C. E. J. (2012). Rapid rates of growth and collapse of Monowai submarine volcano in the Kermadec Arc. *Nature Geoscience*, 5, 510-515. doi:10.1038/ngeo1473
- White, J. D. L., Schipper, I. & Kano, K. (2015). Submarine Explosive Eruptions. In H. Sigurdsson, B. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer & J. Stix (Hrsg.), *The Encyclopedia of Volcanoes*. 2. Auflage (S. 553-570). Amsterdam: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-385938-9.00031-6

## Die Mittelozeanischen Rücken

**Weniger als ein Prozent der längsten Bergkette der Welt sind im Detail erforscht. Dabei finden sich entlang der Mittelozeanischen Rücken faszinierende Ökosysteme, die in völlig lichtloser Umgebung der Ozeane Lebensräume für viele Arten bieten.**

Dr. Morgane Le Saout (GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

- Vermutlich findet der Großteil der gesamten vulkanischen Aktivität auf der Erde entlang der Mittelozeanischen Rücken statt.
- Da sich der Großteil des Mittelozeanischen Rückens tief in den Ozeanen befindet, bleiben die meisten Vulkanausbrüche unbemerkt. Der größte Teil der Mittelozeanischen Rücken ist unerforscht.
- An den sich dort befindenden hydrothermalen Quellen können sich faszinierende und artenreiche Biotope in großer Tiefe entwickeln.

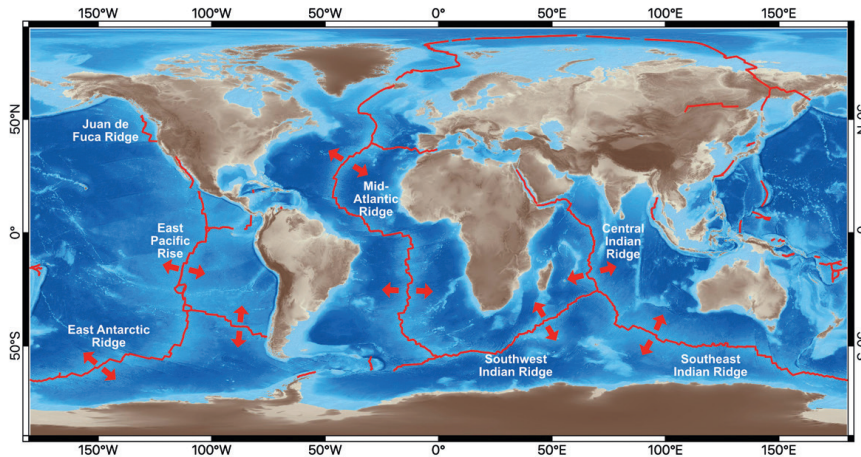
Die längste Bergkette – immerhin umspannt sie die gesamte Erde – ist das System der Mittelozeanischen Rücken. 65.000 Kilometer umfasst es. Mehr als 90 Prozent davon liegen in der Tiefsee in einer durchschnittlichen Tiefe von 2,5 Kilometern. Nur an wenigen Stellen wie zum Beispiel auf Island ragen Bergrücken über den Meeresspiegel hinaus. Mittelozeanische Rücken sind eine der hauptsächlichen geologischen Strukturen, die unseren Planeten formen, da hier die tektonischen Platten auseinanderdriften und neuer Meeresboden bzw. neue Ozeankruste entsteht. Tatsächlich werden mehr als zwei Drittel der Oberfläche unseres Planeten entlang der Mittelozeanischen Rücken erzeugt. Vermutlich findet der Großteil der gesamten vulkanischen Aktivität auf der Erde entlang dieses Systems statt.

### Wichtige geologische Prozesse

Entlang der Mittelozeanischen Rücken kommt es zu zwei wichtigen geologischen Prozessen. Erstens: Wenn sich die ozeanischen Platten auseinander bewegen, schmilzt teilweise das Gestein, welches sich Hunderte von Kilometern unter dem Meeresboden befindet. Ein Teil dieses geschmolzenen Gesteins (sog. Magma) steigt

auf und erzeugt beim Erreichen des Meeresbodens teilweise mächtige Vulkanausbrüche. Diese Ausbrüche können auch an Land stattfinden, wenn ein Teil eines Mittelozeanischen Rückens über die Wasseroberfläche hinausragt. Ein Beispiel dafür ist der Ausbruch des Vulkans Eyjafjallajökull in Island im Jahr 2010, der 250 Millionen Kubikmeter Vulkanasche produzierte. Von diesem Ausbruch war nicht nur die isländische Bevölkerung betroffen. 20 Länder mussten ihren Luftraum für sieben Tage sperren, was mehr als 10 Millionen Fluggäste einschränkte. Da sich der Großteil des Mittelozeanischen Rückens jedoch tief in den Ozeanen befindet, bleiben die meisten Vulkanausbrüche unbemerkt.

Der zweite wichtige geologische Prozess, der den Meeresboden formt, ist die Ausbildung und weitere Ausbreitung von Rissen und Verwerfungen in der Ozeankruste. Die Bewegung entlang dieser tektonischen Strukturen führt zu kleinen bis mittleren Erdbeben, die von Menschen in der Regel nicht gefühlt werden, jedoch von seismischen geophysikalischen Stationen an Land oder auf See entlang der Achsen der Mittelozeanischen Rücken erfasst werden können.



**Abb. 1:** Topographische Karte mit einer globalen Ansicht der Mittelozeanischen Rücken (rote Linie). Das 65.000 Kilometer lange Mittelozeanische Rückensystem wird in jedem Ozean in einer durchschnittlichen Tiefe von 2,5 Kilometer beobachtet.  
Karte: Dr. Morgane Le Saout

### Wie häufig und stark sind Vulkanausbrüche am Mittelozeanischen Rücken?

Seit der Entdeckung der Mittelozeanischen Rücken in den 1950er Jahren haben Forscher rund um den Globus verschiedene Daten gesammelt, um die Prozesse zu verstehen, die unseren Meeresboden formen, aber auch um das potenzielle Risiko abzuschätzen, welches durch die Vulkanausbrüche und die Bodenbewegung entlang der Verwerfungen entsteht. Einige der wichtigsten Fragen sind dabei:

- Wie häufig treten Vulkanausbrüche entlang der Mittelozeanischen Rücken auf?
- Welche Mengen an Magma sind ausgetreten?
- Welche Auswirkungen haben Vulkanausbrüche auf die Ökosysteme?
- Was ist die maximale Intensität, die ein Erdbeben entlang der Mittelozeanischen Rücken erreicht?
- Sind Erdbeben an Mittelozeanischen Rücken eine potentielle Gefahrenquelle?

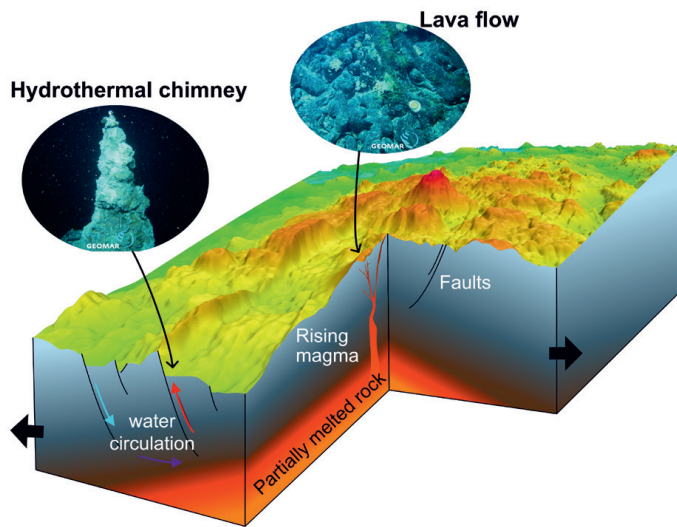
Eines der Forschungsziele der letzten drei Jahrzehnte war es, das Wiederauftreten und den Umfang der Vulkanausbrüche zu analysieren. Seit der Entdeckung des ersten unterseeischen Vulkanausbruchs entlang der Mittelozeanischen Rücken im Jahr 1986 wurden bedeutende Fortschritte bei der Erkennung von entlegenen unterseeischen Ausbrüchen erzielt. Eine der Methoden ist die Analyse der Verteilung von Erdbeben.

Kurz vor und während eines Vulkanausbruchs werden in der Regel kleine Schwarmbeben entdeckt. In jüngerer Zeit wurden geophysikalische Instrumente auf einigen Abschnitten der Achsen eingesetzt, um Echtzeitdaten über das Auftreten dieser Erdbeben zu liefern.

Insgesamt wurden seit 1986 mehr als 13 unterseeische Vulkanausbrüche entlang Mittelozeanischer Rücken entdeckt. Ferngesteuerte wie auch bemannte Unterwasserfahrzeuge können während oder kurz nach diesen Vulkanausbrüchen für Messungen eingesetzt werden. Die Analyse der so gewonnenen Daten liefert wichtige Informationen über Größe, Dauer, Häufigkeit und Art dieser unterseeischen Ausbrüche sowie ihrer Auswirkungen auf die Umwelt. Die Untersuchungen zeigen, dass beispielsweise nur zwei Abschnitte des Mittelozeanischen Rückensystems in den letzten 20 Jahren mehr als einmal ausgebrochen sind. Auf Grund der langen Zeitzyklen zwischen den Ereignissen sind daher Analysen älterer vulkanischer Lavaströme notwendig, um ein besseres Verständnis der zeitlichen Eruptionshäufigkeit entlang verschiedener Abschnitte der Mittelozeanischen Rücken zu erhalten.

### Hydrothermale Quellen: einzigartige Ökosysteme und Erzvorkommen

Mittelozeanische Rücken begünstigen die Entwicklung von heißen „hydrothermalen“ Quellen. Dabei dringt kaltes Meerwasser durch Risse im Meeresboden in die neue, heiße Kruste ein.



**Abb. 2:** Blockdiagramm eines Mittelozeanischen Rückens, das die Zirkulation von heißem „hydrothermalen“ Wasser und den Aufstieg von Magma zeigt. Die mit einem ferngesteuerten Fahrzeug aufgenommenen Fotos zeigen einen hydrothermalen Schornstein und einen unterseeischen Lavastrom. Die Fotos wurden mit dem ferngesteuerten Fahrzeug PHOCA vom GEOMAR während der Forschungsfahrt MSM75 im Juni und August 2018 aufgenommen.  
Grafik: Dr. M. Le Saout/GEOMAR

Das eindringende Wasser wird erhitzt (bis zu 400 °C) und mit Mineralien angereichert.

Dadurch entsteht eine Änderung des Auftriebs und das heiße, „hydrothermale“ Wasser wird mit hoher Geschwindigkeit (d. h. mit bis zu zwei Metern pro Sekunde) aus dem Meeresbodengestein ausgestoßen. Im Kontakt mit den fast eisigen Temperaturen des Ozeans verfestigen sich die gelösten Mineralien und bilden kaminartige Strukturen, die bis zu 60 Meter hoch sind und mehr als zehn Meter pro Jahr wachsen können. Das aus diesen Quellen kommende hydrothermale Wasser ist oft schwarz oder weiß, und die Farbe variiert je nach den gelösten Mineralien im Wasser.

Diese sogenannten „Schwarzen Raucher“ (englisch „Black Smoker“) bestehen hauptsächlich aus Eisensulfiden. „Weiße Raucher“ hingegen enthalten Barium, Kalzium und Silizium. Eine über lange Zeit an einem Ort konzentrierte hydrothermale Aktivität kann so zur Bildung großer Erzkörper führen. Abgesehen von den Mineralressourcen, die durch hydrothermale Schloten entstehen können, liefert hydrothermales Wasser aber auch Nährstoffe, die die Grundlage für riesige unterseeische Ökosysteme bilden. Diese beherbergen unter anderem einzigartige Bakterien, Röhrenwürmer, Krabben, Garnelen, Muscheln, Napfschnecken, Muscheln und Fische. Das Besondere: All diese Arten gedeihen

an Schwarzen und Weißen Rauchern bei völliger Abwesenheit von Sonnenlicht.

Was den Rest der Tiefsee anbelangt, so ist der größte Teil des Systems der Mittelozeanischen Rücken noch unerforscht. Während etwa die Hälfte des Mittelozeanischen Rückensystems von Forschungsschiffen aus kartiert werden konnte, wurden weniger als ein Prozent des gesamten Gebietes mit Hilfe von Tauchbooten oder ferngesteuerten Fahrzeugen detailliert erfasst. Daher ist es wichtig, weiterhin hochauflösende Karten, Fotos und Videos des Meeresbodens sowie Gesteinsproben von verschiedenen Orten entlang der Mittelozeanischen Rücken zu sammeln. Diese Daten werden detaillierte Informationen liefern, die für ein besseres Verständnis dieser komplexen geologischen und biologischen Systeme notwendig sind.

” **Tatsächlich werden mehr als zwei Drittel der Oberfläche unseres Planeten entlang der Mittelozeanischen Rücken erzeugt.**

## Referenzen

- Kelley, D. S., Delaney, J. R. & Juniper, S. K. (2014). Establishing a new era of submarine volcanic observatories: Cabling Axial Seamount and the Endeavour Segment of the Juan de Fuca Ridge. *Marine Geology*, 352, 426-450. doi:10.1016/j.margeo.2014.03.010
- Rubin K. H. (2016). Mid-ocean Ridge Magmatism and Volcanism. In J. Harff, M. Meschede, S. Petersen & J. Thiede (Hrsg.), *Encyclopedia of Marine Geosciences. Encyclopedia of Earth Sciences Series* (S. 501-513). Springer, Dordrecht. doi:10.1007/978-94-007-6238-1\_28
- Schlindwein, V., Demuth, A., Korger, E., Läderach, C. & Schmid, F. (2015). Seismicity of the Arctic mid-ocean Ridge system. *Polar Science*, 9(1), 146-157. doi:10.1016/j.polar.2014.10.001
- Wilcock, W. S., Tolstoy, M., Waldhauser, F., Garcia, C., Tan, Y. J., Bohnenstiehl, D. R., Caplan-Auerbach, J., Dziak, R. P., Arnulf, A. F. & Mann, M. E. (2016). Seismic constraints on caldera dynamics from the 2015 Axial Seamount eruption. *Science*, 354(6318), 1395-1399. doi:10.1126/science.aah5563

## Vulkanismus und erzbildende Prozesse an Subduktionszonen

Dr. Philipp A. Brandl, Dr. Sven Petersen (GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

**An Inselbogenvulkanen können sich im Untergrund, nahe des entgasenden Magmas, Lagerstätten für ökonomisch interessante Metalle wie Kupfer, Molybdän oder Gold bilden.**

- Vulkanausbrüche entlang von Subduktionszonen können wegen der Zähflüssigkeit der Lava und den bestehenden Druckverhältnissen besonders gefährlich sein.
- Unter Wasser kommt es bei vulkanischer Aktivität zur Interaktion zwischen mehreren hundert Grad heißem Magma und Meerwasser. Im Flachwasser kann es daher zu explosiven Vulkanausbrüchen kommen
- Entlang von Inselbogenvulkanen kommt es zu vielfältigen Prozessen der Erzbildung. Hier finden sich Metalle wie Kupfer, Molybdän und Gold, aber auch wirtschaftlich interessante Spurenmetalle wie Antimon oder Indium.

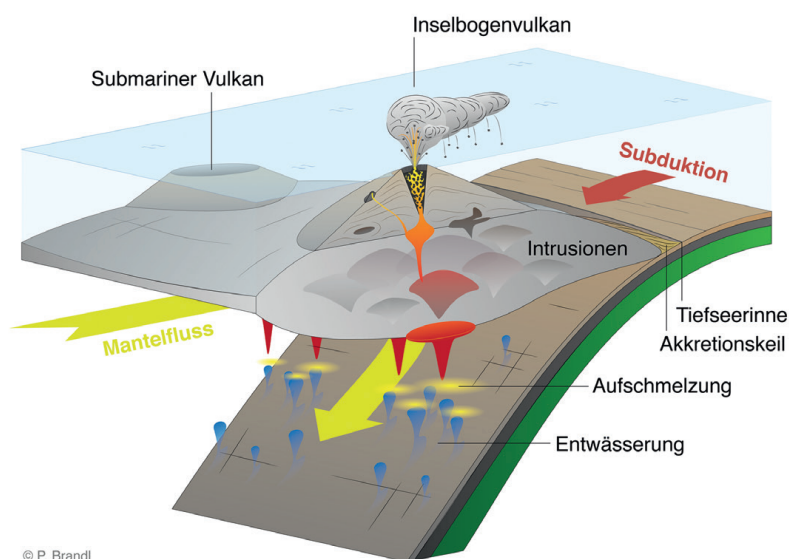
Subduktion ist in der Geologie ein grundlegender Prozess der Plattentektonik. Vereinfacht gesagt, kollidiert hier eine ozeanische Platte mit einer kontinentalen und taucht unter dieser ab. Subduktionszonen sind daher sogenannte destruktive Plattengrenzen, weil sich an ihnen einzelne Lithosphärenplatten – Erdkruste und der obere starre Erdmantel – aufeinander zu bewegen und letztlich eine der beiden zurück in den zähflüssigen Erdmantel (die sogenannte Asthenosphäre) absinkt und dort quasi „recycelt“ wird.

Dabei entscheidet die spezifische Dichte der jeweiligen Platten, welche der beiden unter die andere abtaucht. Weil die kontinentale Kruste eine geringere Dichte als die ozeanische hat, tauchen die ozeanischen Platten unter den kontinentalen weg. Bewegen sich dagegen zwei ozeanische Platten aufeinander zu, wird diejenige subduziert, die älter und kälter ist, und somit die spezifisch höhere Dichte aufweist. In diesem Sonderfall spricht man von intra-ozeanischen Subduktionszonen (Abb. 1).

### Woran erkennt man Subduktionszonen?

Von ihrer Form her, das heißt morphologisch, erkennt man Subduktionszonen anhand der Tiefseerinnen, die eine Wassertiefe von bis zu 11 Kilometern aufweisen können. Die ozeanische Lithosphäre, die in den Erdmantel abtaucht, führt große Mengen Wasser mit sich, das in die Kristallstruktur von Mineralen wie z. B. Amphibol eingebaut ist. In der Tiefe werden diese Minerale durch den enormen Druck instabil und geben das enthaltene Wasser sowie andere flüchtige Elemente wie Kohlenstoff, Schwefel, Halogene (Chlor, Fluor, Brom etc.), aber auch Metalle frei. Diese Elemente steigen in den darüber liegenden heißen Mantelkeil auf und setzen dort den Schmelzpunkt des Mantelgesteins herab. So kommt es zur Bildung von Magma (Abb. 1).

Diese Gesteinsschmelze steigt dann nach oben und bildet an der Erdoberfläche Vulkane. Wie an einer Perlenschnur aufgereiht, findet man diese in einem gewissen Abstand hinter der Tiefseerinne. Aufgrund ihrer gebogenen Form werden diese Zonen allgemein als magmatische Bögen oder, im Fall von intraozeanischen Subduktions-



**Abb. 1:** Schemazeichnung einer Subduktionszone mit nachgelagertem Inselbogen. Wasser aus der subduzierten Platte führt zur Aufschmelzung im darüber liegenden heißen Mantelkeil. Die entstehenden Schmelzen steigen auf, erstarren in der Tiefe als Intrusionen oder formen Vulkane an der Oberfläche. Grafik: Philipp Brandl

zonen, wo nur die Spitzen einiger Vulkane über den Meeresspiegel herausragen, als Inselbögen bezeichnet. Auffällig ist, dass fast der gesamte Pazifische Ozean von Subduktionszonen umgeben ist. Die Vielzahl an Vulkanen entlang der Pazifischen Platte prägte den Begriff des Pazifischen Feuerrings. Zu ihm gehören die Inselbögen der Aleuten, Izu-Bonin, Marianen, Salomonen, Neue Hebriden (Vanuatu), Tonga und Kermadec sowie die aktiven Kontinentalränder Japans, Kamtschatkas, der Kaskaden und der Anden.

### Gefährlicher Vulkanismus an Subduktionszonen

Im Gegensatz zu den Schmelzen am Mittelozeanischen Rücken, enthält Magma, das an Subduktionszonen gebildet wird, einen relativ hohen Anteil an Wasser und anderen flüchtigen Elementen. In der Wissenschaft spricht man hier auch von sogenannten „Volatilen“. Dies hat zwei Effekte: Zum einen kommt es zu einer starken magmatischen Differenzierung der Gesteine und andererseits zu einem hohen Gas- bzw. Fluiddruck. Die Differenzierung hat zur Folge, dass das Magma zunehmend höhere Gehalte an Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) aufweist und damit zähflüssiger wird.

Während basaltische Schmelzen an einem Mittelozeanischen Rücken z.B. ca. 50 Gewichtsprozent  $\text{SiO}_2$  aufweisen, haben andere vulkanische

Gesteinsarten wie Andesite, Dazite oder Rhyolite an Inselbogen vulkanen  $\text{SiO}_2$ -Gehalte von 57 bis über 75 Gewichtsprozent. Zusammen mit den enthaltenen Volatilen ergibt sich aus dieser Zähflüssigkeit eine gefährliche Kombination, denn sie erschwert die kontinuierliche Entgasung während des Aufstiegs der Schmelzen. Daraus kann ein Überdruck entstehen, der in einem explosiven Vulkanausbruch mündet. Dies ist der Grund, warum Vulkanismus im Zusammenhang mit Subduktionszonen so gefährlich und teils zerstörerisch ist.

### Vulkanausbrüche unter Wasser

Unter Wasser kommt es bei vulkanischer Aktivität zur Interaktion zwischen mehreren hundert Grad heißem Magma und Meerwasser. Im Flachwasser kann es dabei zu einer sogenannten „Surtseyanischen Aktivität“ kommen, benannt nach dem Ausbruch des Vulkans Surtsey 1963 südlich vor Island. Hierbei kommt es zur explosionsartigen Entstehung von Wasserdampf und der plötzlichen Ausdehnung der in der Schmelze enthaltenen Volatile.

Die entstehenden Eruptionen bestehen überwiegend aus Asche, Tuff und fragmentierter Lava wie z. B. Bimsstein, und die Eruptionssäule durchbricht die Wasseroberfläche. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt jedoch die Tendenz für explosive Eruptionen ab, da der steigende



**Abb. 2:** Blick in den Krater von White Island, einem Inselbogenvulkan nördlich von Neuseeland. Der Kratersee des aktiven Vulkans besteht aus magmatischen Fluiden wie Wasser oder Schwefelwasserstoff, gelöstem Gestein und Regenwasser und ist extrem sauer. White Island setzt kontinuierlich große Mengen an Schwefelgasen frei. Foto: P. Brandl (Aufnahme: Dezember 2009)

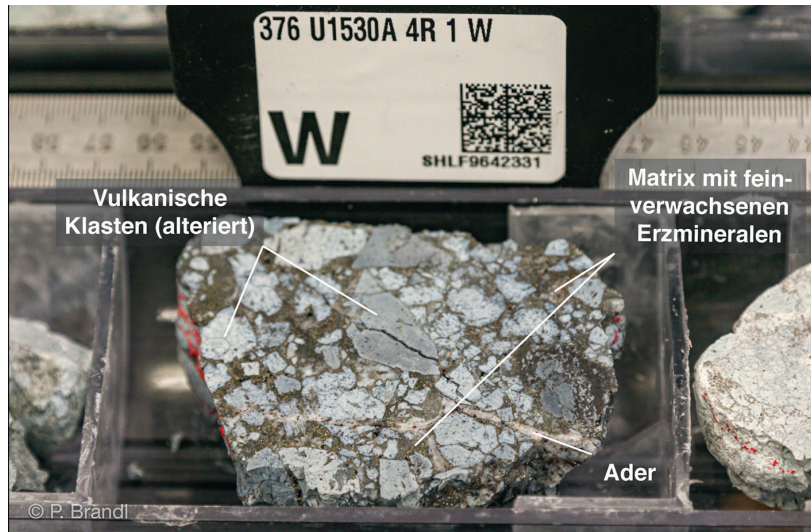
Umgebungsdruck eine hemmende Wirkung auf die Entwicklung von Gasblasen und damit die Explosivität von Vulkanausbrüchen hat. In diesen Fällen durchbricht die Eruptionssäule häufig nicht die Wasseroberfläche, und es überwiegen Ausbrüche mit untermeerischen Lavaströmen.

### Wie lösen sich wertvolle Minerale aus dem Gestein?

Die Wärme des Magmas und das umgebende Meerwasser sind die Grundzutaten für hydrothermale Systeme. Wasser dringt in das Gestein ein, erhitzt sich und beginnt das Gestein umzuwandeln, also zu „alterieren“. Bestimmte Elemente, u. a. viele Metalle, werden aus dem Gestein gelöst und in der Lösung angereichert und transportiert. Diese Lösungen können Temperaturen von über 400 °C erreichen und erhalten dadurch einen positiven Auftrieb, der sie zur Meeresbodenoberfläche aufsteigen lässt. Dort kommt es zum Kochen der Lösung und/oder zur Mischung mit dem kalten Meerwasser und so zur Abscheidung aus der mineralreichen Lösung. An Inselbögen kommt noch ein direkter Eintrag magmatischer Fluide, Gase und Metalle dazu (Abb. 2). Je nach Anteil des magmatischen Eintrags spricht man von Seewasser-dominierten oder magmatisch-hydrothermalen Hybridssystemen.

Vor allem letztere finden sich häufig an Inselbogenvulkanen. Im Untergrund, nahe des entgasenden Magmas kann es zur Bildung sogenannter porphyrischer Lagerstätten kommen, die für ihre ökonomisch wichtigen Metalle Kupfer, Molybdän und Gold bekannt sind. Der Begriff „porphyrisch“ bezeichnet dabei das Gefüge eines Gesteins, welches aus einer feinkörnigen Matrix und makroskopisch sichtbaren Einsprenglingen besteht.

Näher an der Oberfläche und daher bei niedrigeren Temperaturen von ca. 150–300 °C bilden sich sogenannte epithermale Mineralisationen, die wichtige Vorkommen an Gold, Silber und Tellur darstellen. Überwiegt das hydrothermale System, kommt es zu Massivsulfid-Erzbildungen ähnlich denen am Mittelozeanischen Rücken. Neben den Metallen Kupfer und Zink sind Massivsulfide an Inselbögen jedoch darüber hinaus mit wirtschaftlich interessanten Spurenmetallen wie Antimon, Gallium, Germanium, Indium, Wismut und Zinn angereichert. Das Erforschen der aktiven, erzbildenden Prozesse in der Tiefsee trägt dazu bei, unser Verständnis dieser Lagerstätten zu verbessern. Dies hilft, die Rohstoffgewinnung an Land zu verbessern und die Rohstoffversorgung für grüne Zukunftstechnologien zu sichern.



**Abb. 3:** Auf dem Bild sieht man den Teil eines Bohrkerns, der 2018 während IODP (International Ocean Discovery Program) Expedition 376 aus dem Inneren des submarinen Brothers-Vulkans nördlich von Neuseeland erbohrt wurde. Das Handstück zeigt eine sogenannte vulkanoklastische Brekzie, also ein Gestein, das aus Bruchstücken vulkanischer Gesteine besteht. In der Matrix der stark alterierten Brekzie finden sich feinverwachsene Erzminerale wie Pyrit und Kupferkies. Auch eine Ader, gebildet durch zirkulierende Fluide, ist sichtbar. Foto: P. Brandl

## Referenzen

- Brandl, P. A., Hannington, M. D., Geersen, J., Petersen, S. & Gennerich, H.-H. (2020). The submarine tectono-magmatic framework of Cu-Au endowment in the Tabar-to-Feni island chain, PNG. *Ore Geology Reviews*, 121:103491. doi:10.1016/j.oregeorev.2020.103491
- de Ronde, C., Humphris, S. E., Hofig, T. W., Reyes, A. G. & the IODP Expedition 376 Scientists. (2019). Critical role of caldera collapse in the formation of seafloor mineralization: The case of Brothers volcano. *Geology*, 47(8), 762-766. doi:10.1130/G46047.1
- de Ronde, C. E. J., Massoth, G. J., Butterfield, D. A., Christenson, B. W., Ishibashi, J., Ditchburn, R. G., ... Takai, K. (2011). Submarine hydrothermal activity and gold-rich mineralization at Brothers Volcano, Kermadec Arc, New Zealand. *Miner Deposita*, 46, 541-584. doi:10.1007/s00126-011-0345-8
- Hannington, M. D., de Ronde, C. & Petersen, S. (2005). Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems. In J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb & J. P. Richards (Hrsg.), *Economic Geology. One Hundredth Anniversary Volume, 1905-2005* (S. 111-141). Littleton: Society of Economic Geologists, Inc. doi:10.5382/AV100.06

## Magmatismus in Sedimentbecken – der Ursache vergangener Umweltkatastrophen auf der Spur

Dr. Christophe Galerne, Prof. Dr. Christian Berndt  
(GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

**Der Magmatismus in Sedimentbecken verursachte globale Massenaussterben und ist die engste Analogie zum heutigen anthropogenen Klimawandel. Das Studium dieser natürlichen Prozesse ist oft schwierig, da die Magma-Aufstiegssysteme mit kaum sichtbarer Oberflächenexpression verschüttet bleiben. Bei GEOMAR untersuchen wir diese Systeme mit Hilfe von marinen seismischen Daten und modernsten numerischen Modellen.**

- Unter Spalteneruptionen verbergen sich große Magma-Aufstiegssysteme, die mehr Treibhausgase freigesetzt haben als der größte der heutigen Vulkane.
- Die Magma-Aufstiegssysteme der Magmatischen Großprovinzen (engl.: Large Igneous Provinces – LIP) lösten im Verborgenen die Freisetzung großer Mengen Methan und Kohlendioxid aus, die rasch an der Erdoberfläche austraten.
- Das Verständnis dieser geologischen Auslöser von paläo-ökologischen Krisen ermöglicht eine bessere Prognose des anthropogenen Klimawandels und seiner Kipp-Punkte.

Wenn wir an Vulkane denken, dann stellen wir uns einzeln stehende Berge vor, die in den Himmel ragen. Doch repräsentieren diese nur einen kleinen Teil dessen, wie geschmolzene Magma aus der Erdkruste an die Oberfläche dringt.

Selbst die größten Vulkane auf der Erde, wie zum Beispiel der Mauna Loa auf Hawaii, sind winzig im Vergleich zu der Masse an vulkanischem Material, welches in der Vergangenheit der Erde in sogenannten Magmatischen Großprovinzen (engl.: Large Igneous Provinces – LIP) abgelagert wurde. Dabei handelt es sich um Gebiete in der Erdkruste, in denen große Mengen Magma ausgestoßen wurden. Beispielsweise entwickelte sich im Verlaufe der Entstehung des Nordatlantiks eine Magmatische Großprovinz. Sie war durch Spalteneruptionen (Abb. 1) gekennzeichnet, welche hunderte Kilometer lang waren und zu Lavaflüssen von einigen zehn Metern Dicke und einer Länge von einigen zehn Kilometern führten.

Diese Spalteneruptionen spuckten so viel Lava aus, dass der Rand des Nordatlantiks über eine Länge von 3.000 Kilometern von einer 12 Kilometer dicken Lavaschicht bedeckt war. In den letzten 55 Millionen Jahren ist nichts auch nur annähernd Vergleichbares geschehen, und doch ist die damit verbundene globale Erwärmung auch heute noch das jüngste Analogon zur vom Menschen verursachten Erderwärmung.

### Eine Magmatische Großprovinz versteckt im Nordatlantik

Wie bei einem Eisberg waren die enormen Spaltenausbrüche nur der winzige Oberflächenausdruck von Magmabewegungen in den Sedimentbecken unter dem Meeresboden rund um den Nordatlantik. Das aufsteigende Magma verhielt sich wie ein durch die Luft fliegendes Geschoss, wenn es auf Wasser trifft: es verlor erheblich an Geschwindigkeit und verlangsamte sich aufgrund der veränderten Umgebung.



**Abb. 1:** A) Eine Spalteneruption an der Oberfläche. B) Erkalte Magma, die in einem Sedimentbecken erhalten ist. Das Magma ist zur Zeit des Ausbruchs durch einen vertikalen Spalt (Gesteinsgang oder Dyke) an die Oberfläche gedrungen und anschließend erkalte. C) Beispiel eines 20 Kilometer breiten und 100-150 Meter dicken Lagergang (Sill) in Südafrika (Galerie et al., 2008). Der Lagergang hat die Form einer Untertasse. Diese Geometrie wird häufig bei Intrusionen in Sedimentbecken beobachtet (C-Oben: Luftaufnahme; C-Unten: Bodenaufnahme). **Foto A:** Ari Trausti Guðmundsson, Geophysiker und Dokumentarfilmer/Filmmacher, **Fotos B-C:** Christophe Galerie, Geologe und Petrophysiker.

Als das Magma den Boden des Sedimentbeckens in etwa 10 Kilometer Tiefe unterhalb des Meeresgrunds erreichte, kam es zu einem vergleichbaren Verlust an Geschwindigkeit und einer enormen Zerstörungskraft. Anstatt vertikal durch das Sediment an die Oberfläche aufzusteigen, wurde das Magma durch tausende Schichten von Sedimenten unterschiedlicher Widerstandskraft zur horizontalen Ausbreitung gezwungen.

Schließlich ging die gesamte hydraulische Sprengkraft des Magmas verloren und der Wärmeverlust war so groß, dass es nicht länger flüssig blieb. Die aus der Kristallisation des Magmas entstandenen Gesteinsschichten werden als Lagergang oder Sill bezeichnet und können überall um den Nordatlantik untersucht werden. Tausende dieser Lagergänge entstanden in den Sedimentbecken des Nordatlantiks bevor es schließlich zu einem Durchbruch kam, der zu den Spalteneruptionen führte.

### Wie kann man einen Blick auf solche Magma-Aufstiegssysteme werfen?

Durch das Aussenden und Empfangen von seismischen Pulsen können wir Magmaaufstiegssysteme unterhalb der Erdoberfläche sichtbar machen. Die Ergebnisse der bisherigen Meeresforschung legen nahe, dass erkalte Magma-

systeme in Sedimentbecken weltweit verbreitet sind. Eine solche seismische Untersuchung unter der Leitung des GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel hat kürzlich ein aktives Magmasystem kartiert, das sich derzeit im Golf von Kalifornien bildet (Berndt et al., 2016). Obwohl dieses System weitaus kleiner als die Magmasysteme der Magmatischen Großprovinzen im Nordatlantik, Südafrika, Indien oder Sibirien ist, so vermitteln uns die entsprechenden seismischen Daten einen Eindruck davon, was sich im Verlaufe dieser außerordentlichen Vulkanismusperioden ereignete.

### Das geologische Rezept für Massenaussterben

Obwohl diese großen Magma-Aufstiegssysteme keinen unmittelbaren Einfluss auf die Erdoberfläche haben, lösen sie doch eine Kettenreaktion aus, die zu langanhaltenden katastrophalen Auswirkungen auf die Ozeane, die Atmosphäre und die Biosphäre führen kann (Eldholm & Thomas, 1993).

Während das Magma abkühlt, gibt es seine Wärme an die umgebenden Sedimente ab. Hier setzt das einen Prozess in Gang, der als Hydrothermalismus bezeichnet wird. Da Sedimentbecken die größten geologischen Kohlenstoffspeicher

der Erde sind (Jones et al., 2016), können diese Speicher durch die vom Magma abgeführte Wärme mobilisiert werden und große Mengen an eingeschlossenem Kohlenstoff durch gewaltige Entgasung freisetzen.

Wie die anthropogenen Aktivitäten der Gegenwart kann das Eindringen von Magma in Sedimentbecken, die reich an organischem Material sind, den natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Atmosphäre und der Ozeane aus dem Gleichgewicht bringen. Wir wissen mittlerweile, dass die 150 Jahre der Nutzung fossiler Energieträger durch den Menschen einem durchschnittlichen globalen Temperaturanstieg von etwa 2 °C entsprechen.

Vor 55 Millionen Jahren wurde eine ähnliche Menge an Treibhausgasen (2.000–12.000 Gt) durch magmatische Aktivität in den Sedimentbecken vor der Küste Norwegens freigesetzt, was zu einem globalen Temperaturanstieg von 6–8° Celsius führte (Svensen et al., 2004).

In geologisch noch weiter zurück liegender Zeit führte ein magmatisches Ereignis in einem Becken, das heute den größten Teil Südafrikas ausmacht, zur Freisetzung etwa des zehnfachen der anthropogenen Emissionen seit Beginn der industriellen Revolution (Galerne & Hasenclever, 2019). Unsere Computersimulationen deuten darauf hin, dass die entsprechenden Entgasungsraten um fünf Größenordnungen ( $10^5 = 100.000$ ) höher gewesen sein könnten als die jährlichen anthropogenen Emissionen.

Noch mehr Magma ist in die Sedimentbecken des späteren Zentralatlantiks (201 Millionen Jahre) und des Tunguska-Beckens in Sibirien (252 Millionen Jahre) eingedrungen. Diese beiden magmatischen Ereignisse sind die einzigen plausiblen und quantitativ bestimmbareren Ursachen für zwei der umfangreichsten Massensterben auf der Erde (Jones et al., 2016).

## Ein besseres Verständnis der Vergangenheit ist ein Fenster zur Zukunft

Diese Art des Vulkanismus mit fast keinem Ausdruck an der Erdoberfläche ist ein verborgener Killer, vergraben durch die Zeit in den Gesteinsschichten. Auf unserer Erde brechen jeden Tag Vulkane aus und setzen dabei unter anderem übelriechenden Schwefel frei, und dennoch stören sie dabei den natürlichen Kohlenstoffkreislauf nicht in signifikanter Weise. Selbst die größten Ausbrüche in historischen Zeiten wie der des Mt. Pinatubo (1991) veränderten das Weltklima nur für einige Monate.

Im Gegensatz dazu fallen die durch großflächige magmatische Intrusionen in Sedimentbecken freigesetzten Mengen an Treibhausgasen mit großen Massenaussterben auf der Erde zusammen. Ein besseres Verständnis dieser Krisen, ihrer Auslöser und Kipp-Punkte kann uns helfen, die Auswirkungen und langanhaltenden Folgen der anthropogenen Erderwärmung besser vorherzusagen.

## Referenzen

- Berndt, C., Hensen, C., Mortera-Gutierrez, C., Sarkar, S., Geilbert, S., Schmidt, M., ... Lizarralde, D. (2016). Rifting under steam – How rift magmatism triggers methane venting from sedimentary basins. *Geology*, 44(9), 767-770. doi:10.1130/G38049.1
- Eldholm, O., & Thomas, E. (1993). Environmental-Impact of Volcanic Margin Formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 117(3-4), 319-329. doi:10.1016/0012-821X(93)90087-P
- Galerne, C. Y. & Hasenclever, J. (2019). Distinct degassing pulses during magma invasion in the stratified Karoo Basin – New insights from hydrothermal fluid flow modelling. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(6), 2955-2984. doi:10.1029/2018GC008120
- Galerne, C. Y., Neumann, E.-R. & Planke, S. (2008). Emplacement Mechanisms of Sill Complexes: Information from the Geochemical Architecture of the Golden Valley Sill Complex, South Africa. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(2), 425-440. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.06.004
- Jones, M., Jerram, D. A., Svensen, H. & Grove, C. (2016). The effects of large igneous provinces on the global carbon and sulphur cycles. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 441(1), 4-21. doi:10.1016/j.palaeo.2015.06.042
- Svensen, H., Planke, S., Malthe-Sørenssen, A., Jamtveit, B., Myklebust, R., Eidem, T. R. & Rey, S. S. (2004). Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming. *Nature*, 429, 542-545. doi:10.1038/nature02566

## Hotspots und Inselketten

Dr. Stephan Homrighausen (GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

**Geschätzt mehr als 25 Millionen Vulkane bedecken den Meeresboden. Eine besondere Form des Vulkanismus findet sich inmitten von tektonischen Platten, wenn diese über Hotspots gleiten. Hier entstehen nach und nach bis zu tausende Kilometer lange Vulkanketten. Diese spezielle Form des Vulkanismus bietet nicht nur interessante Rohstoffvorkommen und wertvolle Ökosysteme, sondern sie beeinflussen auch die Ozeanzirkulation und damit das Klima.**

- Auch im Inneren von ozeanischen und kontinentalen Platten gibt es bedeutsamen Vulkanismus.
- Dieser Hotspot-Vulkanismus lässt sich durch das Mantle-Plume-Modell erklären.
- Er ermöglicht der Wissenschaft aber auch Einblicke in den unteren Erdmantel.

Der überwiegende Anteil aktiver Vulkane (circa 90 Prozent) wird durch plattentektonische Prozesse an konvergierenden und divergierenden Plattengrenzen (sogenannten Subduktions- oder Spreizungszonen) wie den Anden oder dem Mittelozeanischen Rücken ausgelöst. Aber auch im Inneren von ozeanischen und kontinentalen Platten gibt es bedeutsamen Vulkanismus, der als Intraplattenvulkanismus bezeichnet wird. Es wird davon ausgegangen, dass mehr als 25 Millionen Vulkane den Meeresboden bedecken, wovon aktive Vulkaninseln wie Hawaii eine Höhe von bis zu 10 Kilometern über dem umgebenden Meeresboden erreichen können.

Eine besondere Form des Intraplattenvulkanismus sind bis zu mehrere tausend Kilometer lange Vulkanketten, deren Vulkanismus in Richtung einer vulkanisch aktiven, ozeanischen Insel systematisch jünger wird, was als altersprogressiver Intraplattenvulkanismus beschrieben wird. Das klassische Beispiel für diese Form des Vulkanismus ist die Hawaii-Emperor-Vulkankette im Pazifik, die aus einzelnen isolierten Unterwasservulkanen besteht (englisch Seamounts) und an den hawaiianischen Inseln mündet. Altersprogressiver Intraplattenvulkanismus kann aber auch am Meeresboden mächtige kammartige Gebirge formen, die in ihrer Ausdehnung mit den Alpen ver-

gleichbar sind. Das ist am „Walfischrücken“ (engl. Walvis Ridge) im Südatlantik der Fall. Am Ursprung vieler altersprogressiver Vulkanketten liegen ozeanische Plateaus oder kontinentale Flutbasalte, die binnen weniger Millionen Jahre durch mehrere hunderttausend Kubikmeter Lava geformt wurden.

Der altersprogressive Intraplattenvulkanismus hat eine erhebliche globale Bedeutung. Zum einen beherbergen einige kontinentale Flutbasalte weltweit bedeutsame Rohstoffvorkommen. Zum anderen kann die Freisetzung von Vulkan gasen und anderen Eruptionsprodukten zu einer globalen Erwärmung, Versauerung und Sauerstoffverarmung der Meere führen. Diese massiven marinen Gebirgsketten können zudem die Ozeanzirkulation und somit das Klima nachhaltig beeinflussen. Neben diesen Effekten bilden größere Seamounts, submarine Gebirgskämme und Plateaus, im Vergleich zur umgebenden Tiefsee, Oasen für komplexe Ökosysteme, besonders wenn sie die sogenannte photische Zone erreichen. Dabei handelt es sich um diejenige Schicht im Wasser, in die noch Lichtstrahlen dringen können und in der Photosynthese und als Folge Algen- und Sauerstoffbildung möglich ist.

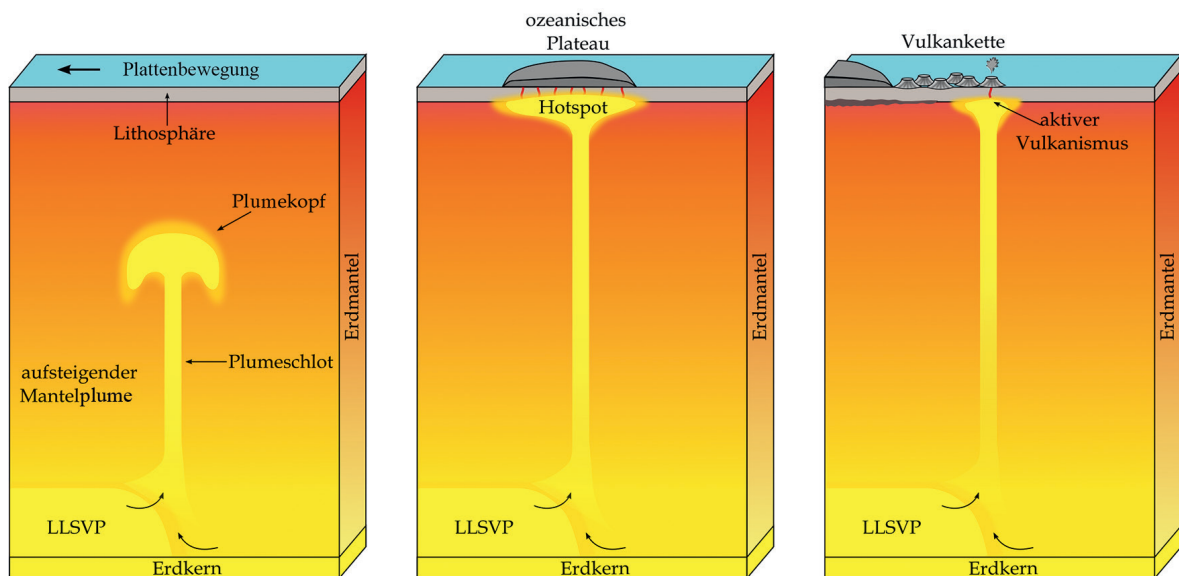


Abb. 1: Schematische Entwicklung eines Mantel-Plumes. Grafik: Homrighausen, 2018

### Das Mantel-Plume-Modell

Altersprogressive Vulkanketten werden durch die Bewegung der ozeanischen Kruste über eine relativ stationäre thermische Schmelzanomalie, einen Hotspot, erklärt. Diese Hotspots werden durch fokussiert-aufsteigendes Mantelmaterial, dem sogenannten Mantel-Plume, aus dem tiefen Erdmantel an einem Ort fixiert. Hotspots selbst wandern also nicht, vielmehr bewegen sich ozeanische Platten über solche „heißen Punkte“ hinweg.

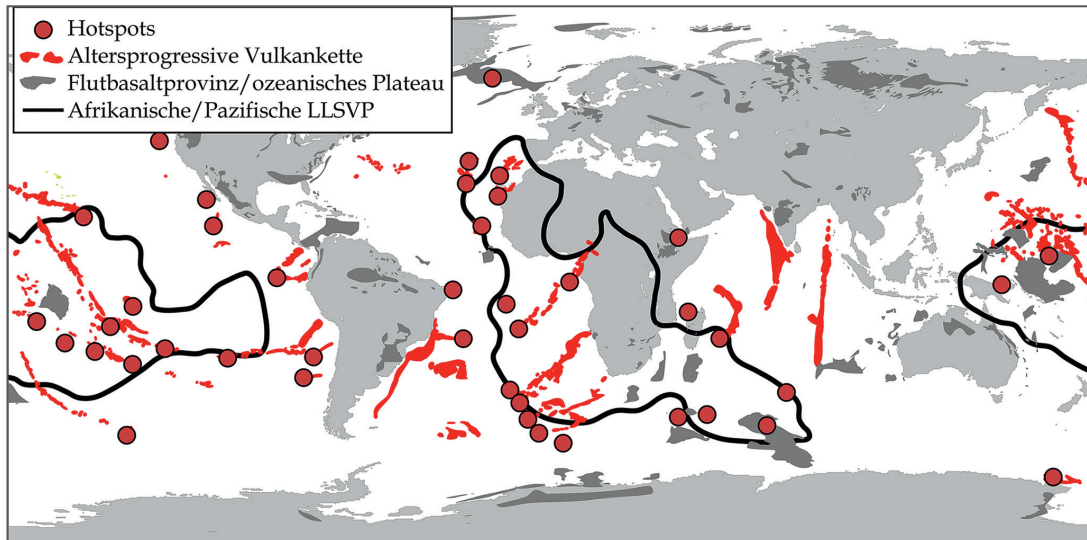
Dementsprechend werden Hotspots als der Oberflächen Ausdruck von Mantel-Plumes betrachtet, bei denen heißes Material von einer thermischen Grenzschicht, wie der Kern-Mantel-Grenze, innerhalb der Erde aufsteigt. Wenn das aufsteigende Material schließlich geringe Manteltiefen erreicht, führt Dekompression zu seiner Aufschmelzung und somit zu Vulkanismus. Durch die kontinuierliche Plattenbewegung wird der entstandene Vulkan vom Hotspot weg bewegt, der Vulkanismus erliegt und ein neuer Vulkan bildet sich über dem Hotspot. Dieser Prozess kann sich über mehrere tausend Kilometer über mehr als 100 Millionen Jahre wiederholen und diese altersprogressive Vulkanketten bilden.

Nach dem klassischen Modell hat der aufsteigende Mantel-Plume eine pilzartige Form. Basierend auf der Mantel-Plume-Form kann die Hotspot-Aktivität in zwei Phasen untergliedert werden. In der ersten Phase erreicht der große Plumekopf die Basis der Lithosphäre und formt binnen weniger Millionen Jahre ein ozeanisches Plateau oder eine Flutbasaltprovinz. Die zweite Phase ist durch den langlebigen Plumeschlot gekennzeichnet, der relativ stationär unter der Platte verbleibt und die altersprogressive Vulkankette bildet (s. Abb. 1).

### Einblicke in den Unteren Erdmantel

In den letzten Jahrzehnten wurde das Plume-Modell durch die Synthese von geochemischen und geophysikalischen Untersuchungen sowie von experimentellen Versuchen und rein rechnerischen Simulationen kontinuierlich weiterentwickelt, wobei das Grundprinzip, dass heißes Material aus dem Erdmantel aufsteigt, beibehalten und bestätigt werden konnte.

Die chemische Zusammensetzung von der aus Hotspots entströmenden Lava (Hotspot-Laven) ist global betrachtet sehr unterschiedlich. Sie kann aber von vulkanischen Gesteinen, die aus



**Abb. 2:** Übersichtskarte der ozeanischen Hotspots, altersprogressiver Vulkanketten, Flutbasaltprovinzen und ozeanischer Plateaus (Daten: Johansson et al., 2018) sowie die Umrisse der afrikanischen und pazifischen LLSVPs. Karte: Stephan Homrighausen, erstellt mit der Software GPlates ([www.gplates.org](http://www.gplates.org), vgl. Müller et al., 2018)

dem oberen Erdmantel entstammen, deutlich unterschieden werden. Auf der anderen Seite ist die geochemische Zusammensetzung der Vulkane entlang einzelner Hotspotspuren relativ homogen. Diese beständige geochemische Signatur weist darauf hin, dass die Hotspots kontinuierlich von einer Mantelquelle gespeist werden, die vom oberen Mantel isoliert ist.

Der geochemische Fingerabdruck vieler Hotspot-Laven zeigt aber auch eine gewisse Ähnlichkeit zur ozeanischen Kruste und zu kontinentalem Material. An Subduktionszonen wie den Anden wird über Millionen von Jahren kontinuierlich ozeanische Kruste und kontinentales Material in den Erdmantel hinein „recycelt“. Durch diesen Prozess wird das quasi „herunter geschobene“ (subduzierte) Material chemisch verändert, was in der Zusammensetzung der Hotspot-Laven beobachtet werden kann. Seismische Daten zeigen, dass ein Großteil der subduzierten Platten in den unteren Erdmantel abtaucht, sich dort ansammelt und dann durch Mantel-Plumes wieder an die Oberfläche gebracht werden kann.

Interessanterweise überlagert die überwiegende Anzahl der ozeanischen Hotspots (38 von 42 aus dem Hotspotkatalog von M. Jackson, Abb. 2) zwei gigantische seismische Anomalien am unteren Mantel, die als pazifische und afrikanische LLSVP (Large Low Shear Velocity Province) bekannt sind. Der Ursprung der LLSVPs ist rätselhaft, aber vieles deutet darauf hin, dass diese gigantischen Provinzen wahrscheinlich aus ursprünglichem Mantelmaterial aus der Entstehungszeit der Erde und recyceltem Krustenmaterial bestehen und eine potentielle Quelle für Mantel-Plumes darstellen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Mantel-Plumes und LLSVPs ist allgemein anerkannt, aber die Art und Weise ihrer Wechselwirkung sowie der Ursprung und die Zusammensetzung der LLSVPs ist weiterhin Gegenstand der Forschung.

## Referenzen

- French, S. W. & Romanowicz, B. (2015). Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots. *Nature*, 525, 95-99. doi:10.1038/nature14876
- Garnero, E. J., McNamara, A. K. & Shim, S.-H. (2016). Continent-sized anomalous zones with low seismic velocity at the base of Earth's mantle. *Nature Geoscience*, 9, 481-489. doi:10.1038/ngeo2733
- Hoernle, K., Rohde, J., Hauff, F., Garbe-Schonberg, D., Homrighausen, S., Werner, R. & Morgan, J. P. (2015). How and when plume zonation appeared during the 132 Myr evolution of the Tristan Hotspot. *Nature Communication*, 6:7799. doi:10.1038/ncomms8799
- Hofmann, A. W. (1997). Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*, 385, 219-229. doi:10.1038/385219a0
- Homrighausen, S. (2018). *Insights into the temporal and geochemical evolution of the Walvis Ridge-A connection between HIMU and EM I end members in the South Atlantic* (Dissertation, Geowissenschaften). Kiel: Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Homrighausen, S., Hoernle, K., Hauff, F., Wartho, J.-A. & Garbe-Schönberg, C. D. (2019). New age and geochemical data from the Walvis Ridge: The temporal and spatial diversity of South Atlantic intraplate volcanism and its possible origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 245, 16-34. doi:10.1016/j.gca.2018.09.002
- Johansson, L., Zahirovic, S. & Müller, R. D. (2018). The Interplay Between the Eruption and Weathering of Large Igneous Provinces and the Deep-Time Carbon Cycle. *Geophysical Research Letters*, 45(11), 5380-5389. doi:10.1029/2017GL076691
- Müller, R. D., Cannon, J., Qin, X., Watson, R. J., Gurnis, M., Williams, S., Pfaffelmoser, T., Seton, M., Russell, S. H. J. & Zahirovic, S. (2018). GPlates: Building a Virtual Earth Through Deep Time. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 2243-2261. doi:10.1029/2018GC007584
- Torsvik, T. H., Steinberger, B., Ashwal, L. D., Doubrovine, P. V. & Trønnes, R. G. (2016). Earth evolution and dynamics – a tribute to Kevin Burke. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(11), 1073-1087. doi:10.1139/cjes-2015-0228
- White, W. M. (2015). Isotopes, DUPAL, LLSVPs, and Anekantavada. *Chemical Geology*, 419, 10-28. doi:10.1016/j.chemgeo.2015.09.026
- Zindler, A. & Hart, S. R. (1986). Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14, 493-571. doi:10.1146/annurev.ea.14.050186.002425

## Marine Supervulkane und deren Auswirkungen in der Erdgeschichte

PD Dr. Jörg Geldmacher, Dr. Reinhard Werner, Dr. Folkmar Hauff  
(GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

Dr. Gabriele Uenzelmann-Neben

(Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung AWI)

**Millionen von Quadratkilometern im Meer sind von gigantischen Lavaschichten bedeckt. Sie sind das Resultat des Flutbasalt-Vulkanismus. Dabei entstand vulkanisches Gestein, welches auch zur Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre beitragen kann. Erdgeschichtlich führte dieser Vulkanismus jedoch immer wieder zum Massenaussterben von Arten.**

- 
- Flutbasalt-Vulkanismus ist selten und Folge außergewöhnlicher geologischer Prozesse.
  - Dieser Vulkanismus kann zu einem globalen Massenaussterben führen. So geschehen vor 56 Millionen Jahren als gigantische Mengen CO<sub>2</sub> freigesetzt wurden.
  - Innerhalb weniger tausend Jahre erwärmte sich die Erde um fünf bis acht Grad Celsius. Nur der derzeitige menschengemachte Temperatur-Anstieg läuft noch schneller ab.
  - Es dauerte damals 150.000 Jahre bis das CO<sub>2</sub> wieder aus der Atmosphäre verschwunden war.
- 

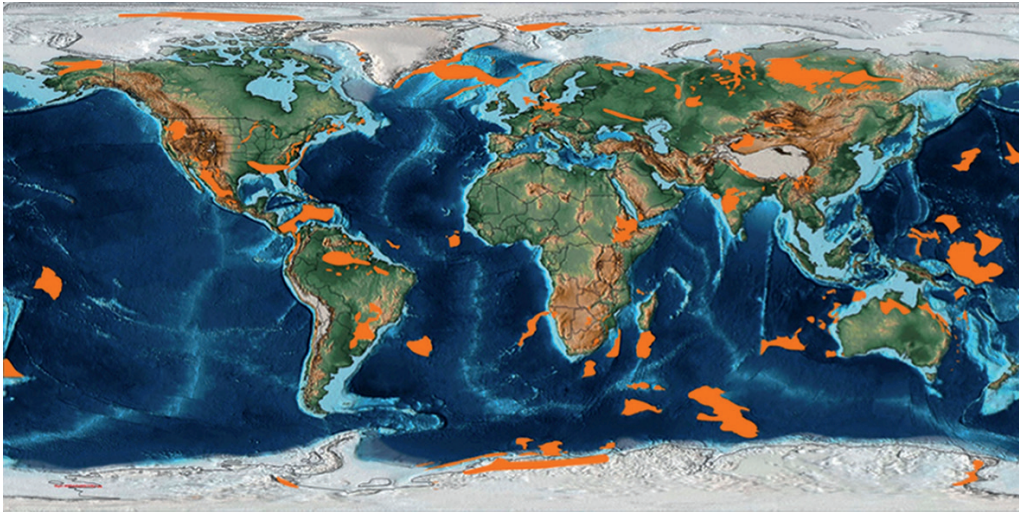
Im Laufe der Erdgeschichte kam es immer wieder zu besonders großräumigen vulkanischen Ausbrüchen. Diese dauerten mehrere Millionen Jahre an und türmten Lavagebirge auf, die viele Millionen Kubikkilometer groß wurden und von der Fachwelt als „Flutbasalt-Provinzen“ bezeichnet werden. Ereignete sich ein solcher Ausbruch im Ozean, spricht man hier auch von ozeanischen oder marinen Plateaus (Abb. 1). Diese sind weit weniger erforscht als die Flutbasalte auf dem Festland, aber mindestens ebenso bedeutend für das Verständnis des Systems Erde.

### Wie entstehen Flutbasaltprovinzen?

Die Entstehung aller Flutbasalt-Provinzen wird mit dem Aufstieg von heißem Material erklärt, das vermutlich aus der Grenzregion zwischen Erdkern und Erdmantel stammt. Obwohl der Erdmantel und das aufsteigende heiße Material aufgrund des sehr hohen Drucks nicht geschmolzen sind, kann das heiße Material den bis zu 2.900 Kilometer langen Weg bis zur unteren

Grenze der Lithosphäre – dabei handelt es sich um die äußere, starre Schicht der Erde, also die kontinentale bzw. die ozeanische Erdkruste und den oberen Erdmantel, durch langsames „Kriechen“ der einzelnen Mineralkörner in etwa 100 Millionen Jahren zurücklegen (Steinberger & Anretter, 2006). An der Basis der Lithosphäre herrscht ein geringerer Druck, sodass das immer noch heiße Gestein seinen Schmelzpunkt nun überschreitet und bis zu über 30 Prozent aufschmelzen kann. Selbst diese Teilmenge reicht aus, um weite Gebiete mit mehreren Kilometern dicker Lava zu bedecken.

Das größte Plateau im Ozean ist das Ontong-Java-Plateau im Westpazifik, das mit einer Fläche von 4,3 Millionen Quadratkilometern etwa 12 Mal so groß wie Deutschland ist (Ingle & Coffin, 2004). Man nimmt an, dass es einst mit den benachbarten Hikurangi- und Manihiki-Plateaus vereint war und somit eine Gesamtfläche von fast acht Millionen Quadratkilometern, also mehr als ein Prozent der gesamten



**Abb. 1:** Vorkommen von Flutbasalten auf den Kontinenten und ozeanischen Plateaus (Daten Johansson et. al., 2018). Karte: Stephan Homrighausen/GEOMAR, erstellt mit: PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates and the PaleoData Plotter Program

Erdoberfläche, bedeckt hat (Hoernle et. al., 2010). Selbst die Laven des vergleichsweise kleinen Manihiki-Plateaus (Abb. 2) würden ausreichen, um ganz Deutschland, Frankreich und die Benelux-Länder mit einer zehn Kilometer mächtigen Gesteinsschicht zu bedecken.

### Auswirkungen des Flutbasalt-Vulkanismus

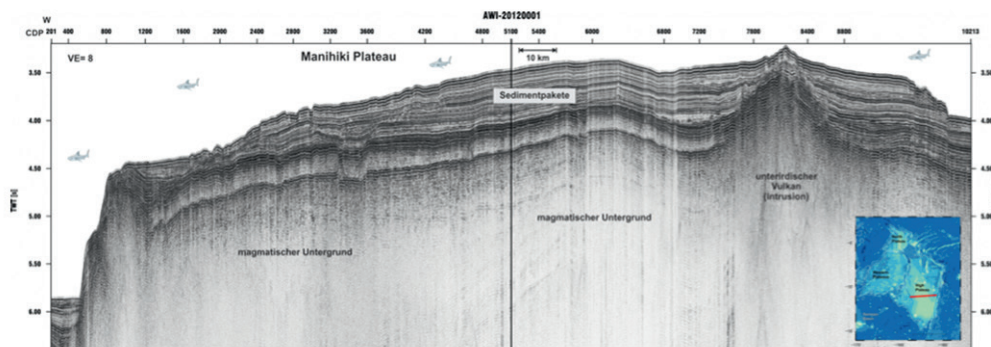
Diese seltenen, aber enormen Ereignisse sind Zeugen außergewöhnlicher geologischer Prozesse, die einen bedeutenden Teil des Energie- und Massentransfers vom Erdinneren an die Erdoberfläche ausmachten, und oft in direktem Zusammenhang mit dem Wachstum und Auseinanderbrechen von Kontinenten standen.

Entstehungszeiträume von mehreren Millionen Jahren erscheinen für Menschen lang, sind aber geologisch gesehen nur eine kurze Zeitspanne. Entsprechend stark waren die Auswirkungen des Flutbasalt-/Plateau-Vulkanismus auf die globale Umwelt.

Für die letzten 300 Millionen Jahre zeigt sich eine fast perfekte zeitliche Übereinstimmung

dieses Vulkanismus mit globalen Massenaussterbe-Ereignissen (Courtilot & Renne, 2003; Ernst & Youbi, 2017). Als wichtigster Faktor gilt dabei die Freisetzung von großen Mengen vulkanischer Gase einschließlich Schwefelsäure und Treibhausgasen wie  $\text{CO}_2$ , was zur massiven Störung der Atmosphärenchemie, des Sauerstoffaustausches zwischen Atmosphäre und Ozean oder der biologischen Produktivität führen kann (Wignall, 2005).

Vulkanisch-atmosphärische „Killer“-Mechanismen können dabei Ozeanversauerung, Vergiftung mit toxischen Metallen, saurer Regen, oder die Zerstörung der Ozonschicht sein. Mehrere globale „ozeanische anoxische Ereignisse“, bei denen die tiefen Wasserschichten der Weltozeane vollständig an Sauerstoff verarmten, werden mit Flutbasalt-/Plateau-Vulkanismus und der dadurch verursachten globalen Erwärmung in Verbindung gebracht (Bond & Grasby, 2017). Auch haben wachsende Plateaus Meeresströme blockieren bzw. ablenken können und damit ganze Meeresbecken von der Versorgung mit sauerstoffreichem Tiefenwasser abgeschnitten.



**Abb. 2:** Reflexionsseismisches Profil von etwa 100 Kilometer Länge über das Manihiki-Plateau von West nach Ost (rote Linie in Karte). Das Profil ist 8-fach überhöht. Man erkennt deutlich den magmatischen Untergrund und die darüber liegenden horizontalen Sedimentschichten. Im Osten auf der rechten Seite der Grafik erkennt man eine vulkanförmige Intrusion.

Grafik: Dr. Gabriele Uenzelmann-Neben

### Vulkanismus vor 56 Millionen Jahren setzte viel Kohlendioxid und Methan frei

Eine der dramatischsten Entwicklungen ereignete sich vor rund 56 Millionen Jahren, als enorme Mengen  $\text{CO}_2$  aus überwiegend vulkanischen Quellen in die Atmosphäre gelangten (Gutjahr et al., 2017). Der damalige Vulkanismus stand im Zusammenhang mit der Öffnung des nordatlantischen Ozeans. Man nimmt an, dass größere Mengen Magma in die kohlenstoffreichen Sedimente, die sich im noch schmalen, schlecht durchlüfteten Ozeanbecken ablagerten, eingedrungen sind und dadurch auch große Mengen des Super-Treibhausgases Methan freigesetzt wurden (Berndt et al., 2016; Galerne & Berndt, 2020). Innerhalb weniger tausend Jahre erwärmte sich die Erde um fünf bis acht Grad Celsius. Nur der derzeitige menschengemachte Temperatur-Anstieg läuft noch schneller ab: Nach neuesten Berechnungen könnten wir deshalb schon im Jahr 2160 (also in 140 Jahren oder nur fünf Generationen) klimatische Bedingungen wie zu dieser Zeit erreichen (Gingerich, 2019).

### Entfernung des überschüssigen Kohlendioxid dauerte viele Jahrtausende

Erschreckend ist, dass die Erde damals etwa 150.000 Jahre gebraucht hat, um den zusätzlichen Kohlenstoff resultierend aus dem Flutbasalt-Vulkanismus wieder aus der Atmosphäre

zu entfernen und die globalen Temperaturen wieder auf Werte fast wie vor diesem Ereignis zurückzuschrauben. Bei diesem Reinigungsprozess hilft das Vulkangestein selber kräftig mit: Wie der Name schon sagt, bestehen Flutbasaltprovinzen und Marine Plateaus überwiegend aus Basalt, einem relativ siliziumarmen Gestein, das 5 bis 10 Mal schneller verwittert als die überwiegend siliziumreicheren Gesteine der kontinentalen Kruste, wie z. B. Granit (Dessert et al., 2003).

### Meeresorganismen bauen Kohlendioxid ab

Die bei der Verwitterung freigesetzten Elemente, wie z. B. Calcium, werden als gelöste Ionen (geladene Teilchen) über Flüsse ins Meer transportiert und dort von kalkschalenbildenden Organismen (z. B. bestimmten Planktonarten) unter Einbindung von  $\text{CO}_2$  zu Karbonat verarbeitet, das sich schließlich als Sediment am Meeresboden absetzt und Kalkstein bildet. Je wärmer und feuchter es ist, desto schneller arbeitet die Verwitterung (positive Rückkopplung) und desto mehr Ionen stehen für die Kalksteinproduktion zur Verfügung. Durch diesen Prozess wird  $\text{CO}_2$  langfristig der Atmosphäre entzogen und als Sediment im Meeresboden gebunden. Die globale Temperatur sinkt wieder ab (negative Rückkopplung).

Bei ozeanischen Plateaus entsteht, wenn auch weniger effektiv, bei der submarinen Verwitterung das Karbonat direkt im Gestein (ohne Mit Hilfe durch Organismen). Solange die submarinen Lavadecken nach der Eruption noch warm genug waren und Seewasser in ihren Spalten zirkulierte, kam es auch zur chemischen Ausfällung von Karbonat direkt aus dem Seewasser (Alt & Teigel, 1999) und damit ebenfalls zu CO<sub>2</sub>-Entzug.

Der Flutbasalt/Plateau-Vulkanismus trug somit langfristig dazu bei, die durch ihn entstandene Störung des globalen Kohlenstoffkreislaufes wieder auszugleichen. Auch in der heutigen Zeit finden solche Verwitterungsprozesse statt. Wir sollten uns aber auch darüber im Klaren sein, dass dieser Ausgleichsprozess in menschlichen Zeithorizonten betrachtet sehr langsam abläuft und nicht dazu taugt, dem anthropogenen Klimawandel merklich entgegen zu wirken.

## Referenzen

- Alt, J. C. & Teigel, D. A. H. (1999). Uptake of carbon during alteration of oceanic crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(10), 1527-1535. doi:10.1016/S0016-7037(99)00123-4
- Berndt, C., Hensen, C., Mortera-Gutierrez, C., Sarkar, S., Geilert, S., Schmidt, M., ... Lizarralde, D. (2016). Rifting under steam – How rift magmatism triggers methane venting from sedimentary basins. *Geology*, 44(9), 767-770. doi:10.1130/G38049.1
- Bond, D. P. G. & Grasby, S. E. (2017). On the causes of mass extinctions. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 478, 3-29. doi:10.1016/j.palaeo.2016.11.005
- Courtillot, V. & Renne, P. R. (2003). On the ages of flood basalt events. Sur l'âge des trapps basaltiques. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(1), 113-140. doi:10.1016/S1631-0713(03)00006-3
- Dessert, C., Dupré, B., Gaillardet, J., François, L. M. & Allègre, C. J. (2003). Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chemical Geology*, 202(3-4), 257-273. doi:10.1016/j.chemgeo.2002.10.001
- Ernst, R. E. & Youbi, N. (2017). How large igneous provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 478, 30-52. doi:10.1016/j.palaeo.2017.03.014
- Galerne, C. & Berndt, C. (2020). Magmatismus in Sedimentbecken – der Ursache vergangener Umweltkatastrophen auf der Spur. In D. Spreen, J. Kandarr, P. Klinghammer & O. Jorzik (Hrsg.), *ESKP-Themen-spezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 109-112). Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.5.4
- Gingerich, P. (2019). Temporal scaling of carbon emission and accumulation rates: Modern anthropogenic emissions compared to estimates of PETM onset accumulation. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34(3), 329-335. doi:10.1029/2018PA003379
- Gutjahr, M., Ridgwell, A., Sexton, P. F., Anagnostou, E., Pearson, P. N., Pälike, H., Norris, R. D., Thomas, E. & Foster, G. L. (2017). Very large release of mostly volcanic carbon during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature*, 548, 573-577. doi:10.1038/nature23646
- Hoernle, K., Hauff, F., van den Boogard, P., Werner, R., Mortimer, N., Geldmacher, J., Garbe-Schönberg, D. & Davy, B. (2010). Age and geochemistry of volcanic rocks from the Hikurangi and Manihiki oceanic Plateaus. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(24), 7196-7219. doi:10.1016/j.gca.2010.09.030
- Ingle, S. & Coffin, M. F. (2004). Impact origin for the greater Ontong Java plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 218(1-2), 123-134. doi:10.1016/S0012-821X(03)00629-0
- Johansson, L., Zahirovic, S. & Müller R.D. (2018). The interplay between the eruption and weathering of large igneous provinces and the deep-time carbon cycle. *Geophysical Research Letters*, 45(11), 5380-5389. doi:10.1029/2017GL076691
- Steinberger, B. & Antretter, M. (2006). Conduit diameter and buoyant rising speed of mantle plumes: Implications for the motion of hotspots and shape of plume conduits. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(11):Q11018. doi:10.1029/2006GC001409
- Wignall, P. (2005). The link between large igneous province eruptions and mass extinctions. *Elements*, 1(5), 293-297. doi:10.2113/gselements.1.5.293

## 5. Geothermie

### Einleitung

Geothermie ist eine der nach wie vor unterschätzten Quellen für eine nachhaltige Energieversorgung. Forscher\*innen und Energiewirtschaft arbeiten intensiv daran, heiße Regionen in der Tiefe der Erdkruste noch besser aufzuspüren und auch bislang ungenutzte Bereiche in der Nähe von Magmenkörpern für die Energieversorgung zu erschließen. Besonders in vulkanisch aktiven Regionen wie Island oder Indonesien sind die Potenziale enorm. Um die Wirtschaftlichkeit und Effizienz von Geothermie weiter zu erhöhen, sind neue Erkundungsmethoden nötig, die auch den Einsatz von maschinellem Lernen sinnvoll machen.

### Themen-Überblick

---

- ▶ GEMex: Erkundung und Erschließung unkonventioneller geothermischer Ressourcen
- ▶ Superkritische Geothermal-Systeme: Energienutzung in vulkanischen Gebieten
- ▶ Geothermie-Ressourcen unter vulkanischen Seen mit neuen Methoden erkunden

## GEMex: Erkundung und Erschließung unkonventioneller geothermischer Ressourcen in Mexiko

Dr. Egbert Jolie, Prof. Dr. David Bruhn (Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

**Superheiße Geothermalsysteme mit Temperaturen über 350 °C können eine deutlich höhere Stromproduktion mit weniger Bohrungen ermöglichen. Aber sie erfordern auch neuartige und innovative Explorations- und Nutzungskonzepte, die an die besonderen Bedingungen in der Tiefe angepasst sein müssen.**

- Superheiße geothermische Reservoirs könnten zu interessanten alternativen Energiequellen werden.
- Forschung und Wirtschaft arbeiten an Konzepten und Technologien, um diese Energie nachhaltig zu erschließen.
- Dabei stellen sich neuartige Herausforderungen, da man auf überkritische Reservoirbedingungen, aggressive Fluide und sehr hohe Temperaturen trifft.
- Ansätze zur Integration komplexer Datensätze und deren Interpretation wurden getestet.

Die Entwicklung von geothermischen Hochtemperaturfeldern mit überkritischen Bedingungen wird in verschiedenen Teilen der Welt zum neuen „heißen“ Thema, da dadurch eine deutlich höhere Stromproduktion mit weniger Bohrungen möglich erscheint.

Zu diesen „unkonventionellen“ Ressourcen gehören beispielsweise gering-durchlässige Reservoirs mit sehr hohen Temperaturen (hot engineered geothermal systems, hot-EGS) sowie geothermale Systeme, in denen Fluid-Temperaturen von mehr als 350 °C erreicht werden (superhot geothermal systems, SHGS). Beide Reservoir-Typen ziehen die Aufmerksamkeit von Wissenschaft und Industrie auf sich, stellen jedoch unterschiedliche Herausforderungen dar.

In hot-EGS werden Stimulationsmethoden benötigt, um den Fluidfluss zu verbessern oder überhaupt erst zu ermöglichen, während in superheißen Geothermalsystemen (SHGS) besondere Anforderungen an Bohrverfahren und Materialien gestellt werden, um widerstandsfähig gegenüber

hohen Temperaturen und aggressiven Fluiden zu sein, die zu schneller Korrosion führen können.

Zu den aktuell laufenden bzw. kürzlich abgeschlossenen großen Forschungsprojekten gehören beispielsweise IDDP (Island), JBBP (Japan), GEMex (Mexiko), Geothermal: The Next Generation (Neuseeland), DEEPEGS, oder auch DESCRAMBLE. Superheiße Geothermalsysteme mit Temperaturen über 350 °C erfordern neuartige und innovative Explorations- und Nutzungskonzepte, die an die besonderen Bedingungen in der Tiefe angepasst sein müssen.

Daher sind erhebliche Forschungsanstrengungen erforderlich, um erstens die Bedingungen in der Tiefe (z. B. Bruchzonen, Spannungsfeld, Gesteinseigenschaften, Chemie der Fluide, Risiken) ausreichend zu verstehen und zweitens neue Konzepte für eine erfolgreiche Nutzung solcher Ressourcen zu konzipieren, die sich von den derzeit für konventionelle hydrothermale Systeme verwendeten Methoden unterscheiden werden.



**Abb. 1:** Bohrung im Los Humeros Geothermiefeld, Mexiko. Die Förderbohrung H49 erreicht eine Tiefe von über 2000 m und wird zusammen mit 30 anderen Bohrungen zur Stromerzeugung genutzt. Das Los Humeros Geothermiekraftwerk hat eine installierte Leistung von ~95 MWe (Megawatt elektrisch).  
Foto: Egbert Jolie

### Ein genaues Bild des Untergrunds gewinnen

Im GEMex ging es darum, geologische Tiefenstrukturen möglichst detailliert zu charakterisieren und darzustellen. Um sich ein genaues Bild von den geologischen Rahmenbedingungen zu machen, gibt es verschiedene Methoden, die schlussendlich ein integriertes Gesamtbild ergeben.

Zunächst ist es wichtig, die Oberflächenstrukturen und die Geologie umfassend zu verstehen. Altersdatierungen von Gesteinen liefern zudem Informationen zu den vulkanischen Prozessen in der Vergangenheit, die wiederum die Entwicklung geothermischer Reservoirs rekonstruieren lassen. Geologische Informationen werden durch geochemische Studien ergänzt, um erste direkte Daten aus dem tiefen Untergrund zu erhalten. In dem Rahmen werden beispielsweise Fumarolen und – sofern vorhanden – heiße Quellen beprobt und analysiert. Messungen von Bodengasen werden hierzu ebenfalls durchgeführt. Mit diesen Ergebnissen können permeable Strukturen mit heißen Fluiden nicht nur identifiziert, sondern auch charakterisiert werden.

Eine weitere wichtige Säule in der Exploration bilden geophysikalische Erkundungsverfahren. So wird der spezifische Widerstand des Untergrundes durch Magnetotellurik und Transienten-Elektromagnetik abgebildet. Dieser liefert sehr genaue Informationen zum Aufbau geothermischer Reservoirs. Hinzu kommen andere geophysikalische Verfahren wie die seismischen

Messungen, Schwerefeld- und Geomagnetikmessungen, GPS-Methoden und Radarinterferometrie (InSAR), die zum Gesamtbild beitragen.

In Kombination mit strukturgeologischen Kartierungen, Altersdatierungen und hydrogeologischen Untersuchungen der verschiedenen Grundwasser- bzw. Tiefenwasservorkommen ergibt sich ein detailliertes Bild der für die Erschließung und Nutzung wesentlichen Strukturen im Untergrund. Alle diese Methoden wurden von unterschiedlichen Partnern aus Europa und Mexiko an zwei Standorten in Mexiko (Acoculco und Los Humeros) angewendet und teilweise weiterentwickelt.

### Bruchverhalten von Gestein

Generell wird in hydrothermalen Reservoirs ein durchlässiges Gestein (z. B. mit Brüchen) benötigt, damit Fluide zirkulieren können und ihre Energie genutzt werden kann. Bei SHGS steht insbesondere die spröde-duktilen Übergangszone in der Nähe von Magmenkörpern im Fokus, da diese den Übergang zu Bereichen mit besonders hohen Temperaturen markiert.

Als spröde bezeichnet man Gesteine, die brechen, während solche, die sich verformen, als duktil bezeichnet werden. Abhängig ist das sowohl von der Gesteinsart wie auch von den Bedingungen, die im Untergrund herrschen, vor allem von Druck und Temperatur. Bisher gibt es nur sehr wenig praktische Erfahrungen, wie man sich der Übergangszone vom spröden zum duktilen



Abb. 2: Wissenschaftler beim Feldeinsatz in Mexiko. Foto: Egbert Jolie

Gesteinsverhalten (Brittle-Ductile-Transition) durch Bohrungen nähert und geeignete Konzepte zur Energiegewinnung entwickelt.

### Erschließung superheißer Ressourcen

Bislang werden geothermische Ressourcen weltweit häufig dort genutzt, wo ihre Spuren bereits an der Erdoberfläche sichtbar sind und hohe Temperaturen, die für die Erzeugung von Strom notwendig sind, schon in geringer Tiefe von ein bis drei Kilometern erreicht werden. Diese Systeme befinden sich in Regionen mit vulkanischer Aktivität, wie zum Beispiel in Island, Italien, Mexiko, Japan oder Neuseeland. Während die Erkundung, Erschließung und Nutzung von „konventionellen“ geothermischen Ressourcen durch etablierte Methoden und Technologien sichergestellt ist, verbleibt noch immer ein enormer Anteil der Ressourcen ungenutzt, da konventionelle Technologien nicht überall eingesetzt werden können.

Die Erschließung solch superheißer geothermischer Ressourcen erfordert auch Fortschritte in der Bohrtechnologie, der Integrität von Bohrlöchern, sowie der verfügbaren Bandbreite an geeigneten Materialien, die unter diesen schwierigen Bedingungen verwendet werden können. Im Rahmen von GEMex wurden verschiedene

Stähle und Titankomponenten mit einem an einer superheißen Bohrung in Island entwickelten Testverfahren für zwei Wochen in einem tiefen, sehr heißen Bohrloch in Mexiko den aggressiven Bedingungen ausgesetzt und anschließend in Island von Projektpartnern untersucht. Ziel dabei war, möglichst langlebige Materialien sowohl für unter- wie auch obertägige Anlagen zu finden, da diese für die nachhaltige Nutzung von entscheidender Bedeutung sind.

### Zukünftiger Forschungsbedarf

Mit dem mexikanisch-europäischen Forschungsprojekt GEMex wurde seit 2016 intensiv daran geforscht, ein besseres Verständnis für tiefe geothermische Ressourcen mit hohen Temperaturen zu entwickeln. Dies gestaltete sich als ein komplexes Unterfangen, da verschiedene Disziplinen mit verschiedenen „wissenschaftlichen Sprachen“ erst einmal zueinander finden mussten, um einen integrierten und multidisziplinären Ansatz entwickeln zu können, der zuverlässige Informationen zum Reservoir liefert.

Dieses Zusammenführen von Informationen hat dadurch funktioniert, dass diverse Datensätze in verschiedenen Software-Plattformen miteinander kombiniert und interpretiert wurden. Dieser Prozess ist noch immer mit viel Handarbeit verbunden. Zukünftig könnte hier jedoch Machine-Learning Einzug halten, so dass komplexe, Multi-parameter-Datensätze einheitlich und konsistent prozessiert und interpretiert werden können, um ein verifiziertes konzeptionelles Modell vom Untergrund zu entwickeln. Nur so wird es gelingen, die gewonnenen Erkenntnisse in ein konkretes Tiefbohrprojekt umzusetzen. Darüber hinaus werden Konzepte zur Risikominderung und zum Risikomanagement benötigt, die an höhere Temperaturen und Drücke angepasst sind.

### Forschungssteckbrief:

Kooperations- und Forschungspartner: GEMex ist eine Forschungs-kooperation zwischen einem europäischen Konsortium von 24 Partnern (finanziert durch das Rahmenprogramm Horizont 2020 – Forschung und Innovation der EU) aus verschiedenen Ländern und einem mexikanischen Konsortium von acht mexikanischen Partnern (finanziert durch CONACyT). Um an Ansätzen für diese spezifischen Herausforderungen zu arbeiten, wurden von den europäischen und mexikanischen Partnern zwei Standorte in Mexiko ausgewählt – Aco-culco (hot-EGS) und Los Humeros (SHGS).

### Referenzen

- Bruhn, D., Jolie, E., Kieling, K., Bonté, E. T. D., Liotta, D., Hersir, G. P., ... Huenges, E. (2019). GEMex-cooperation in geothermal energy research Europe-Mexico for development of enhanced geothermal systems and superhot geothermal systems. In *Proceedings, European Geothermal Congress 2019*. Den Haag, Niederlande.
- Jolie, E., Bruhn, D., Hernández, A. L., Liotta, D., Garduño-Monroy, V. H., Lelli, M., ... & Deb, P. (2018). GEMex – A Mexican-European Research Cooperation on Development of Superhot and Engineered Geothermal Systems. In *Proceedings, 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (SGP-TR-213)*. Stanford, USA.
- Jolie, E., Liotta, D., Garduño-Monroy, V. H., Gutiérrez-Negrin, L. C., Galván, C. A., Gylfi Páll Hersir, G. P., ... The GEMex Team. (2020). The GEMex project: Developing Los Humeros (Mexico) as a Superhot Geothermal Site. In *Proceedings World Geothermal Congress 2020* (26. April bis 2. Mai 2020 in Reykjavík). Reykjavík, Irland.

## Superkritische Geothermal-Systeme: Energienutzung in vulkanischen Gebieten

Dr. Francesco Parisio, Prof. Dr. Thomas Nagel (Institut für Geotechnik, Technische Universität Bergakademie Freiberg TUBAF, TUBAF-UFZ Zentrum für Umweltgeowissenschaften)

**Die Energieausbeute aus einer geothermischen Bohrung würde sich vervielfachen, wenn es gelänge, geothermische Reservoirs mit Flüssigkeiten jenseits des kritischen Punktes zu erschließen. Der wirtschaftliche Vorteil dieser super- oder überkritischen Geothermie könnte enorm sein. Doch noch müssen große Hürden genommen werden, um diese besonders umweltschonende Technologie nutzen zu können.**

- Seit den späten 1980er Jahren findet die Erschließung von superkritischen Geothermalsystemen in vulkanischen Gebieten auf der ganzen Welt statt.
- Im isländischen Tiefbohrprojekt „Iceland Deep Drilling Projekt“ wurde 2017 mit der tiefsten geothermischen Bohrung der Welt bis in 4,5 Kilometer Tiefe ein Meilenstein erreicht.
- Die Energieausbeute bei diesen Bohrungen ist hoch. Viele Kraftwerke in Island können rund 4 bis 10 Megawatt Elektrizität pro Bohrloch produzieren.

Ein sogenanntes superkritisches Geothermalsystem (SCGS – *Supercritical Geothermal System*) ist eine Gesteinsformation unter der Erdoberfläche, in der Druck und Temperatur der in den Gesteinsporen vorhandenen Flüssigkeit über dem kritischen Punkt liegen, einem Punkt jenseits dessen eine Unterscheidung zwischen flüssiger und gasförmiger Phase eines Stoffes nicht mehr möglich ist. In einem Druck-Temperatur-Diagramm definiert die Phasen-Gleichgewichtskurve für eine Flüssigkeit die Trennung zwischen flüssigem und gasförmigem Zustand: Jenseits des kritischen Punktes jedoch verschwindet die Unterscheidung zwischen den Phasen und das Fluid ist homogen (Landau & Lifshitz, 1980). Für Wasser liegt dieser kritische Punkt bei einem Druck von 220,64 bar und einer Temperatur von 373,95 °C, während er für Kohlendioxid bei 73,77 bar und 30,98 °C liegt.

In der Regel werden als superkritische Geothermalsysteme solche Vorkommen bezeichnet, in denen Wasser als Formationsfluid zirkuliert. In

einem technischen Sinne können aber auch geothermische Systeme superkritisch sein, in denen Kohlendioxid unter den entsprechenden Bedingungen künstlich in Umlauf gebracht wird (Brown, 2000). Im Folgenden konzentrieren wir uns ausschließlich auf superkritische Geothermalsysteme, die auf Wasser basieren. Hierbei bilden sich konvektive Zellen aus strömendem Fluid im Untergrund v. a. in der Nähe magmatischer Intrusionen, also dort wo heißes Magma in Gesteinskörper eindringt. Diese kühlen ab und übertragen die Wärme an die umgebenden Porenfluide (Norton & Knight, 1977), die dadurch ihrerseits den kritischen Punkt überschreiten können.

In den späten 1980er Jahren wurden superkritische Fluide im geothermischen Feld von Nesjavellir in Island beobachtet, einem Standort, der für die Versorgung der Stadt Reykjavik mit Fernwärme ausgebaut wurde (Staingrimsson et al., 1990). Seit dieser Zeit ist die Erschließung von superkritischen Geothermalsystemen stark mit

geothermischen Hochtemperaturfeldern auf der ganzen Welt verbunden, die in vulkanischen Gebieten zu finden sind. Dazu zählen: Larderello und Campi Flegrei in Italien, die Krafla-, Reykjanes- und Hengill-Felder in Island, Kakkonda in Japan, The Geysers und Salton Sea in den USA, das Los-Humeros-Feld in Mexiko, Menegai in Kenia und das Taupo-Vulkangebiet in Neuseeland (Reinsch et al., 2017).

Zu den wegweisenden Projekten gehören weltweit das Japan-Beyond-Brittle-Projekt, das „Iceland Deep Drilling Project“ und das „Hotter and Deeper“-Projekt in Neuseeland. Große internationale Kooperationsprojekte wie GEMex und DESCRAMBLE bilden das große Interesse an Tiefbohrprojekten ab.

All diese Projekte haben nicht nur unser Wissen erweitert, sie haben auch technologische Grenzen überwunden. Im isländischen Tiefbohrprojekt „Iceland Deep Drilling Projekt“ wurde am 25. Januar 2017 mit der tiefsten geothermischen Bohrung der Welt bis in 4,5 Kilometer Tiefe vorgestoßen und damit ein außerordentlicher Meilenstein erreicht (Friðleifsson et al., 2020). Druck und Temperatur der Flüssigkeit überschritten den kritischen Punkt, wobei die Temperatur des Fluids auf 535 °C geschätzt wird. Aber was genau macht superkritische Geothermalsysteme so attraktiv? Wo stehen wir in Sachen Machbarkeit und welche Risiken gehen mit der Nutzung solcher Systeme einher? Im Folgenden versuchen wir, einige Antworten auf diese Fragen zu geben.

### Vorteile superkritischer Geothermalsysteme

In geothermischen Hochtemperatur-Kraftwerken werden heiße und unter Druck stehende Fluide aus dem tiefen Untergrund empor gefördert, um mit Hilfe von Dampfturbinen oder anderen, an Generatoren angeschlossenen Wärmekraftmaschinen Strom zu erzeugen. Wie viel elektrische Energie aus einem solchen Kraftwerk gewonnen werden kann, hängt in erster Linie von zwei Faktoren ab: der Menge pro Zeit, mit der das geothermische Fluid aus der Tiefenlagerstätte gefördert wird, sowie dessen Energiegehalt.

Letzterer hängt wiederum vom Druck und der Temperatur des Fluids ab und wird ausgedrückt durch eine thermodynamische Größe, die Enthalpie (Wärmeinhalt, gemessen in Joule) genannt wird.

Fluide über dem kritischen Punkt haben bezogen auf ihre Masse eine deutlich höhere Enthalpie und können so potenziell mehr Strom erzeugen. Viele Kraftwerke in Island können rund 4 bis 10 Megawatt Elektrizität pro Bohrloch produzieren. Dabei nutzen sie Fluide, die eine Temperatur von bis zu 340 °C aufweisen. Wenn während der Nutzung eines superkritischen Geothermalsystems entlang des Bohrloches überhitzter Dampf direkt aus superkritischen Formationsfluiden durch adiabatische Expansion – d. h. unter möglichst vollständiger Nutzung der Wärme – produziert würde, dann wird geschätzt, dass ein solches System auf 50 Megawatt pro Bohrloch käme (Friðleifsson et al., 2014). Dies entspräche einer Verzehnfachung der Stromerzeugung.

Die Nutzung superkritischer Geothermalsysteme kann einen enormen wirtschaftlichen Vorteil bergen, soviel ist klar. Doch das Augenmerk lediglich auf die Steigerung der Energieausbeute zu legen, erzählt nicht die ganze Geschichte. Superkritische Geothermalsysteme können im Vergleich zu traditionellen Hochtemperaturbohrungen eine viel geringere Umweltbelastung pro Megawatt produzierter Elektrizität mit sich bringen (Elders et al., 2014). Sie sind somit eine sauberere und leistungsfähigere potenzielle Quelle für erneuerbare Energie.

In einer klassischen geothermischen Lagerstätte wird das Fluid aus Grundwasserleitern gefördert. Langfristig verursacht die Energiegewinnung aus klassischen Lagerstätten Druckverluste und die förderbare Fluidmenge im Reservoir reduziert sich mit der Zeit, da meist weniger Fluid nachströmt als gefördert wird. Das führt letztlich zu Verlusten in der Produktivität und begrenzt die Förderdauer auf absehbare Zeit. Um geothermische Anlagen trotz der anfänglich hohen Investitionskosten wirtschaftlich attraktiv halten zu können, muss eine ausreichende Lebensdauer für einen entsprechenden Return-on-Investment

(ROI, Kapitalrendite) gewährleistet sein. Vor diesem Hintergrund ist es oftmals sinnvoll, abgekühlte Fluide erneut in den Grundwasserleiter zu injizieren, um das Gleichgewicht wiederherzustellen (Majer & Peterson, 2007). Werden in vulkanischen Gebieten die tieferen Bereiche eines Reservoirs – d. h. drei Kilometer und tiefer – genutzt, also dort, wo superkritische Fluide vorhanden sein können, kann das zu einer längeren Lebensdauer geothermischer Reservoirs beitragen. Denn dadurch wird eine Erholung der weniger tief liegenden Vorkommen ermöglicht.

### Wissenschaftliche und technologische Herausforderungen

Die großen Vorzüge superkritischer Geothermalsysteme haben dazu geführt, dass diese inzwischen viel Aufmerksamkeit von Wissenschaftler\*innen und Ingenieur\*innen auf sich ziehen. Jedoch ist weder ihre industrielle Reife noch unser Verständnis ausreichend weit gediegen, um eine weite Verbreitung dieser Technologie zu ermöglichen.

Viele der großen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Nutzung superkritischer Geothermalsysteme sind den vorherrschenden hohen Temperaturen geschuldet. Geothermische Ressourcen im Untergrund müssen zunächst erst einmal genau lokalisiert werden. Dies ist bereits eine komplexe Aufgabe. Wenn Daten zu superkritischen Geothermalsystemen in den vulkanischen Gebieten gesammelt werden müssen, dann stellen die hohen Drücke und Temperaturen, die in großer Tiefe herrschen, bestehende Erkundungsmethoden vor große Herausforderungen. Folglich muss die Entscheidung darüber, auf welche Bereiche Bohrungen im Untergrund genau abzielen, oft auf geophysikalischen Methoden (Agostinetti et al., 2017) beruhen, d. h. seismischen und magnetischen Untersuchungen. Computer-Simulationen (Scott et al., 2015) stützen diese Untersuchungen und sind eine zusätzliche Hilfe bei der Lokalisierung superkritischer Fluide in der Tiefe. Die vielleicht wertvollsten Informationen stammen in der Regel aus Erfahrungen und Wissen, welches man bei Bohrungen im gleichen Gebiet an bereits aktiv

genutzten geothermischen Feldern gesammelt hat. So wurde das Bohrziel des Iceland Drilling Projekts (IDDP-2) durch die Vertiefung eines bereits bestehenden Bohrloches in einem schon bekannten Reservoir auf der dortigen Reykjanes-Halbinsel erreicht (Friðleifsson et al., 2020).

Ist ein Bohrziel einmal bestimmt, dann bleiben Bohrungen in solche superkritischen Geothermalsystemen eine anspruchsvolle Aufgabe. Es braucht erfahrene Geräte-Betreiber, die sich mit dem Bohren in großer Tiefe von vulkanischen Gebieten auskennen (Friðleifsson et al., 2020) – also Tiefen, in denen das Zusammenspiel von Druck, Temperatur und hochkorrosiven Flüssigkeiten die Leistung selbst modernster Bohrgeräte auf eine enorme Probe stellt. Säurehaltige Flüssigkeiten greifen jede Art von Metallen an und lassen diese korrodieren. Dabei handelt es sich um ein Problem, das im gesamten Lebenszyklus einiger geothermischer Felder auftritt (Elders et al., 2014). In Geothermalsystemen mit hohen Temperaturen wird dieses Problem durch die mit der Temperatur zunehmende Neigung zur Reaktivität der im Thermalwasser gelösten Stoffe noch verschärft.

Sobald ein Bohrloch fertiggestellt ist, müssen die heißen Fluide gefördert werden, um letztendlich Energie aus dem tiefen Reservoir zu gewinnen. Der Erfolg der Gewinnung dieser Fluide hängt stark von den strukturellen und dynamischen Eigenschaften der Porenräume und der vorhandenen Klüfte im Gestein ab, insbesondere von deren Volumen und Vernetzung untereinander. Obwohl das Verhalten von Klüften und Gesteinsporen im Hochtemperaturumfeld immer noch nicht ausreichend verstanden ist, sind vermutlich selbst unter superkritischen Bedingungen Gesteinsklüfte für die Zirkulation von Fluiden hinreichend durchlässig (Watanabe et al., 2017). Gleichzeitig ist das Gestein vermutlich so brüchig und spröde, dass es eine ausreichende Dichte an Klüften geben kann (Parisio et al., 2019b). Diese beiden Ergebnisse werden durch Erkenntnisse gestützt, die während der IDDP-2-Bohrung in Island (Friðleifsson et al., 2020) gesammelt wurden: Alle Fluide entwichen aus einem Bohrloch, was darauf hindeutet, dass es

sich um eine stark zerklüftete und durchlässige Gesteinsmasse handelte.

Wenn eine Gesteinsmasse mit geringer Durchlässigkeit in traditionellen geothermischen Systemen angetroffen wird, wird häufig eine hydraulische Stimulation durchgeführt. Hierbei wird Fluid unter hohem Druck in das Bohrloch gepumpt, wodurch bestehende Rissysteme geöffnet werden können oder neue Risse im Gestein entstehen. Dieses Vorgehen dient dem Zweck, das System so zu verbessern, dass es eine für den Betrieb ausreichende Fluidzirkulation erlaubt. Es ist bei Weitem noch nicht sicher, ob oder wie solche Methoden in superkritischen geothermischen Systemen angewendet werden können. Aber dieses Wissen könnte sich für die Nutzung als entscheidend erweisen.

Interessanterweise gibt es inzwischen Hinweise darauf, dass man möglicherweise eine hydraulische Stimulation anwenden könnte, um die Durchlässigkeit in SCGS zu erhöhen (Watanabe et al., 2019). Diese Beobachtungen haben zum Projekt HIGHER und einer Zusammenarbeit zwischen den Autoren dieses Artikels und einer Forschungsgruppe der japanischen Tohoku-Universität geführt. Ziel des Projektes ist es zu untersuchen, ob eine solche hydraulische Stimulation in SCGS möglich ist.

### Risiken, die auftreten können

Die Nutzung superkritischer geothermischer Systeme ist prinzipiell nicht ohne Risiko. Einige dieser Risiken sind typisch für vulkanische Umgebungen. Dazu zählen zum Beispiel natürliche oder induzierte seismische und eruptive Risiken sowie andere, die mit Umweltauswirkungen verbunden sind. Der Zusammenhang zwischen geothermischer Nutzung und vulkanischen Eruptionen ist ein noch nicht hinreichend untersuchtes Forschungsgebiet. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass es in der Tat äußerst selten vorkommt, dass eine Eruption durch den aktiven Betrieb geothermischer Kraftwerke in den betreffenden Gebieten ausgelöst worden ist.

Auf Island wurde jedoch eine kleine magmatische Eruption in Verbindung mit einem geothermischen Bohrloch dokumentiert (Larsen et al., 1979), obwohl sie nicht durch eine geothermische Nutzung verursacht wurde. Ein weiteres Beispiel ist der Ausbruch des indonesischen Schlammvulkans Lusi, der im Jahr 2006 begann, und für die Vertreibung von 39.700 Menschen verantwortlich ist. Er verursachte bisher einen geschätzten Schaden von über 2,7 Milliarden US-Dollar. Der Ursprung der Katastrophe war Gegenstand einer intensiven wissenschaftlichen Debatte. Einige Forschende klassifizierten die Eruption als Naturereignis (Lupi et al., 2013). Andere Forschende schrieben die Verantwortung Gasbohrungen in der näheren Umgebung zu (Tingay et al., 2015).

Hydrothermale Explosionen sind bei SCGS unwahrscheinlich: Meist werden sie durch eine schnelle spinodale Entmischung verursacht, also die schlagartige Aufteilung eines Stoffes in unterschiedliche Phasen. Diese sind jedoch jenseits des kritischen Punktes physikalisch unmöglich. Abgesehen davon finden hydrothermale Explosionen meist in geringerer Tiefe statt (Bixley & Browne, 1988), da das Gewicht der darüberliegenden Gesteinsmasse wie eine Schutzkappe gegen potentielle Explosionen wirkt. Dennoch sollten die Risiken der Entwicklung von SCGS in sehr aktiven vulkanischen Gebieten, in denen eruptive Ereignisse mit großer Häufigkeit stattfinden, sorgfältig evaluiert werden.

Konkretere Risiken sind mit der Möglichkeit menschengemachter Erdbeben während geothermischer Operationen verbunden (Trugman et al., 2016). Sie können im Zusammenhang mit vielen Technologien vorkommen, in denen Flüssigkeiten in den Untergrund eingebracht oder an die Erdoberfläche transportiert werden.

Diese sogenannte induzierte und ausgelöste Seismizität in geothermischen Reservoiren ist eine Folge zweier Prozesse: einerseits von Druckänderungen aufgrund der erzwungenen Zirkulation von Fluiden durch den Untergrund und andererseits durch die Abkühlung des Gesteins,

wenn die gekühlte Flüssigkeit wieder zurückinjiziert wird, nachdem ihre Wärme durch das Kraftwerk gewonnen wurde.

Induzierte Erdbeben können während des Bohrens (Friðleifsson et al., 2020), der Stimulation (Ellsworth et al., 2019) und/oder der langfristigen Ausbeutung der Lagerstätte auftreten (Parisio et al., 2019a). Die Auswirkungen für SCGS sind jedoch immer noch nicht in vollem Umfang bekannt, da die derzeitigen Erfahrungen vor allem auf IDDP-2-Bohrungen fußen, bei denen die Häufigkeit von Erdbeben kleiner Stärke während des Bohrens zunahm (Friðleifsson et al., 2020).

Die Rückinjektion kalter Flüssigkeiten, um Produktivitätsverluste auszugleichen, führt bekanntermaßen zu mehr Seismizität (Bentz et al., 2019). In diesem Zusammenhang ist bei SCGS der Abkühlungsanstieg aufgrund der Hochtemperaturumgebung stärker ausgeprägt und erhöht das Risiko, Erdbeben auszulösen (Parisio et al., 2019a). Induzierte Seismizität birgt dementsprechend auch wirtschaftliche Risiken, die während der gesamten Lebensdauer eines geothermischen Feldes bestehen: die Erhöhung der Frequenz und des Ausmaßes von induzierten Erdbeben könnte die geothermischen Operationen aufgrund fehlender öffentlicher Akzeptanz gefährden und schließlich ganz zu deren Abbruch führen.

Andere Risiken stehen damit im Zusammenhang, dass die SCGS immer in der Nähe vulkanischer Systeme liegen, sodass auch eine direkte Bohrung in das Magma nicht ausgeschlossen werden kann. Der IDDP-1-Brunnen in Krafla auf Island ist in zwei Kilometern Tiefe auf eine magmatische Tasche gestoßen und die Bohrungen mussten kurz danach gestoppt werden (Elders et al., 2014). Ganz allgemein ist das Vorantreiben der Technologie in einer unmittelbar magmatischen Umgebung eine relativ neue Idee und alle potenziellen Risiken müssen sorgfältig bewertet werden.

## Weltweiter Ausblick, politische Dimension und gesellschaftliche Rolle

Die Erzeugung von Energie mit SCGS ist derzeit nur in vulkanischen Gebieten möglich. Dort schaffen junge magmatische Intrusionen eine Hochtemperaturumgebung, die für das Vorhandensein superkritischer Fluide Bedingung ist. In der Erdkruste geschieht dies an einer Grenze, die in etwa fünf Kilometern Tiefe liegt und mit aktuellen Bohrtechnologien erreicht werden kann.

In nicht-vulkanischen Gebieten, unter der Annahme eines durchschnittlichen geothermischen Gradienten von 30 Kelvin pro Kilometer, konnten überkritische Flüssigkeiten in einer Tiefe von etwa 13 bis 15 Kilometern gefunden werden. Der geothermische Gradient beschreibt den Temperaturanstieg mit zunehmender Tiefe. Der durchschnittliche geothermische Gradient liegt bei 30 Kelvin pro Kilometer, das entspricht 3 °C pro 100 m. In der Zukunft, wenn Verbesserungen in der Bohrtechnik es uns erlauben würden, eine solche Tiefe zu erschwinglichen Kosten zu erreichen, könnte SCGS vielleicht zu einer nachhaltigen Energiequelle werden, die weltweit verfügbar ist.

Aber auch hier würden neue Herausforderungen entstehen, da in dieser Tiefe noch große Unsicherheiten über die Struktur der Erdkruste bestehen. So könnte die geringe Durchlässigkeit der Kruste ein wahrscheinlicher Engpass sein.

Deutschland hat eine starke Position in der internationalen SCGS-Forschung, die sich ganz wesentlich auf eine lange Tradition der Erforschung geothermischer Systeme und der Vulkanologie stützt. Es bestehen zudem Kooperationen mit Forschungsinstituten und Unternehmen in Island, Italien, Mexiko, Japan, Indonesien, um nur einige zu nennen.

Die Forschung an der Thematik SCGS ist eng verknüpft mit geowissenschaftlichen Disziplinen wie der Vulkanologie. Künftige Kooperationen sollten darauf ausgerichtet sein, stärkere Verbindungen zwischen der ingenieurwissenschaftlichen Forschung zur Geothermie und der vulka-

nologischen Forschungsgemeinschaft aufzubauen. Beide Bereiche könnten sowohl zu gemeinsamen Forschungsprojekten beitragen als auch direkt von ihnen profitieren.

Öffentliche Investitionen können die grundlegende und angewandte Forschung stärken, um technologische und industrielle Reife auf diesem Gebiet voranzutreiben. Die wissenschaftliche Gemeinschaft muss eine Führungsrolle bei der Entwicklung und Bereitstellung erneuerbarer, treibhausgas- und risikoarmer Energiequellen für den Übergang zu einer sauberen und nachhaltigen Energieversorgung einnehmen.

Wissenschaftliche Erkenntnisse werden eine grundlegende Voraussetzung im Kampf gegen den Klimawandel sein. Nach Meinung der Autoren, die auch ein aktiver Teil der Gesellschaft sind, kann nur eine bessere Wissenschaft, die auch besser vermittelt wird, die Risiken von SCGS objektiv ermitteln und die Öffentlichkeit über die Vor- und Nachteile informieren, um es ihr zu ermöglichen, informierte und auf rationalen Überlegungen gestützte Entscheidungen zu

treffen. Aspekte der Sicherheit müssen dabei offen adressiert werden. Wenn Risiken bestehen, müssen diese offen kommuniziert und mit der Öffentlichkeit diskutiert werden.

Rechenschaftspflicht und Zuverlässigkeit von Wissenschaftlern, politischen Entscheidungsträgern und Betreibern aus der Wirtschaft sind Schlüsselkomponenten für den Aufbau einer angemessenen Sicherheitskultur, die das Vertrauen der Bürger verdient.

Die Nutzung vulkanischer Systeme zum Zwecke der Energieversorgung ist ein großes Unterfangen, das zu Beginn des 20. Jahrhunderts in Italien seinen Anfang nahm und welches jetzt ganz neue Wege aufzeigt, die Energie, die die Erde zur Verfügung stellt, mit all ihren Potenzialen zu nutzen. Der Weg dorthin ist lang und voller Hindernisse, aber vulkanische Systeme könnten in den kommenden Jahrzehnten zu einem wichtigen Verbündeten im Kampf gegen den Klimawandel werden.

## Referenzen

- Agostinetti, N. P., Licciardi, A., Piccinini, D., Mazzarini, F., Musumeci, G., Saccorotti, G. & Chiarabba, C. (2017). Discovering geothermal supercritical fluids: a new frontier for seismic exploration. *Scientific Reports*, 7:14592. doi:10.1038/s41598-017-15118-w
- Bentz, S., Martínez-Garzón, P., Kwiatek, G., Dresen, G. & Bohnhoff, M. (2019). Analysis of Microseismicity Framing ML > 2.5 Earthquakes at The Geysers Geothermal Field, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(8), 8823-8843. doi:10.1029/2019JB017716
- Bixley, P. & Browne, P. (1988). Hydrothermal eruption potential in geothermal development. In *Proceedings, 10th New Zealand Geothermal Workshop* (S. 195-198). Auckland: University of Auckland.
- Brown, D. W. (2000). A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO<sub>2</sub> instead of water. In *Proceedings, Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* (S. 233.-238). Stanford: Stanford University.
- Elders, W., Friðleifsson, G. Ó. & Albertsson, A. (2014). Drilling into magma and the implications of the iceland deep drilling project (iddp) for high-temperature geothermal systems worldwide. *Geothermics*, 49, 111-118. doi:10.1016/j.geothermics.2013.05.001
- Ellsworth, W. L., Giardini, D., Townend, J., Ge, S. & Shimamoto, T. (2019). Triggering of the Pohang, Korea, Earthquake (Mw 5.5) by Enhanced Geothermal System Stimulation. *Seismological Research Letters*, 90(5), 1844-1858. doi:10.1785/0220190102
- Friðleifsson, G. Ó., Elders, W. & Albertsson, A. (2014). The concept of the iceland deep drilling project. *Geothermics*, 49, 2-8. doi:10.1016/j.geothermics.2013.03.004

- Friðleifsson, G. Ó., Elders, W. A., Zierenberg, R. A., Fowler, A. P., Weisenberger, T. B., Mesfin, K. G., Sigurðsson, Ó., ... Mainprice, D. (2020). The iceland deep drilling project at reykjanes: Drilling into the root zone of a black smoker analog. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391:106435. doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.08.013
- Landau, L. D. & Lifshitz, E. M. (1980). Chapter VIII – Phase Equilibrium. In L. D. Landau & E. M. Lifshitz, *Statistical Physics* (Teil 1, 3. Auflage, durchgesehen und erweitert von E. M. Lifshitz und L. P. Pitaevskii, S. 251.262). Oxford: Pergamon Press.
- Larsen, G., Grönvold, K. & Thorarinnsson, S. (1979). Volcanic eruption through a geothermal borehole at Námafjall, Iceland. *Nature*, 278, 707-710. doi:10.1038/278707a0
- Lupi, M., Saenger, E. H., Fuchs, F. & Miller, S. (2013). Lusi mud eruption triggered by geometric focusing of seismic waves. *Nature Geoscience*, 6, 642-646. doi:10.1038/ngeo1884
- Majer, E. L. & Peterson, J. E. (2007). The impact of injection on seismicity at the geysers, california geothermal field. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(8), 1079-1090. doi:10.1016/j.ijrmmms.2007.07.023
- Norton, D. & Knight, J. (1977). Transport phenomena in hydrothermal systems: cooling plutons. *American Journal of Science*, 277(8), 937-981. doi:10.2475/ajs.277.8.937
- Parisio, F., Vilarrasa, V., Wang, W., Kolditz, O. & Nagel, T. (2019a). The risks of long-term re-injection in supercritical geothermal systems. *Nature Communications*, 10:4391. doi:10.1038/s41467-019-12146-0
- Parisio, F., Vinciguerra, S., Kolditz, O. & Nagel, T. (2019b). The brittle-ductile transition in active volcanoes. *Scientific Reports*, 9:143. doi:10.1038/s41598-018-36505-x
- Reinsch, T., Dobson, P., Asanuma, H., Huenges, E., Poletto, F. & Sanjuan, B. (2017). Utilizing supercritical geothermal systems: a review of past ventures and ongoing research activities. *Geothermal Energy*, 5:16. doi:10.1186/s40517-017-0075-y
- Scott, S., Driesner, T. & Weis, P. (2015). Geologic controls on supercritical geothermal resources above magmatic intrusions. *Nature Communications*, 6:7837 doi:10.1038/ncomms8837
- Staingrimsson, B., Gudmundsson, A, Franzon, H. & Gunnlaugsson, E. (1990). Evidence of a Supercritical Fluid at Depth in the Nesjavellir Field. In *Proceedings, Fifteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* (S. 81-88). Stanford: Stanford University.
- Tingay, M., Rudolph, M., Manga, M., Davies, R. & Wang, C.-Y. (2015). Initiation of the lusi mudflow disaster. *Nature Geoscience*, 8, 493-494. doi:10.1038/ngeo2472
- Trugman, D. T., Shearer, P. M., Borsa, A. A. & Fialko, Y. (2016). A comparison of long-term changes in seismicity at the geysers, salton sea, and coso geothermal fields. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(1), 225-247. doi:10.1002/2015jb012510
- Watanabe, N., Numakura, T., Sakaguchi, K., Saishu, H., Okamoto, A., Ingebritsen, S. E. & Tsuchiya, N. (2017). Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust. *Nature Geoscience*, 10, 140-144. doi:10.1038/ngeo2879
- Watanabe, N., Sakaguchi, K., Goto, R., Miura, T., Yamane, K., Ishibashi, T., Chen, Y., Komai, T. & Tsuchiya, N. (2019). Cloud-fracture networks as a means of accessing superhot geothermal energy. *Scientific Reports*, 9:939. doi:10.1038/s41598-018-37634-z

## Geothermie-Ressourcen unter vulkanischen Seen mit neuen Methoden erkunden

Ass. Prof. Dr. Maren Brehme (Technische Universität Delft, Niederlande)

**Geothermie wird als alternative Energiequelle immer wichtiger. Allerdings sind Erkundungsbohrungen aufwändig und damit teuer. Mit neuen Erkundungsmethoden lässt sich die Treffsicherheit dieser Bohrungen erhöhen und der Betrieb von Geothermie-Anlagen wirtschaftlicher und sicherer gestalten.**

- Vor dem Hintergrund des Klimawandels kann Geothermie – also die natürliche Wärme aus der Erde – einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung der Zukunft leisten.
- In Anbetracht der hohen Kosten bei der Erkundung sind neue Methoden gefragt, um Geothermiefelder zu entdecken und genau zu vermessen.
- Wirtschaftlich interessante Bohrpunkte zeigen sich unter vulkanischen Seen. Sie können nun präzise bestimmt werden.

Die Hälfte des Energiebedarfs von Deutschland ist Wärme: Wärme zum Heizen unserer Häuser, warmes Wasser zum Duschen, Wärme für Schulen und Büros oder Wärme zum Schmelzen, Reinigen oder Trocknen von Industrieprodukten. Hinzu kommt, dass unser Energieverbrauch in Deutschland durch steigenden Konsum und Wirtschaftswachstum nur langsam sinkt – trotz effizienterer Nutzung und Einsparungen (EWI, 2020; Umweltbundesamt, 2010). Um diesen Standard halten zu können und gleichzeitig CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken, werden auch in Zukunft verlässliche und nachhaltige Energieträger gebraucht.

Geothermie – also natürliche Wärme aus der Erde – kann hier einen wichtigen Beitrag leisten. Überall unter unseren Füßen wird es wärmer je tiefer man gräbt. Die Wärme ist im Gestein und im Wasser gespeichert. Um diese Energiequelle zu nutzen, führt man zum Beispiel zwei kilometertiefe Bohrungen durch. Aus der einen Bohrung pumpt man heißes Wasser und in die andere verpresst man das abgekühlte Restwasser, das sich dann in der natürlichen Umgebung wieder aufheizt. Da aber immer noch relativ wenig

über den Untergrund der Erde bekannt ist, trifft nur jede zweite Bohrung auf ausreichend warmes Wasser (IFC, 2013). Außerdem ist der Untergrund so heterogen, dass der Wirkungsgrad selbst zwischen nahegelegenen Bohrungen stark schwankt.

Wegen dieser Unsicherheit und der hohen Kosten beim Bohren (ca. 1 Mio. €/km) existiert ein großer Forschungsbedarf über den Aufbau der Erde und insbesondere das Vorkommen von Geothermie-Ressourcen. Wenn sich genau vorhersagen ließe, wo Ressourcen liegen und welche Größe sie haben, könnte man einen großen Teil der Erschließungskosten von Geothermiefeldern einsparen.

Das Wissen über den Untergrund folgt vor allem aus Forschungsprojekten im Bereich der Geowissenschaften. Für die Geothermie werden zurzeit hauptsächlich klassische Methoden der Geowissenschaften, wie Seismik und elektromagnetische Methoden, verwendet, um Ressourcen aufzuspüren. Die trotzdem noch bestehenden Wissenslücken erfordern jedoch ein Umdenken bei der Exploration dieser Ressource

Vulkanische Seen erkunden  
zur Nutzung der Geothermie  
Studien am Linau See

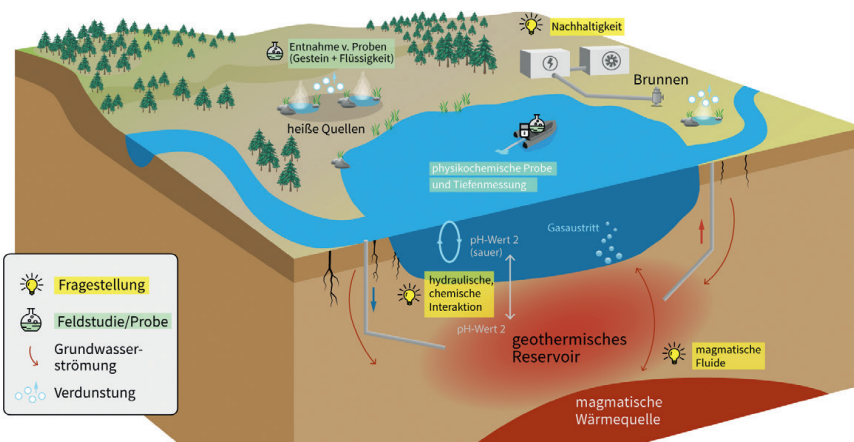


Abb. 1: Studien zur Nutzung der Geothermie an vulkanischen Seen. Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, [eskp.de/](http://eskp.de/) Maren Brehme

und verlangen neue Forschungsstrategien in der Erkundung von Geothermiefeldern.

### Eine neue Explorations-Methode

Unser internationales Forschungsteam, das aus Wissenschaftler\*innen aus Deutschland, den Niederlanden, Indonesien und der Türkei bestand, ging mit einem neuen Ansatz an die Erkundung heran (s. auch den Field Trip Blog: Brehme, 2018). Mithilfe der Kombination sogenannter Bathymetrie-Messungen und geochemischer Profile an einem Vulkansee in Indonesien zur Lokalisierung von wasserführenden Zonen lassen sich mögliche Bohrpunkte ermitteln. Klassische Erkundungsmethoden beschränkten sich bisher auf Messungen an Land. Der neue Ansatz ermöglicht es nun Flächen zu untersuchen, die an der Oberfläche mit Wasser, also Seen oder Flüssen, bedeckt sind und deshalb bisher nicht zugänglich waren. Diese Flächen sind zum Teil sehr groß und bedecken, vor allem in vulkanischen Gebieten, Bereiche, die besonders interessant sind für eine geothermische Nutzung.

### Die Bedeutung von Rissen im Gestein

Genauso wie die an Land verwendeten Methoden basiert ein Teil des neuen Ansatzes auf der Kartierung von Rissen im Gestein. Entlang dieser Rissstrukturen bewegt sich oft heißes Wasser im

Untergrund. Für diese Kartierung wird eine Bathymetrie-Aufnahme des Sees gemacht. Es wird also an (zehn)-tausenden von Messpunkten die genaue Tiefe des Sees auf wenige Dezimeter genau gemessen. Dies geschieht über Schallwellen, die von einem Schiff losgeschickt werden, am Seeboden reflektieren und zum Messinstrument zurückkehren. Dort wo es abrupte Topographie-Unterschiede am Seeboden gibt, werden Risse im tieferen Gestein vermutet.

Die Rissstrukturen sind von besonderer Bedeutung, weil über sie auch heißes Wasser aus der Tiefe an die Oberfläche gelangen kann. An Land kommt es dann zu Quellaustritten. Unter Wasser sind diese Austritte schwerer erkennbar. Deshalb kam ein zusätzliches Tool zur Messung der chemischen Zusammensetzung des Wassers zum Einsatz. Das aus der Tiefe aufsteigende Wasser hat typischerweise einen höheren Salzgehalt und eine höhere Temperatur als das Seewasser. Über diesen chemischen Unterschied und die Temperaturdifferenz lassen sich so Quellaustritte auch unter Wasser finden und kartieren (Brehme et al., 2019).

Nicht nur die Unterschiede in der Wasserzusammensetzung waren eindeutig, an den Kreuzungspunkten von den Rissstrukturen im Gestein wurden sogar aufsteigende Gasblasen detektiert. Diese Gasblasen sind besonders zuverlässige

Indikatoren für aufsteigende geothermische Wässer aus dem tiefen Gestein, die das Zielobjekt von Geothermie-Bohrungen sind. Außerdem konnte durch eine präzise Navigation sogar eine Aufnahme von dem Loch, aus dem die Blasen aufsteigen, gemacht werden.

Die neu gewonnenen Unterwasserdaten wurden später mit Messungen an Land verglichen. Damit konnten die Rissstrukturen vom Seeboden auch an Land fortgesetzt werden, bis hin zu bereits bekannten Heißwasserquellen an Land. Dieses Beispiel zeigt das Potential des neuen Ansatzes, denn es lassen sich damit Heißwasserführende Strukturen und damit neue Bohrziele in der tiefen Erde erkennen.

Dass die ersten Studien unseres internationalen Forschungsteams im fernen Indonesien und der Türkei stattgefunden haben, lässt sich durch die Testbedingungen erklären. Das Geothermiefeld in Indonesien ist bereits gut untersucht und hält deshalb viele zusätzliche Daten zur Validierung der neuen Messdaten bereit. Im nächsten Schritt wurde ein Feld in der Türkei untersucht, das weniger, aber immer noch gute Testbedingungen, besitzt. Die Methode ist nun soweit, dass man sie unter erschwerten Bedingungen an vielen Standorten der Welt und auch in Deutschland testen kann.

## Anwendung und Vorteile

Die Kartierung von Rissstrukturen im Gestein und die Messung der chemischen Zusammensetzung des Wassers dient nicht nur dem Auffinden von geothermischen Ressourcen im Untergrund, sondern hilft auch bei der Risikoeinschätzung der Nutzung der Geothermie-Ressourcen. Aus der Tiefe aufsteigende Wässer sind nämlich oft sehr salzhaltig, heiß und chemisch aggressiv. Diese Wässer können die Bohrungen und Rohrleitungen korrodieren und technische Geräte schädigen. Diese Beschädigungen sind somit ein wirtschaftliches Risiko für den Anlagenbetreiber.

Auf der anderen Seite erhöht sich der Wirkungsgrad in der Geothermie, je heißer die genutzten Wässer sind. Hier muss also ein Ausgleich gefunden werden zwischen der Effizienz und der Sicherheit der Anlage. Die vorgestellte Methode kann hierzu wertvolle Informationen liefern. Es kann für den Anlagenbetreiber sinnvoll sein, sich für eine Bohrvariante zu entscheiden, die zwar im Wirkungsgrad niedriger ist, dafür aber einen sicheren und längeren Betrieb gewährleistet.

Mittlerweile wurde diese Erkundungstechnik auch in weiteren Feldern in der Türkei erfolgreich angewandt (Brehme et al., 2020). Diese Methode soll somit nun ein neuer Standard bei der Erkundung von neuen Bohrlokationen für die Geothermie werden. Ein großer Vorteil dieser neuen Methoden, im Vergleich zu den oft angewandten Computermodellen, ist die direkte Messung und Validierung im Feld und eine exakte Darstellung des Untergrundes fast in Echtzeit. Im Vergleich zu klassischen geophysikalischen Methoden wie der Seismik verursacht sie außerdem deutlich geringere Kosten.

Der neue Ansatz kommt für die präzise Platzierung von Bohrungen in bereits produzierenden Geothermiefeldern zur Anwendung, die erweitert werden sollen. Er kann aber auch für die Neuerkundung und Nutzbarmachung von geothermischen Ressourcen genutzt werden. Die vorgestellte Methode erhöht die Treffsicherheit beim Abteufen von Bohrungen, was wiederum die Kosten für Geothermie senkt und den Wirkungsgrad erhöht.

Zusätzlich zu den erwähnten Vorteilen und Anwendungsgebieten liefert die Methode die Grundlage für weiterführende Forschungen. Das genaue Verständnis des Aufbaus des Untergrundes ist z.B. eine Notwendigkeit für die Abschätzung anderer Risiken, wie induzierte Seismizität – dabei handelt es sich durch menschliche Einflüsse getriggerte Erdbeben – oder die potentielle Kontamination von Trinkwasservorkommen.

## Referenzen

- Brehme, M. (2018). LoLa beschäftigt sich mit der nachhaltigen Nutzung des Geothermie-Standortes Lahendong in Indonesien. [Blog, maren.familie-brehme.de]. Aufgerufen am 08.05.2020.
- Brehme, M., Giese, R., Suherlina, L. & Kamah, Y. (2019). Geothermal sweetspots identified in a volcanic lake integrating bathymetry and fluid chemistry. *Scientific Reports*, 9:16153. doi:10.1038/s41598-019-52638-z
- Brehme, M., Giese, R., Bulut, F., Dokuz, U. E., Dogru, A. (2020). What lakes reveal about geofluid-pathways and the linkage to georesources, in preparation.
- Gierkink, M & Sprenger, T. (2020). *Die Auswirkungen des Klimaschutzprogramms 2030 auf den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromnachfrage* (EWI-Analyse). Köln: Energiewirtschaftliches Institut der Universität zu Köln gGmbH.

## 6. Frühwarnung und Monitoring

### Einleitung

Durch immer weiter verfeinerte Messmethoden ist es möglich, die Aktivitäten eines Vulkans genauer zu erfassen und zu lokalisieren. Dies kann helfen, den möglichen Schaden durch einen Ausbruch zu verringern. Gefährdete Gebiete können vorab identifiziert und Evakuierungspläne erarbeitet werden. Beim Vulkanmonitoring wird mit High-Tech gearbeitet. Dazu zählt der Einsatz von Forschungsdrohnen. Auch die Fernerkundung aus dem All gewinnt an Bedeutung.

### Themen-Überblick

---

- ▶ Durch Überwachung das Risikopotential von Vulkangefahren erkennen
- ▶ High-Tech-Einsatz beim Vulkanmonitoring
- ▶ Aus der Vogelperspektive: Drohnen in der Vulkanforschung
- ▶ Fernerkundung aktiver Vulkane mit Kleinsatelliten
- ▶ Verbesserte Abschätzung von Vulkanemissionen mit Satelliten und Supercomputing
- ▶ Überwachung vulkanischer Seen
- ▶ Warum brauchen wir Vulkanforschung in Deutschland?

## Durch Überwachung das Risikopotential von Vulkangefahren erkennen

Oliver Jorzik (Earth System Knowledge Platform | ESKP)

Fachliche Durchsicht: Dr. Stefan Bredemeyer (GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

Edgar Zorn (Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

**Auch wenn sich viele Vulkanausbrüche nach wie vor nicht hundertprozentig vorhersagen lassen, kann ein intensives Vulkan-Monitoring einen wesentlichen Beitrag leisten, um Risikopotentiale besser zu erkennen und die Bevölkerung vor Ort zu schützen.**

- Grundsätzlich geht es beim Vulkan-Monitoring darum, einen Vulkan besser zu verstehen, denn die geologischen Voraussetzungen sind häufig sehr unterschiedlich.
- Durch eine systematische Vulkanüberwachung erhalten Forschende wichtige Informationen über Aktivitäten im Inneren oder die Veränderung der Vulkanoberfläche.
- Diese Informationen erlauben es, die Risiken besser einzuschätzen, die von Vulkanen ausgehen.

Mit der Überwachung von Vulkanen sollen Veränderungen und verborgene Aktivitäten erkannt werden, die auf ein mögliches Wiedererwachen eines Vulkans oder gar einen bevorstehenden Ausbruch hindeuten. Es geht darum, Frühwarnzeichen und geeignete Daten zu erfassen, um das Gefahrenpotential besser einzuschätzen, das von einem Vulkan ausgeht. Das Vulkan-Monitoring ist eine Herkulesaufgabe wie folgende Zahlen verdeutlichen: Aktuell werden mehr als die Hälfte der aktiven Vulkane – die Forschung geht von 1.500 Vulkanen weltweit aus – nicht instrumentell überwacht. Als Folge werden unter den bis zu 85 jährlich auftretenden Ausbrüchen immer etliche sein, vor denen nicht gewarnt werden kann (Valade et al., 2019).

Die Internationale Gesellschaft für Vulkanologie und Chemie des Erdinneren (englisch International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, IAVCEI) hat 16 sogenannte Dekadenvulkane identifiziert, die wegen ihrer langen Historie und dem damit verbundenen

zerstörerischen Potential sowie ihrer Nähe zu bewohnten Gebieten als besonders gefährlich gelten. Durch den Ausbruch einer dieser Vulkane könnte das Leben von mehrere zehntausend bis hunderttausenden Menschen bedroht sein. Sie heißen deshalb Dekadenvulkane, weil das Forschungsprojekt zur Identifizierung dieser Vulkane Bestandteil der von den Vereinten Nationen im Jahr 1990 ausgerufenen Internationalen Dekade zur Reduzierung von Naturkatastrophen war (International Decade for Natural Disaster Reduction, IDNDR). Der folgenden Tabelle kann entnommen werden, welche Vulkane wegen ihrer großen Gefährlichkeit einer besonderen Beobachtung unterliegen. Die rechte Spalte zeigt die aktuellen Aktivitäten des Vulkans (Angaben: Dr. Stefan Bredemeyer, GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel).

| Vulkan               | Region                   | Land                         | Aktuelle Aktivität   |
|----------------------|--------------------------|------------------------------|--|
| Avachinsky-Koryaksky | Kamtschatka              | Russland                     | Zeigt momentan leicht erhöhte Aktivität, seit Dezember 2019 erste Zeichen des Wiedererwachens.                               |
| Colima               | Jalisco und Colima       | Mexiko                       | Nahezu konstante Ruhelosigkeit seit 1994 (explosiver Domvulkanismus).  |
| Galeras              | Nariño                   | Kolumbien                    | Ruhelos mit häufigen schwachen Explosionen, letzte größere Eruption am 2. Januar 2010.                                       |
| Mauna Loa            | Hawaii                   | USA                          | Ruheloser basaltischer Schildvulkan, seit Mitte 2018 häufen sich die Anzeichen ansteigender Aktivität, letzte Eruption 1984. |
| Ätna                 | Sizilien                 | Italien                      | Ununterbrochene Aktivität mit häufigen überwiegend effusiven Eruptionen seit historischen Zeiten (122 v. Chr.).              |
| Merapi               | Zentraljava              | Indonesien                   | Bekannt für seinen hochexplosiven Vulkanismus, Beginn der letzten Eruptionsphase in 2018.                                    |
| Nyiragongo           | Nord-Kivu                | Demokratische Republik Kongo | Bekannt für die Produktion von sehr schnell fließenden Lavaströmen, permanent aktiver Lavasee seit 2002.                     |
| Mount Rainier        | Washington               | USA                          | Momentan ruhig, letzte Eruption 1894.  |
| Vesuv                | Kampanien                | Italien                      | Momentan ruhig, letzte Eruption im April 1944.   |
| Unzen                | Nagasaki/Kumamoto        | Japan                        | Momentan ruhig, letzte Eruption 1996 (explosiver Domvulkanismus).  |
| Sakurajima           | Kagoshima                | Japan                        | Befindet sich seit 1955 im Zustand permanenter Eruption (explosiver Domvulkanismus).   |
| S. María/Santiaguito | Quetzaltenango           | Guatemala                    | Befindet sich seit 1922 im Zustand permanenter Eruption (explosiver Domvulkanismus).   |
| Santorin             | Südliche Ägäis, Kykladen | Griechenland                 | Seit 2012 Anzeichen des Wiedererwachens, letzte Eruption 1950 (Caldera-Vulkan).  |
| Taal                 | Luzon                    | Philippinen                  | Befindet sich seit der Eruption am 12. Januar 2020 (der ersten Eruption seit 1977) im permanenten Unruhezustand.             |
| Pico de Teide        | Kanarische Inseln        | Spanien                      | Schlummernder Schildvulkan, letzte Eruption 1909.  |
| Ulawun               | Neubritannien            | Papua Neu-Guinea             | Befindet sich seit 2010 in einer eruptiven Phase mit gelegentlichen Explosionen (Domvulkan).                                 |



Abb. 1: Übersichtskarte der 16 Dekadenvulkane  
Karte: Wissensplattform Erde und Umwelt, [eskp.de](http://eskp.de) / CC BY 4.0

Beim Vulkan-Monitoring wird nicht nur in ferne Regionen geschaut. Neue Monitoring-Ergebnisse aus dem seismologischen Messnetzwerk am Laacher-See-Vulkan in der Eifel zeigen tiefe, niederfrequente Beben, die einen Hinweis auf vulkanische Aktivitäten und Magmabewegungen im Untergrund geben. Die neuen Erkenntnisse werden genutzt, um die Gefährlichkeit des Vulkans am Laacher-See besser einschätzen zu können und weitere Überwachungsmaßnahmen einzuleiten (Hensch et. al. 2019).

### Vulkane besser verstehen

Grundsätzlich geht es beim Vulkan-Monitoring darum, einen Vulkan besser zu verstehen, denn die geologischen Voraussetzungen sind häufig sehr unterschiedlich. Es gibt Vulkane entlang konvergierender Krustenplatten in der Erde wie am berühmten Pazifischen Feuerring. Dort treffen zwei tektonische Platten aufeinander und die schwere Ozeanische Platte taucht unter die Kontinentalkruste ab.

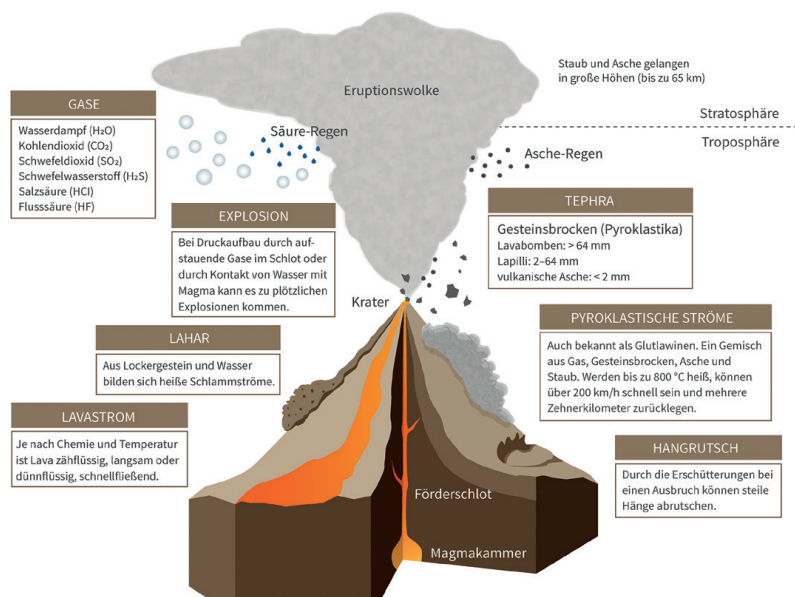
Vulkane entstehen aber auch entlang auseinanderdriftender Platten wie am Mittelozeanischen Rücken. Dort gibt es Zonen, an denen zwei tektonische Platten auseinanderdriften und eine sogenannte divergente Plattengrenze bilden. Das bedeutet: Die geologische Beschaffenheit im Untergrund kann zu völlig unterschiedlichen Eruptionstypen führen (siehe dazu auch ESKP-Beitrag „Vulkane: Eruptionstypen“). Auch gibt es verschiedene Vulkantypen, wie der dazugehörige ESKP-Beitrag „Vulkantypen“ zeigt.

Die Verschiedenartigkeit von Vulkanen führt dazu, dass sich nicht jede Erkenntnis über das Verhalten eines Vulkans verallgemeinern und einfach auf einen anderen Vulkan übertragen lässt. Daher kommt es darauf an, ein besseres Verständnis darüber zu erhalten, wie sich Magmakammern im Untergrund füllen, wo sich Kanäle für den Magmaaufstieg befinden oder wie sich die Zähflüssigkeit (Viskosität) der Schmelzen im Untergrund verhält.

Auch mit einem technisch intensiven Monitoring ist es bis heute leider nicht möglich, den Ausbruch eines Vulkans exakt vorherzusagen. Es gibt verschiedene Fragen, die für eine derartige Vorhersage beantwortet werden müssen:

- Wann bricht der Vulkan aus?
- Wo bricht der Vulkan aus (zentraler Krater oder Flankeneruption)?
- Wie stark wird die Eruption sein und welche Art von Eruption ist zu erwarten (explosiv, effusiv)?
- Wie viel Magma ist involviert und wie viel davon erreicht jemals die Oberfläche?

Gerade in den letzten Jahrzehnten hat es häufiger erfolgreiche Frühwarnungen und darauf aufbauend Evakuierungsmaßnahmen gegeben. Meistens lassen sich jedoch nicht alle Fragen, die für eine vollumfängliche Gefahrenabschätzung notwendig wären, bereits vor der Eruption klären. Insbesondere in Gebieten mit monogenetischem Vulkanismus (z. B. Phlegräische Felder), aber auch an Vulkanen mit häufigen



**Abb. 2: Was kommt aus einem Vulkan heraus?** Von Lavaströmen über Tephra bis zu Vulkangasen und saurem Niederschlag, die Grafik gibt eine Übersicht über die Eruptionsprodukte bei Vulkanausbrüchen.

Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, [eskp.de](http://eskp.de) / CC BY 4.0

Flankeneruptionen wie dem Ätna oder Hawaii lässt sich die Frage, an welcher Stelle es mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Vulkanausbruch kommen wird, in der Regel nur bedingt beantworten.

Durch immer verfeinerte Messmethoden ist es jedoch möglich, die Aktivitäten eines Vulkans genauer zu erfassen und zu lokalisieren. Dies kann helfen, um den möglichen Schaden durch einen Ausbruch zu verringern. Gefährdete Gebiete können vorab identifiziert und Evakuierungspläne erarbeitet werden.

Neben der Gefahrenabschätzung ist die Einordnung der Gefährdungslage in verschiedene Alarmstufen relevant. Letztere dienen dazu, bestehende Notfallpläne anzuwenden und geeignete Maßnahmen der Katastrophenvorsorge einzuleiten sowie die zeitnahe Information der Bevölkerung zu gewährleisten.

### Gesundheitsgefährdung verringern

Das kontinuierliche Monitoring von Vulkanen hat eine besonders hohe Bedeutung für Menschen, die im unmittelbaren Gefährdungsgebiet rund um den Vulkan leben und eventuell evakuiert werden müssen. Denn das Gefahrenpotential, das von Vulkanasche, Vulkangasen, austretender Lava, pyroklastischen Strömen oder vulkanischen Bomben ausgeht, kann erheblich sein.

Pyroklastische Ströme sind Glutwolken aus heißen vulkanischen Gasen und mitgerissenen Partikeln wie Bims, Asche, Blöcken und heißer Lava. Sie suchen sich hauptsächlich ihren Weg durch Täler und Senken. Surges können bei ausreichender Energie auch Bergrücken überwinden. Bei Temperaturen von bis zu 800 °C erreichen sie Geschwindigkeiten von bis zu 300 km/h. Diejenigen Bewohner der römischen Stadt Pompeji, die beim Ausbruch des Vesuvs 79 n. Chr. den vorausgegangenen Regen aus Asche, Bimsstein und Lavabrocken überstanden hatten, wurden von den nachfolgenden pyroklastischen Strömen binnen weniger Sekunden getötet.

Abgesehen von diesen tödlichen Gefahren besteht im unmittelbaren Umfeld von eruptierenden Vulkanen eine hohe Gesundheitsgefährdung durch Flugasche, Aerosole (Feinstaubbelastung) und toxische Gase, welche zur Reizung und bei andauernder Exposition zu chronischen Erkrankungen der Atemwege und Schleimhäute führen können. Darüber hinaus enthält Vulkanasche schädliche Stoffe wie Schwefel, Fluor, Brom, Kalium oder Radon, welche beim Einatmen oder über die Nahrung und das Trinkwasser in den Körper gelangen können. Wenn die Asche auf Äckern und Weideland niedergeht, reichern sich diese Schadstoffe zudem im Boden an, vergiften weidendes Vieh und können bei ausreichend starker Bedeckung der Äcker ganze Ernten vernichten.

Vulkanische Bomben sind Lavafragmente mit einem Durchmesser von mehr als 6,4 Zentimetern aufwärts, die aus dem Vulkanschlott herausgeschleudert werden. Abhängig von der Distanz zum Auswurfsort können sie im Laufe des Fluges eine rundliche aerodynamische Form annehmen. Hinzu kommt die Gefahr von Laharen. Dabei handelt es sich um Schlammlawinen oder Schlammströme, die sich bei Vulkanausbrüchen insbesondere an vergletscherten Vulkanhängen oder infolge von starken Niederschlägen aus Lockergestein und Wasser bilden. Sie können problemlos Geschwindigkeiten von 50 Stundenkilometern und mehr erreichen und sehr große Auswirkungen auf die Umgebung des Vulkans und menschliche Siedlungen haben.

So wurde 1985 nordwestlich von Bogota die kolumbianische Stadt Armero durch einen Lahar nahezu vollständig zerstört. Dieser Lahar wurde durch den Ausbruch des Vulkans Nevado del Ruiz verursacht. Schätzungen nach fanden dabei zwischen 25.000 und 31.000 Menschen den Tod. Hinzu kommt eine weitere Gefahr: Durch Kraterseen können mit einem Schlag große Mengen vulkanischer Gase freigesetzt werden. Die vermutlich durch einen Erdbeben ausgelöste plötzliche Freisetzung einer solchen vulkanischen Kohlenstoffdioxidwolke aus dem Nyos-See in Kamerun erstickte im Jahr 1986 über Nacht 1.750 Menschen, die nördlich des Sees im Umkreis von 25 Kilometern siedelten.

## Wirtschaftliche Folge abschätzen

Neben der Abschätzung von Gesundheitsrisiken geht es auch darum, mögliche wirtschaftliche Auswirkungen zu bewerten. Wie der Ausbruch des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull im April 2010 gezeigt hat, kann es zu beträchtlichen Einschränkungen des Flugverkehrs kommen. Allein durch dieses Extremereignis mit seiner riesigen Aschewolke mussten laut Eurocontrol mehr als 100.000 Flüge für den gesamten Zeitraum der Eruption annulliert werden. Circa zehn Millionen Passagiere mussten auf ihre Flüge verzichten. Als Folge entstand den Fluggesellschaften ein wirtschaftlicher Schaden von weit über einer Milliarde Euro.

Weitaus gravierender können die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen sein, wenn es sich um den Ausbruch eines Supervulkans handelt. Damit sind extrem starke Ausbrüche gemeint. Auf dem sogenannten Vulkanexplosivitätsindex (VEI) rangieren sie auf dem Skalenplatz 8. Ein historisches Beispiel hierfür ist der Ausbruch des Sumatra-Vulkans Toba vor rund 75.000 Jahren, bei dem mehr als 2000 Kubikkilometer Material ausgestoßen wurden.

Bislang ist die moderne Welt, so wie wir sie kennen, von einem Extremereignis mit VEI 7 oder höher glücklicherweise verschont geblieben. Aber die Risikoanalysen für die Phlegräischen Felder (Campi Flegrei) – westlich der von über 4 Millionen Menschen bewohnten Metropolregion bei Neapel und rund 20 Kilometer vom Vesuv entfernt – weisen auf einen möglichen Supervulkan auch mitten in Europa hin.

## Referenzen

- Hensch, M., Dahm, T., Ritter, J., Heimann, S., Schmidt, B., Stange, S. & Lehmann, K. (2019). Deep low-frequency earthquakes reveal ongoing magmatic recharge beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany). *Geophysical Journal International*, 216(3), 2025-2036. doi:10.1093/gji/ggy532.
- Impact of volcanic ash on air traffic. [Artikel Eurocontrol]. (2010, 1. Juli). [www.eurocontrol.int]. Aufgerufen am 15.04.2020.
- „Künstliche Intelligenz“ eignet sich zur Überwachung von Vulkanen [Pressemitteilung des GFZ]. (2019, 15. Juli). [www.gfz-potsdam.de]. Aufgerufen am 15.04.2020.
- Laiolo, M., Coppola, D., Loibl, D., Hellwich, O. & Walter, T. R. (2019). Towards Global Volcano Monitoring Using Multisensor Sentinel Missions and Artificial Intelligence: The MOUNTS Monitoring System. *Remote Sensing*, 11(13):1528. doi:10.3390/rs11131528.
- Pazifischer Feuerring. (o.D.). [Grundlagenartikel]. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de/grundlagen]. Abgerufen am 03.03.2020.
- Tiefe Erdbeben weisen auf Aufstieg magmatischer Fluide unter dem Laacher See hin [Pressemitteilung des KIT]. (2019, 07. Januar). [www.kit.edu]. Aufgerufen am 15.04.2020.
- Vulkane auf Island: Risiko und Überwachung [Pressemitteilung des GFZ]. (2011, 25. Mai). [www.gfz-potsdam.de]. Aufgerufen am 15.04.2020.
- Vulkane: Eruptionstypen. (o.D.). [Grundlagenartikel]. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de/grundlagen]. Abgerufen am 03.03.2020.
- Vulkantypen. (o.D.). [Grundlagenartikel]. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de/grundlagen]. Abgerufen am 03.03.2020.
- Walter, T. (2018, 27. Juni). Zivilisation meets VEI-7 Eruption: Die Menschheit ist schlecht aufgestellt. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 5. doi:10.2312/eskp.026

## High-Tech-Einsatz beim Vulkanmonitoring

Oliver Jorzik (Earth System Knowledge Platform | ESKP)

Fachliche Durchsicht: Dr. Stefan Bredemeyer (GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

Edgar Zorn (Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

**Bei der Überwachung von Vulkanen kommen modernste Methoden zum Einsatz, um den Aktivitäten im Untergrund auf die Spur zu kommen. Durch Satellitenüberwachung aus dem Weltall können beispielsweise wertvolle Daten gewonnen werden, die sich mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz auswerten lassen.**

- Neben klassischen bodenbasierten Instrumenten wie zum Beispiel Seismometern gewinnt beim Vulkanmonitoring zunehmend die Beobachtung aus dem All per Satellit an Bedeutung.
- Der Vorteil der Fernerkundung ist die großflächige Überwachung von Vulkanen nach einheitlichen Standards. Satelliten liefern entscheidende Daten, wenn die Überwachung am Boden eingeschränkt ist oder ganz fehlt.
- Die Menge an Daten, die bei Langzeitbeobachtungen vom Weltraum aus anfallen, wird zunehmend durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) bewältigt.

Das Monitoring von Vulkanen ist auf eine Fülle an Echtzeitdaten angewiesen. Es geht darum, Erdbeben selbst im tiefen Untergrund zu erfassen, Bodenbewegungen zu erkennen oder austretende Vulkangase aufzuspüren. Darüber hinaus befasst sich das Vulkanmonitoring mit der Chemie von Gesteinen und Wasser oder misst durch Flugzeuge oder Satelliten Veränderungen an der Vulkanoberfläche. Im Folgenden werden einige wichtige Überwachungsarten im Überblick vorgestellt.

### Einsatz von Vulkanobservatorien

Bei Vulkanobservatorien handelt es sich in der Regel um nationale Einrichtungen, die speziell dazu dienen, die Vor-Ort-Beobachtung von besonderen Gefährdungsgebieten zu koordinieren und aufbauend auf den Beobachtungsdaten Risikoanalysen zu erstellen. Im Zentrum steht dabei traditionell der Einsatz von bodenbasierten Instrumenten zur Feldmessung oder In-situ-Messungen. Diese Instrumente sind in der Regel direkt in den aktiven Vulkangebieten installiert.

Dazu zählen u. a.:

- **Seismometer:** Dieses Gerät – auch Seismograph genannt – zeichnet Bodenerschütterungen auf. Es dient der Erfassung von seismischen Wellen und Erdbeben. Es besteht aus einer an einer Federaufhängung gelagerten Masse. Die Bodenerschütterung überträgt sich dabei auf das Gehäuse des Messinstrumentes, allerdings bleibt die aufgehängte Masse aufgrund ihrer Trägheit ungestört. Die Relativbewegung des Bodens wird dann als Längenänderung im Laufe der Zeit aufgezeichnet. Mit Seismometern lassen sich Bodenbewegungen, Erschütterungen, die Stärke von Erdbeben oder ihre zeitliche und räumliche Verteilung erfassen. Dadurch lässt sich auch das Epizentrum eines Erdbebens lokalisieren. Wenn sich im Untergrund eines Vulkangebiets Erdbeben häufen, kann dies ein Indiz für einen möglichen Ausbruch sein. Diese Beben können dann entstehen, wenn zähflüssiges Magma bricht oder Gestein um das Magma herum aufgeheizt wird und sich dann ruckartig ver-

schiebt. Durch Seismometer-Messungen können in bestimmten Fällen die physikalischen Eigenschaften des Magmas abgeschätzt werden oder sich Hinweise darauf ergeben, wie der Körper des Magmas strukturiert ist.

- **Tiltmeter:** Ein Tiltmeter ist ein Neigungsmesser, der ähnlich einer Wasserwaage selbst kleinste Änderungen in der Ausrichtung der Oberfläche messen kann. Während die Geräte früher rein mechanisch funktionierten, arbeiten sie heute mit elektronischen Sensoren, die eine hohe Winkelgenauigkeit haben. Wenn sich im Untergrund das Magma bewegt, aufsteigt oder sich die Magmakammer füllt bzw. leert, kann es zu Hebungen bzw. Senkungen an der Vulkanoberfläche kommen. Entsteht daraus eine veränderte Hangneigung, kann diese vom Tiltmeter erfasst werden.
- **GNSS-Stationen:** Deformationen des Vulkangebäudes können auch mittels sogenannter GNSS-Sensoren festgestellt werden (GNSS = Global Navigation Satellite System). GNSS-Stationen können über Jahre hinweg kleinste Bewegungen im Millimeter-Bereich an Vulkanen feststellen. Dadurch lässt sich erkennen, ob sich die Oberfläche eines Vulkans ausdehnt oder absenkt. Diese Informationen ermöglichen Rückschlüsse auf Bewegungen von Magma im Untergrund.
- **Radarinterferometrie:** Damit lassen sich zwei- oder dreidimensionale Karten eines Vulkans erstellen, die ein zentimetergenaues Bild ermöglichen. Dazu wird mittels spezieller Sensoren das Gebiet aus zwei unterschiedlichen Positionen heraus aufgenommen. Die Differenz, die sich daraus ergibt, bildet die Basis für ein Geländerelevier oder die dreidimensionale Darstellung des Vulkans. Die Aufnahmen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, lassen sich vergleichen und dazu verwenden, Veränderungen der Erdoberfläche zu entdecken.
- **Gaschromatographen und Spektrometer:** Wird ein Vulkan aktiv, können an verschiedenen Stellen der Oberfläche Gase austreten, die in der Regel überwiegend aus Wasserdampf, Kohlendioxid und Schwefeldioxid

oder Schwefelwasserstoff bestehen. Diese speziellen Austrittsstellen für die Gase heißen Fumarolen. Die Gase können vor Ort in speziellen Sammelbehältern eingefangen und dann im Labor in einem Gaschromatographen analysiert werden, um die chemische Zusammensetzung zu bestimmen. Etwas weniger gefährlich ist der Einsatz von UV-Spektrometern, wie sie am Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) sowie am GEOMAR in Kiel durch die dortige Vulkanüberwachungsgruppe verwendet werden. Sie dienen dazu,  $\text{SO}_2$ -Emissionen von Vulkanen zu quantifizieren. Zum Einsatz kommen sogenannte Infrarot-Spektrometer (auch IR-Spektrometer genannt). Sie dienen der optischen Gasanalyse und können als mobile oder fest installierte Geräte verwendet werden. IR-Spektrometer messen die Menge der Gasbestandteile in ihrem Sichtfeld. So können sich die Emissionsraten einzelner Gasspezies, oder die chemische Zusammensetzung der Vulkangase bestimmen lassen.

- **Temperaturmessungen:** Die Temperaturmessung an einem Vulkan funktioniert nicht ganz so einfach wie bei einem Fieberthermometer. Die Messgeräte sind besonderen Herausforderungen ausgesetzt. Sie müssen eine Hitze von mehreren 100 Grad aushalten, da das Magma, wenn es im Vulkan aufsteigt, das darüber liegende Gestein stark aufheizt. Zudem müssen die Temperaturmesser materialbeständig gegen die sauren, stark korrosiven Dämpfe und Gase sein. Begleitend zu den In-situ-Temperaturmessgeräten werden in der Vulkanforschung auch Wärmebildkameras eingesetzt.

### Fernerkundung aus dem All

Die Fernerkundung mittels Satelliten vereinigt viele der bodenbasierten Messmethoden. So lassen sich mittels Radar-Interferometrie aus dem All Veränderungen an der Vulkanoberfläche feststellen, indem – zum Beispiel mithilfe des TerraSAR-X-Satelliten – aktuelle Radar-Aufnahmen mit früheren verglichen werden. Diese Daten bilden die Basis, um zum Beispiel Boden-

hebungen oder -senkungen festzustellen. Es lassen sich durch Satelliten auch thermische Aufnahmen produzieren, die ein umfassendes Wärmebild der Oberfläche ermöglichen. Zusätzlich werden spektrometrische Satellitenmessungen eingesetzt, um die Gaszusammensetzung über Vulkanen zu erkennen.

Der Vorteil der Fernerkundung ist die großflächige Überwachung von Vulkanen nach einheitlichen Standards. Dies erhöht die Vergleichbarkeit der Erkenntnisse und verbessert die Aussagekraft über den Zustand eines Vulkans weiter. Zudem können auch Regionen überwacht werden, in denen die finanziellen Ressourcen für eine intensive Vor-Ort-Überwachung am Boden fehlen.

Weitere Fernerkundungsmöglichkeiten bieten Überflüge mit Flugzeugen; vermehrt kommen auch Drohnen zum Einsatz, die ebenfalls mit Kameras und Gassensoren ausgestattet sind. Dies minimiert die Risiken, die bei der Feldbeobachtung an aktiven Vulkanen für Forscherinnen und Forscher zwangsläufig entstehen. Ein beeindruckendes Beispiel für die Qualität der Bilder zeigt ein Drohnenflug über den Ambrym-Vulkan im Pazifik-Inselstaat Vanuatu (Silver Eye Films, 2016).

### Einsatz Künstlicher Intelligenz

Bei der Vulkanbeobachtung fallen eine riesige Menge an Daten an. Mittlerweile wird daran gearbeitet, Satellitenbilder von Vulkanen mittels Künstlicher Intelligenz (KI) zu analysieren (Valade et al., 2019). Hierzu wurde am Deutschen GeoForschungsZentrum in Potsdam (GFZ) in dem Gemeinschaftsprojekt MOUNTS mit der TU Berlin bereits ein vielversprechender Versuch gestartet. Da die instrumentenbasierte Überwachung am Boden nicht nur technisch und personell sehr aufwendig ist und durch die große Anzahl an aktiven Vulkanen auch sehr kostenintensiv wäre, bietet sich hier möglicherweise eine wirksame Alternative zu den bisherigen Formen des Vulkan-Monitorings.

Die kontinuierliche Langzeitbeobachtung aus dem Weltraum ist beim Einsatz von Künstlicher Intelligenz ein wichtiger Schlüssel, um die Anzeichen geologischer Unruhe besser zu erkennen. Die Satelliten liefern entscheidende Daten, wenn die Überwachung am Boden eingeschränkt ist oder ganz fehlt. Oftmals werden Eruptionen von Vorläufersignalen begleitet. Diese können einige Stunden bis zu einigen Jahren dauern. Die Signale können Änderungen des seismischen Verhaltens, Bodenverformungen, Gasemissionen, ansteigende Temperaturen oder eine Kombination daraus umfassen. Durch ihre Erfassung im Rahmen des MOUNTS-Programms wird ein umfangreiches Verständnis verschiedener Prozesse in unterschiedlichen klimatischen und vulkanischen Umgebungen auf der ganzen Welt ermöglicht: von der Ausbreitung des Magmas unter der Oberfläche, über die Verteilung von vulkanischem Material während des Ausbruchs, bis hin zu den morphologischen Veränderungen der betroffenen Gebiete und der Emission von Gasen in die Atmosphäre. Die Forschenden testeten MOUNTS erfolgreich an Daten aktueller Ereignisse wie dem Ausbruch des Krakatau in Indonesien 2018 oder Ausbrüchen auf Hawaii und in Guatemala.

Mit Ausnahme der Seismizität können alle diese Phänomene vom Weltraum aus überwacht werden, indem man verschiedene Wellenlängen im elektromagnetischen Spektrum nutzt. Im Rahmen des Projekts MOUNTS wurde die KI mit computergenerierten Bildern trainiert, die echten Satellitenbildern nachempfunden waren. Die Testergebnisse der MOUNTS-Früherkennungsplattform waren positiv und führten dazu, dass aktuell durch das Programm bereits 17 Vulkane weltweit überwacht werden.

Ein anderes Beispiel für das Zusammenspiel von Satellitentechnik und KI sind die GOES-R-Satelliten der NASA (Geostationary Operational Environmental Satellite-R Series). Sie ermöglichen es, die rasche Bildung und Ausdehnung von Vulkanwolken auch abgelegener Vulkane zu verfolgen. GOES-East und GOES-West beobachten einen erheblichen Teil des Pazifischen Feuerrings, d. h. die westlichen Teile Nord- und Süd-

amerikas, Ostasiens, Indonesiens, Mikronesiens und Neuseelands. Sie können Hot-Spots und vulkanische Asche erkennen. Die Vulkanwolken und die Vulkanfahnen lassen sich mit den Messgeräten der Satelliten deutlich von dichten Wolken oder von Zirruswolken unterscheiden. Die Daten sind mit dem VOLcanic Cloud Analysis Toolkit (VOLCAT) verbunden. Bei VOLCAT handelt es sich um eine Anwendung der Künstlichen Intelligenz, die Warnmeldungen erzeugt, wenn ein Vulkanausbruch erfolgt ist. Das bedeutet, sie entdeckt Vulkanwolken und ist in der Lage, die Vulkanwolken automatisch zu verfolgen. Mit der Anwendung lässt sich zudem bestimmen, ob Asche in den Vulkanwolken vorhanden ist, wie groß das Ausmaß der Asche ist und welche Höhe die Aschewolken haben. Gerade für den sicheren Flugverkehr unterstützt das System Entscheidungsfindungen in Echtzeit. Nähere Informationen enthält das entsprechende Fact-Sheet „GOES-R Volcanic Ash Detection“.

### Position von neuen Vulkanschlotten vorhersagen

Am GeoForschungsZentrum in Potsdam werden weitere innovative Methoden entwickelt, um Ausbruchswahrscheinlichkeiten für diejenigen Vulkane zu erkennen, bei denen das Magma nicht direkt aus der Spitze des Vulkans schießt, sondern zunächst seitwärts drängt, nachdem es die unterirdische Magmakammer verlassen hat. Das Magma kann auf diese Weise Dutzende Kilometer zurücklegen. Wenn es dann die Erdoberfläche durchbricht, erzeugt das Magma einen oder mehrere Schlote oder gar lange Erdspalten, aus denen es – manchmal explosionsartig – austritt. Dieser Vorgang ließ sich beim Ausbruch des Vulkans Bárðarbunga in Island im August 2014 und beim Kīlauea auf Hawaii im August 2018 beobachten.

Ziel der neuen Forschungsansätze ist es, die Wanderung des Magmas im Untergrund nachzuvollziehen, bevor es die Oberfläche durchbricht. Damit soll das Risiko für umliegende Dörfer und Städte verringert werden. Aus statistischen Auswertungen und aktuellstem physikalischen Wissen über die Ausbreitung von Magma entstehen

Modelle. In diese Modelle fließt auch Wissen über die Struktur und Geschichte des Vulkans ein. Diese Informationen werden mit vorhandenen Daten kombiniert, die vor Ort erhoben werden. Dann werden die Parameter des physikalischen Modells so lange abgestimmt, bis sie mit früheren eruptiven Mustern übereinstimmen. Als Folge entsteht ein Arbeitsmodell, um künftige Ausbruchsstellen vorherzusagen.

Der neue Ansatz schnitt bei Tests auf den Campi Flegrei bei Neapel gut ab und sagt nachträglich die Position von Schlotten richtig voraus, die nicht zur Abstimmung des Modells verwendet wurden. Er soll künftig auch bei anderen Vulkanen funktionieren und so helfen, die Landnutzung in vulkanischen Gebieten besser zu planen und den Ort zukünftiger Eruptionen mit einer höheren Sicherheit als bisher vorherzusagen. Damit ließe sich zudem die Vorhersage von Lava- und pyroklastischen Strömen oder der Ausdehnung von Aschefahnen besser voraussehen.

Einen weiteren neuen Ansatz bietet die Überwachung von Vulkanen mittels Glasfaserkabeln und faseroptischen Messungen. Der Einsatz von Glasfasertechnik ermöglicht die Erkennung, Lokalisierung und Quantifizierung von Spannungen, die durch geophysikalische Prozesse entlang des Kabels erzeugt werden. Auf diese Weise lassen sich auch bisher unbekannt unterirdische Strukturen entdecken, dynamische Prozesse im Untergrund können noch besser abgebildet werden (Jousset et al., 2018).

## Referenzen

- GOES-R Volcanic Ash Detection. (2019, Juni). [Fact-Sheet] [www.goes-r.gov]. Aufgerufen am 15.04.2020.
- Jousset, P., Reinsch, T., Ryberg, T., Blanck, H., Clarke, A., Aghayev, R., Hersir, G. P., Henningses, J., Weber & M., Krawczyk, C. M. (2018). Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features. *Nature Communications*, 9:2509. doi:10.1038/s41467-018-04860-y.
- Silver Eye Films. (2016, 9. Oktober). Ambrym Volcano – Ambrym Island, Vanuatu [YouTube]. Abgerufen von www.youtube.com
- Valade, S., Ley, A., Massimetti, F., D'Hondt, O., Laiolo, M., Coppola, D., Loibl, D., Hellwich, O. & Walter, T. R. (2019). Towards Global Volcano Monitoring Using Multisensor Sentinel Missions and Artificial Intelligence: The MOUNTS Monitoring System. *Remote Sensing*, 11(13):1528. doi:10.3390/rs11131528.

## Aus der Vogelperspektive: Drohnen in der Vulkanforschung

Dr. Karen Strehlow (GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

**Forschungsdrohnen ermöglichen einen völlig neuen Blick auf aktive Vulkane. Mit ihnen sind schnell hochauflösende Bilder direkt aus dem Krater und auch Daten aus anderen bisher unerreichtbaren Zonen eines Vulkans zu beschaffen. Zugleich minimiert der Einsatz von Drohnen die Gefahren für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.**

- Neben der Datenerhebung bieten sich durch Drohnen auch neue Möglichkeiten bei der Kartierung von vulkanischen Gebieten. Dies ist besonders wichtig, da sich die Landschaft an Vulkanen ständig ändert.
- Immer mehr Messgeräte werden speziell für den Drohneneinsatz entwickelt. Dadurch lässt sich zum Beispiel die Zusammensetzung von Gasen analysieren.
- Drohnen spielen auch eine direkte Rolle im Krisen- und Risikomanagement in Vulkanengebieten. Damit unterstützen sie die Sicherheit von Menschen, die in der Nähe von Vulkanen leben.

Vulkane sind faszinierend, wunderschön, spannende Forschungsobjekte, aber auch und vor allem: gefährlich. Das stellt Vulkanologen ein ums andere Mal vor ein Dilemma: Wir alle erfüllen das Klischee des „datenhungrigen“ Wissenschaftlers, aber wie weit sind wir bereit, dafür zu gehen? Die Bilder von Forschern, die in silbernen Hitzeanzügen direkt von einem Lavastrom Proben nehmen oder sich Kraterwände hinabseilen, die Geschichten von Kollegen, die in pyroklastischen Strömen umgekommen sind – so manche Vulkanologen-Mutter wünscht sich vermutlich des Öfteren, ihr Kind hätte doch lieber Betriebswirtschaft, Jura oder Soziologie studiert.

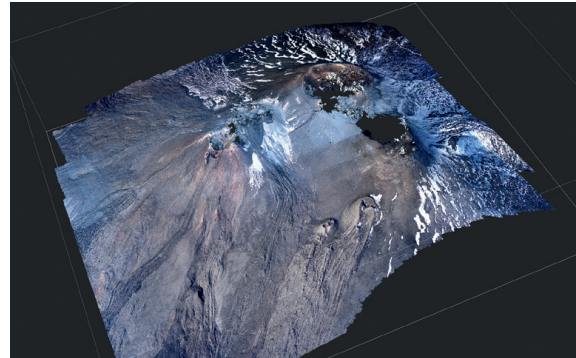
In den letzten Jahren hat sich aber eine neue Technologie wie ein Lauffeuer in der Vulkanologen-Welt verbreitet und uns in punkto Sicherheit einen großen Schritt vorangebracht: Drohnen. Mit der Entwicklung auch für die Forschung erschwinglicher Systeme zogen unbemannte Fluggeräte aller Art in die Observatorien und Forschungsinstitute ein und unterstützen uns seither in der Vulkanüberwachung. Sie ermöglichen

uns den Zugang zu bisher unerreichtbaren Zonen auf aktiven Vulkanen und versorgen uns zum Beispiel mit hochauflösenden Videoaufnahmen direkt aus dem Krater. Sie bieten aber auch andere, ganz neue Datenerhebungsmöglichkeiten aus der Vogelperspektive.

Man kann generell zwei Arten von Drohnen unterscheiden: zum einen die Kopter-Drohnen, die mithilfe von vier oder mehr Propellern ähnlich wie ein Helikopter senkrecht starten und landen und in der Luft stehen können. Gerade die etwas weiterentwickelten Systeme können mittlerweile einiges an Gewicht mit sich tragen, wie Kameras oder extra entwickelte Messsysteme. Die meisten Modelle schaffen allerdings kaum mehr als 20–30 Minuten Flugzeit und sind daher in ihrer Reichweite begrenzt. Hier glänzt der zweite Typ, die sogenannte Fixed-Wing-Drohne oder auch Starrflügler. Wie ein Segelflieger gleiten diese unbemannten Flugobjekte durch die Luft und können dank niedrigem Energieverbrauch sowie hoher Geschwindigkeiten auch große Gebiete in einem einzigen Flug abdecken. Sie benötigen



**Abb. 1:** Bei der abgebildeten Hybrid-Drohne handelt es sich um einen sogenannten Wingcopter, der sich in mehreren GEOMAR-Einsätzen u. a. am Stromboli und Ätna (Italien) bereits bei Kartierung und Krisenmanagement bewährt hat. Im Hintergrund ist eine kleine Kopter-Drohne zu sehen. Dabei handelt es sich um eine DJI Phantom 4 Pro. Foto: Karen Strehlow



**Abb. 2:** 3-D-Modell des Gipfelbereichs des Ätna (Italien), entstanden in einer GEOMAR Kampagne im Oktober 2018. Bild: GEOMAR Vulkanologie Drohnen-gruppe / Karen Strehlow, Tom Kwasnitschka, Thor Hansteen, Kaj Hoernle

allerdings meist eine geeignete Start- und Landebahn. Und sie können nicht für Anwendungen erhalten, die einen langsamen oder sogar stehenden Flug benötigen. Weiterhin gibt es Hybrid-Formen, die die Vorteile dieser beiden Typen vereinen und sowohl Gleitflügel als auch Propeller haben.

Drohnen werden in der Vulkanforschung für verschiedenste Zwecke eingesetzt. Allen voran stehen die visuellen Beobachtungen. Detaillierte Aufnahmen von Kratern, aktiven Lavaströmen und Spalten oder auch explosiven Eruptionen ermöglichen die Beobachtung und Analyse von Eruptionen wie noch nie zuvor. Während der Eruption auf Hawaii im Sommer 2018, bei der sich unzählige Spalten öffneten und große Lavaströme viele Siedlungen bedrohten, waren Drohnen ein unersetzliches Werkzeug, um neue Spalten zeitnah zu orten und den Verlauf von Lavaströmen zu verfolgen.

Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet ist das Kartieren von vulkanischen Gebieten. Die Landschaft an Vulkanen ändert sich ständig durch Lavaströme, Tephra-Ablagerungen, Erosion und Rutschungen. Wenn wir diese Änderungen quantifizieren, können wir vieles über Massenbudgets an Vulkanen lernen. Wie viel Material

wird eruptiert? Wie viel davon wird wo abgelagert? Wie viel wird erodiert? Usw.

Gleichzeitig ist die Topographie eine wichtige Grundlage für Gefahrenvorhersagen. Lavaströme, Lahare und pyroklastische Ströme werden in ihrem Verlauf stark durch die Topographie beeinflusst. Ausbreitungsmodelle benötigen daher aktuelle Karten, um akkurate Vorhersagen treffen zu können. Mithilfe der Photogrammetrie geben uns Drohnen die Möglichkeit, auf günstigem, schnellem und sicherem Wege regelmäßig neue Karten zu erstellen. Hierzu fliegt die Drohne den zu kartierenden Bereich ab und schießt eine große Anzahl Fotos, die jeweils einen überlappenden Bereich mit dem nachfolgenden Bild haben. Computerprogramme nutzen dann diese überlappenden Bereiche, um die Fotos zu 3D-Modellen zusammenzusetzen, aus denen dann digitale Höhenmodelle berechnet werden können.

Durch den zunehmenden Einsatz von Drohnen und ihre wachsende Leistungsfähigkeit werden außerdem immer mehr Messgeräte speziell für den flugbasierten Einsatz entwickelt. So werden zum Beispiel die Zusammensetzungen von Gasen analysiert, die an Vulkanen austreten und einen Rückschluss auf magmatische Vorgänge in der Tiefe sowie eventuell drohende Ausbrüche

geben können. Aber auch Wärmebildkameras und Magnetfeldmessgeräte werden bereits erfolgreich von Drohnen aus eingesetzt. Außerdem können bodenbasierte Geräte mit Drohnen in gefährliche Gebiete transportiert und dort abgesetzt werden. Nicht zuletzt spielt auch die Probennahme mithilfe von Drohnen eine immer größer werdende Rolle, auch wenn einige Methoden hier noch sehr experimentell sind. Die direkte Beprobung und Laboranalyse von Asche und Aerosolen aus Eruptionswolken oder auch Wasser aus Kraterseen kann uns einmalige Einblicke in das Vulkansystem bieten.

Viele technische und leider auch bürokratische Herausforderungen halten Vulkanologen, die diese immer noch recht neue Technologie in ihrer Arbeit nutzen, weiterhin ordentlich auf Trab. Trotzdem haben sich Drohnen in den letzten Jahren zu einem wichtigen Werkzeug für die Forschung, Überwachung, und Vorhersage von Vulkangefahren entwickelt – und ihre rasante Weiterentwicklung verspricht weitere große Errungenschaften in der Zukunft. Sie bieten uns bisher nie dagewesene Einblicke und haben viele Arbeiten der Observatorien sicherer, einfacher und letztlich auch preisgünstiger gemacht. Damit spielen sie eine direkte Rolle im Krisen- und Risikomanagement in Vulkangebieten und unterstützen so die Sicherheit von Menschen, die in der Nähe von Vulkanen leben, arbeiten oder forschen.

## Referenzen

- James, M. R., Carr, B. B., D'Arcy, F., Diefenbach, A. K., Dietterich, H. R., Fornaciai, A., Lev, E., Liu, E. J., Pieri, D. C., Rodgers, M., Smets, B., Terrada, A., von Aulock, F. W., Walter, T. R., Wood, K. T. & Zorn, E. U. (2020). Volcanological applications of unoccupied aircraft systems (UAS): Developments, strategies, and future challenges. *Volcanica*, 3(1), 67-114, doi:10.30909/vol.03.01.67114

## Fernerkundung aktiver Vulkane mit Kleinsatelliten

Prof. Dr. Dieter Oertel (Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH)

**Eine Demonstrator-Mission anlässlich des Stromboli-Ausbruchs von 2014 zeigt, dass Kleinsatelliten neue Möglichkeiten für das Vulkanmonitoring bieten.**

- Vulkanausbrüche lassen sich auch aus dem Orbit beobachten. Das ist insbesondere hilfreich, wenn keine Bodenstationen vorhanden sind.
- Für die Ermittlung der Lavaaustritts-Rate ist eine gute Bodenauflösung nützlich. Kleinsatelliten bieten hier neue Möglichkeiten für das Monitoring.
- Eine Symbiose der Daten zukünftiger „feuer- und lavatauglicher“ Infrarot-Sensoren auf geostationären meteorologischen Satelliten und auf Kleinsatelliten, die in einem niedrigen Erdumlauf fliegen, kann zu einer neuen Qualität im Monitoring von Vulkanen führen.

Vulkanausbrüche sind natürliche Hoch-Temperatur-Ereignisse (HTE) mit zum Teil dramatischen Auswirkungen auf Umwelt, Gesundheit, Landwirtschaft und Luftverkehr. Deshalb ist es interessant zu wissen, welche Information bzw. welche physikalischen Messwerte über diese Vulkanausbrüche und die damit verbundenen Phänomene aus Satellitendaten gewonnen werden können.

Zu diesen für die Fernerkundung aus dem Orbit interessanten Phänomenen zählen zum Beispiel Gas- und Aschewolken, Lavaströme oder pyroklastische Ströme.

Unter den Fernerkundungssatelliten sind besonders solche für die Beobachtung aktiver Vulkane geeignet, die über Sensoren im Bereich infraroter Wärmestrahlung (IR=Infrarot) verfügen. Konkret sind das Satellitensensoren, die bildhafte Daten in den Wellenlängenbereichen des Mittleren IR (MIR, bei 3–5  $\mu\text{m}$ ) und des Thermalen IR (TIR, bei 8–12  $\mu\text{m}$ ) bei Tag und auch nachts generieren können.

Die Systeme MODIS und SLSTR erreichen in den Spektralbändern des Mittleren InfraRot (MIR) und Thermalen InfraRot (TIR) nur eine maximale räumliche Auflösung von größer als einem Kilo-

meter. Für die zuverlässige Abschätzung etwa der bei einem Vulkanausbruch ausströmenden Lavamasse ist das zu grob.

### Satellitensensoren zur infraroten Beobachtung aktiver Vulkane

Es gibt weltweit derzeit mehrere operationell betriebene, von Pol zu Pol die Erde umkreisende Infrarot-Satellitensensoren, die neben vielen anderen Anwendungen auch zur infraroten Beobachtung aktiver Vulkane im „24/7“-Dauerbetrieb genutzt werden. Drei der wichtigsten Infrarot-Satellitensensoren davon sind:

- das MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) der NASA,
- das Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) von NOAA und NASA und
- das Sea Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) des europäischen Copernicus Programms (Wooster et al., 2012).

Die Daten, die MODIS, VIIRS und SLSTR erzeugen, sind kostenlos verfügbar. Alle drei Systeme werden weltweit als Wächter und Melder insbesondere von Ausbrüchen entlegener Vulkane genutzt. Zum Beispiel befinden sich zahlreiche

sehr aktive Vulkane in den Anden. Dort können sie kaum oder gar nicht von bodengebundenen Sensoren permanent überwacht werden.

Das VIIRS hat in seinem MIR-Band „I 4“ eine bessere räumliche Auflösung von kleiner als 400 Metern, jedoch nur in seinem zentralen Schwadbereich von 1.000 km Breite. In der Fachsprache meint „Schwad“ den Aufnahmestreifen, den ein Sensor über der Erdoberfläche erfasst. Die Breite dieses Streifens ist die Schwadbreite. Allerdings übersteuern die MIR-Daten des VIIRS bei Pixeltemperaturen von über 367 Kelvin bzw. 94° Celsius („Pixelsättigung“). Das bedeutet, dass sie bei stärkeren vulkanischen Aktivitäten nicht für deren physikalisch-energetische Bewertung verwendet werden können, da diese eine Pixeltemperatur von 100° Celsius schnell überschreiten.

### Kleinsatelliten können eine Lücke stopfen

Es gibt also eine „Infrarot-Beobachtungslücke“ im Fernbeobachtungsangebot der „großen“, institutionellen Raumfahrtakteure. In dieser Nische kommen immer stärker Kleinsatelliten zum Einsatz.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), die Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH („Astrofein“) und weitere deutsche mittelständige Unternehmen sowie wissenschaftliche Partner haben mit drei Kleinsatelliten-Missionen essentielle Beiträge zur Feuerbeobachtung und quantitativen Bewertung von Hoch-Temperatur-Ereignissen (HTE) geleistet:

- erstens die Demonstrator-Mission Bi-spectral InfraRed Detection (BIRD), die 2001 zur dedizierten Detektion und Bewertung von Feuern gestartet und bis 2004 betrieben wurde (Oertel et al., 2002),
- zweitens den Satelliten Technologie-Erprobungs-Träger N°1 (TET-1), der 2012 gestartet und im Anschluss an seine einjährige Mission zur Erprobung diverser Technologien bzw. Testnutzlasten (On-Orbit-Verification, OOV) für fast sechs Jahre als Feuerbeobachtungssatellit im Rahmen der DLR-

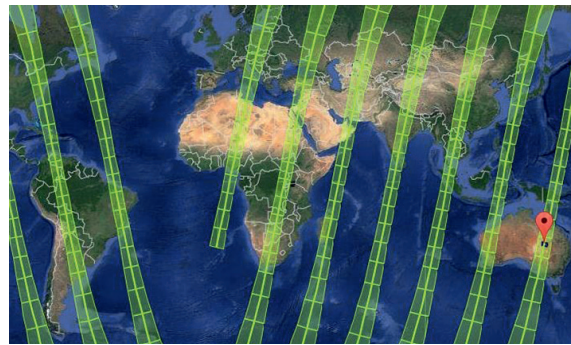


Abb. 1: Beispiel für Bodenspuren des TET-1. Links sind drei Tagspuren und rechts sieben Nachts Spuren gezeigt. Die Abbildung wurde mit Planungswerkzeug SPOT (SwathPreview & OrderingTool) erstellt, welches vom DLR-GSOC (German Space Operation Center) entwickelt wurde (Lorenz et al., 2017, S. 106 f.). Bild: DLR/GSOC

FireBIRD-Mission genutzt wurde, (Lorenz et al., 2017), sowie

- drittens den Feuerbeobachtungssatellit Berlin InfraRed Optical System (BIROS), der 2016 gestartet wurde und zusammen mit TET-1 in der FireBIRD-Mini-Konstellation die Erde umkreist.

Diese drei Kleinsatelliten – BIRD, TET-1 und BIROS – wurden aus Kostengründen „Huckepack“ (engl. „piggy back“) mit anderen Satelliten in polare Bahnen von 500 bis 560 Kilometer Höhe gestartet. Sie umlaufen die Erde in einem Low Earth Orbit (LEO) von Pol zu Pol. Die Erde dreht sich quasi unter ihnen weg, sodass ihre auf eine Erdkarte aufgetragene Bodenspuren sich in einer Art Wellenkurve darstellen. Dies zeigt Abbildung 1 für einen Weltkartenausschnitt.

Im Unterschied zu den operationellen Sensorsystemen MODIS, VIIRS und SLSTR, die zwar eine tägliche globale Überdeckung gewährleisten, dafür aber nur größere vulkanische Aktivitäten erkennen und grob bewerten können, erlauben die FireBIRD-Satelliten die Erfassung und physikalisch-energetische Bewertungen von sehr kleinen bis zu großen vulkanischen Aktivitäten.

Mit TET-1 und BIROS sind Wiederholraten von zwei bis drei Tagen erreichbar, auch für niedere

|  | MODIS                              | VIIRS  | SLSTR                                    | FireBIRD                                    |
|--|------------------------------------|--|--|---|
| Gestartet im Jahr [Satellit]   | 1999 [Terra]<br>2002 [Aqua]        | 2011<br>[Suomi National Polar-orbiting Partnership]                                    | 2015 [Sentinel 3A]<br>2018 [Sentinel 3B] | 2012 [TET-1]<br>2016 [BIROS] <sup>(1)</sup> |
| Bahnhöhe   | 705 km                             | 829 km   | 815 km                                   | 500–560 km                                  |
| Aufnahme-Schwadbreite  | 2.330 km                           | 3.060 km   | 1.407 km                                 | 162–178 km                                  |
| MIR- und TIR-Boden-pixel-Kantenlänge (im Nadirbereich)                       | 1.000 m<br>(+/- 500 km um Nadir)   | 375 m<br>(+/- 500 km um Nadir)   | 1.000 m<br>(im gesamtem Schwad)          | 320–356 m<br>(im gesamtem Schwad)           |
| MIR- und TIR-Pixel-Sättigungstemperatur                                      | MIR: 450 Kelvin<br>TIR: 400 Kelvin | MIR: 367 K,<br>TIR: 300 K<br>(Sättigung im MIR und TIR bei großen HTEs) <sup>(4)</sup> | MIR: 500 Kelvin<br>TIR: 400 Kelvin       | MIR: 630 Kelvin<br>TIR: 600 Kelvin          |
| Fläche des kleinsten im Nadir zu detektierenden 1.000 K HTE's <sup>(2)</sup> | ~150 m <sup>2</sup>                | ~20–30 m <sup>2</sup>  | ~150 m <sup>2</sup>                      | 15 -20 m <sup>2</sup>                       |
| Re-visit time <sup>(3)</sup>   | 12 Stunden                         | 12 Stunden   | 24 Stunden                               | 12 Stunden – 3 Tage <sup>(5)</sup>          |

**Tabelle 1. Merkmale und Parameter der zur Beobachtung von Hoch-Temperatur-Ereignissen (HTE) genutzten Infrarot (IR)-Bänder von MODIS, VIIRS, SLSTR und FireBIRD.**

(1) Beides sind Kleinsatelliten. (2) Bei 300 K, d. h. 27 °C Umgebungstemperatur. (3) Re-visit time ist der minimale Zeitabstand, in dem ein Ziel überflogen wird. (4) Das Problem der relativ niedrigen Sättigungstemperatur von 367 K beim VIIRS MIR Band I4 (Auflösung 375 m) wird in den operationellen Produkten der NASA dadurch umgangen, dass für die Ableitung der Energie (FRP oder VRP) Aufnahmen des Bands M13 herangezogen werden. M13 deckt den gleichen Wellenlängenbereich wie I4 ab, verfügt aber über eine bessere Sättigungstemperatur (659 K) bei allerdings gröberer Bodenauflösung (750 m). Bei der NASA führt man die Information beider Bänder zusammen, indem in der entsprechenden Auflösungszelle die Energie aus den gröber aufgelösten M13 Band gleichmäßig auf die im Band I4 detektierten Hotspots verteilt wird. (5) Die Re-visit-Time der Satelliten TET-1 und BIROS ist variabel durch den Blickwinkelschwenk um +/- 30° von Nadir, was auch eine Beobachtung eines Ziels an maximal drei aufeinanderfolgenden Tagen erlaubt.

**Erläuterung:** *MIR*: Mittleres Infrarot, *TIR*: Thermales Infrarot, *Nadir*: ein Punkt auf dem Boden, vertikal unter den Linsen eines Sensorsystems, *Schwad*: Breite des Aufnahmestreifens, gemessen auf der Erdoberfläche in Kilometern senkrecht zur Flugbahn.

Breiten. Hier kann die Blickrichtung ihrer Sensoren  $\pm 30^\circ$  nach rechts und links von Nadir geschwenkt werden. Somit ist ein Einzugsbereich von etwa 800 Kilometer möglich. Ein Vulkan kann an drei Tagen hintereinander beobachtet werden. Die Bodenauflösung Ground Sampling Distance, (GSD) beträgt ca. 350 Meter. Damit sind deutlich detailliertere Beobachtungen möglich als mit MODIS oder SLSTR.

### Die Beobachtung des Stromboli-Ausbruchs von 2014 mit TET-1

Stromboli ist eine Insel vulkanischen Ursprungs im Mittelmeer nördlich von Sizilien. Diese Insel besteht im Wesentlichen aus dem Stromboli-Vulkan, der durch seine regelmäßigen und häufigen Ausbrüche auch den Spitznamen „Leuchtturm des Mittelmeeres“ trägt.

Während eines größeren Ausbruchs zwischen August und November 2014 wurde der Stromboli von deutschen Vulkanologen vor Ort mit mehreren Infrarot-Kameras und aus dem Weltraum mit MODIS und dem deutschen Kleinsatelliten TET-1 beobachtet, was wissenschaftlich dokumentiert ist und die Grundlage für diesen Beitrag darstellt (Zaksek, Hort & Lorenz, 2015).

Es geht dabei um eine relativ zuverlässige Bestimmung der austretenden Lavamenge durch Monitoring des Stromboli-Ausbruchs mit dem FireBIRD Satelliten TET-1 im Rhythmus von ein bis drei Tagen über mehrere Monate im Jahr 2014.

Die austretende Lavamenge wird bei diesem Ansatz dadurch bestimmt, dass aus wiederholten infraroten Messungen von TET-1 über dem Lavafluss, die durchschnittliche zeitliche Lavaaustritts-Rate – die Time Averaged Lava Discharge Rate (TADR) – annäherungsweise ermittelt wird. TADR gibt einen Mittelwert dafür an, wie viel Kubikmeter Lava pro Sekunde ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) aus dem Vulkan zum Zeitpunkt der Satellitenaufnahme austreten.

Mithilfe der TADR-Werte kann die ausfließende Lavamenge zwischen zwei Messzeitpunkten (sog. „Stützpunkten“) berechnet werden. An-

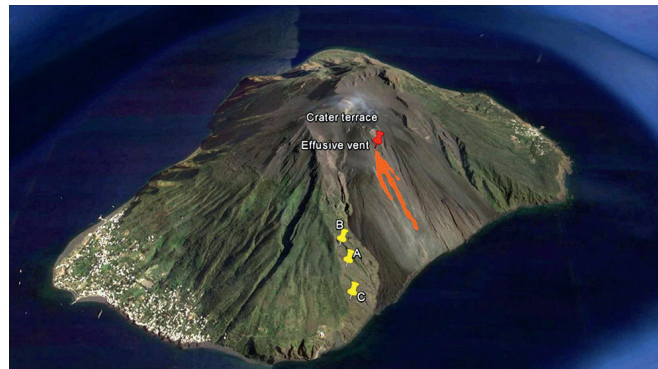
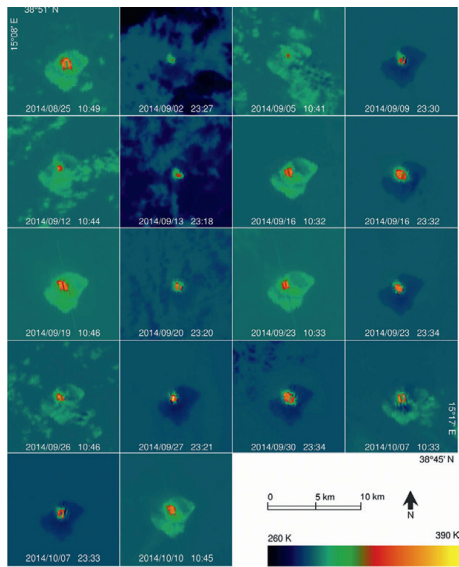


Abb. 2 zeigt eine Google-Earth-Ansicht des Stromboli, in der zusätzlich Krater, Lavaausflussort (rote Pin-Nadel), Lavaflüsse und vier terrestrische Beobachtungspunkte A, B, C und D vom 24. September 2014 (als gelbe Pin-Nadeln) dargestellt sind. Abbildung aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

ders gesagt, es wird zum Zeitpunkt X, für den ein TADR Wert von z. B.  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  ermittelt wurde, dieser mit dem zeitlichen Abstand zwischen Zeitpunkt X und dem nachfolgenden Zeitpunkt Y multipliziert. Angenommen dieser zeitliche Abstand ist 24 Stunden bzw. 86.400 Sekunden, dann beträgt die in diesem Tages-Zeitfenster ausgetretene Lavamenge  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  mal  $86400 \text{ s} = 17.280 \text{ m}^3$ . Das entspricht einem Fußballfeld, das 2,4 Meter hoch mit Lava gefüllt ist. Nach 60 Tagen mit gleichbleibender Lavaaustritts-Rate wäre dies ein 144 Meter hoher Lavaquader mit der Grundfläche eines Fußballfeldes.

### Faktenbasiertes Schätzen

Die zeitlich gemittelte Lavaaustritts-Rate wird aus wolkenfreien TET-1 Aufnahmen, Annahmen zur Umgebungstemperatur und zur Lava geschätzt. Die in die Schätzung eingehenden Annahmen zu Lava betreffen eine ganze Reihe von verschiedenen Werten. Das sind vor allem die Dichte und wärmephysikalischen Eigenschaften der Stromboli-Lava und die Lava-Temperaturen im Kern und an der Basis des Lavastroms. Die aus den TET-1 Daten abgeleiteten Parametern der heißen Lava sind die effektive Temperatur (T), die effektive Fläche (A) sowie die nach oben aufsteigende Strahlungsleistung, d. h. der Volcanic Radiant Power (VRP). „A“ ist also die wirkliche

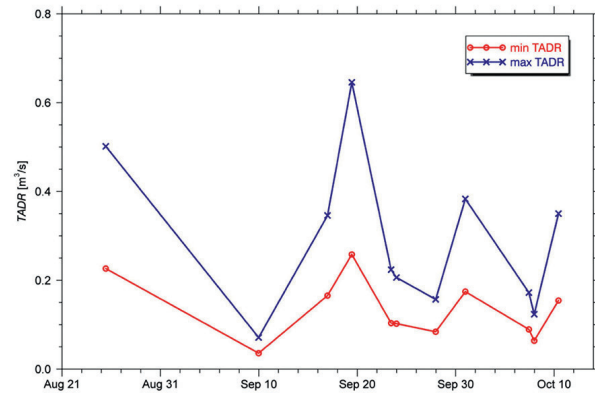


**Abb. 3:** Mosaik von 18 der TET-1 MIR-Band Bildfragmente des Stromboli-Ausbruchs mit Farbkodierung der Pixeltemperatur und Datumsangabe. Abbildung aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

heiße Fläche in einer Pixelfläche am Boden, denn in der Regel wird nicht das ganze Pixel mit einem heißen Medium ausgefüllt sein. Die effektive Fläche „A“, die ein Hoch-Temperatur-Ereignis (HTE) in einem Pixel belegt, ist für einen IR-Sensor mit einer Bodenauflösung von 300 m oder größer in der Regel viel kleiner als die gesamte Pixelfläche. Analog gilt, dass die effektive Temperatur „T“ am Boden somit wesentlich höher sein kann als die Pixelsättigungstemperatur. Bei Messungen über einen längeren Zeitraum kann die Umgebungstemperatur ebenfalls mithilfe der Thermaldaten der Satelliten bestimmt werden.

Vergleichbare Parameter werden auch bei der Fernerkundung von Waldbränden mit Infrarot-Satelliten gewonnen. Hier wird die nach oben aufsteigende Strahlungsleistung als Fire Radiative Power (FRP) bezeichnet (Oertel, Terzibaschian & Halle, 2019).

Insgesamt hat TET-1 den Stromboli-Ausbruch zwischen dem 25. August und dem 10. Oktober 2014 siebenundzwanzigmal aufgenommen. Allerdings fanden 17 Aufnahmen bei Wolkenbedeckung und nur 10 Aufnahmen ganz ohne Wolken



**Abb. 4:** Kurven der minimalen (rot) und maximalen (blau) Schätzwerte für die zeitlich gemittelten Lavaaustrittsraten. Anmerkung: In diesem Bild ist die Zeitskala auf der Ordinate gegenüber den entsprechenden Datumsangaben in Bild 2 und in Tabelle 2 um einen Tag nach rechts verschoben. Abbildung aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

statt. Abbildung 3 stellt ein Mosaik von 18 Bildfragmenten der Satellitenaufnahmen im MIR-Band dar, die in diesem Zeitraum registriert wurden. Die Farbkodierung zeigt dabei die Pixeltemperatur an. Tabelle 2 enthält für zehn wolkenfreie TET-1-Aufnahmedaten die effektive Temperatur und die effektive Fläche sowie die nach oben aufsteigende Strahlungsleistung der heißen Lava (VRP). Aufnahmen, auf denen Bewölkung zu erkennen ist, verfälschen die Ermittlung dieser Parameter der heißen Lava und werden deshalb zur Ermittlung der Lavaaustrittsraten und in Tabelle 2 nicht berücksichtigt.

Abbildung 4 zeigt zwei Kurven für die durchschnittlichen zeitlichen Lavaaustrittsraten (TADR), welche aus den in Tabelle 2 und Tabelle 3 für zehn zeitliche Stützpunkte angeführten Parametern ermittelt wurden. Der minimale oder der maximale Schätzwert ergeben sich daher, dass die in Tabelle 3 in den Spalten „Min TADR“ oder „Max TADR“ angegebenen maximalen oder minimalen angenommenen Werte zu den Eigenschaften der Lava verwendet werden und sich so am Ende daher eine maximale und eine minimale TADR-Kurve ergibt. Die maximale Lavaaustrittsraten gibt an, wie viel Kubikmeter heiße Lava pro Se-

| Date/Time        | T (K) | A (Ha) | VRP <sub>DB</sub> (MV) | VRP <sub>W</sub> (MW) |
|------------------|-------|--------|------------------------|-----------------------|
| 2014/08/25 10:49 | 572   | 3.2    | 182                    | 187                   |
| 2014/09/09 23:30 | 672   | 0.2    | 23                     | 36                    |
| 2014/09/16 23:32 | 587   | 1.7    | 105                    | 155                   |
| 2014/09/19 10:46 | 504   | 7.4    | 238                    | 167                   |
| 2014/09/23 10:33 | 583   | 1.3    | 78                     | 90                    |
| 2014/09/23 23:34 | 601   | 0.7    | 52                     | 102                   |
| 2014/09/27 23:21 | 966   | 0.1    | 62                     | 94                    |
| 2014/09/30 23:34 | 541   | 2.6    | 115                    | 150                   |
| 2014/10/07 10:33 | 724   | 0.3    | 49                     | 95                    |
| 2014/10/07 23:33 | 698   | 0.2    | 32                     | 68                    |
| 2014/10/10 10:45 | 539   | 2.7    | 117                    | 124                   |

**Tabelle 2:** Zehn zeitliche Stützpunkte aus wolkenfreien TET-1 Aufnahmedaten mit abgeleiteten Parametern für: Effektive Temperatur (T), effektive Fläche (A) und die nach oben aufsteigenden Strahlungsleistungen der heißen Lava (VRP). Tabelle aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

kunde höchstens ausgetreten sein können, die minimale folglich, wie viel Kubikmeter Lava pro Sekunde mindestens ausgetreten sind. Die Menge der austretenden Lava in Kubikmeter wird berechnet aus den TADR Stützwerten (in Kubikmeter pro Sekunde) multipliziert mit der Zeit (in Sekunden) zwischen zwei benachbarten Stützwerten.

Die gute räumliche Auflösung, die sehr hohe radiometrische Dynamik der MIR und TIR-Bänder und die Möglichkeit, den Blickwinkel des Sensors von TET-1 um +/- 30° von Nadir zu schwenken (Schwad), erlaubten es, bei dem großen Stromboli-Ausbruch im Jahr 2014 über einen Zeitraum von drei Monaten erstmals aus dem Weltraum das Volumen der austretenden Lava mit 7,4 Millionen Kubikmeter abzuschätzen (Zaksek, Hort & Lorenz, 2015). Das entspricht dem Volumen von sieben Lavaquadern, jeder mit der Grundfläche eines Fußballfeldes und 150 Metern Höhe.

## Vision

Die Bestimmung der ausströmenden Lavamenge beim Stromboli-Ausbruch im Jahr 2014 aus den Daten des Satelliten TET-1 war eine überzeugende

Demonstration, was mit „feuer- und lavatauglichen“ IR-Satellitensensoren vom FireBIRD-Typ beim quantitativen Monitoring von Lavaströmen prinzipiell möglich ist.

Bald kommen neue geostationäre meteorologische Satellitensensorsysteme zum Einsatz, die „feuer- und lavataugliche“ MIR-Bänder mit einer stark verbesserten Bodenauflösung von einem Kilometer im Bereich niedriger Breiten (< 30° Nord oder Süd) haben werden. Dazu zählt der Flexible Combined Imager (FCI) auf dem Satelliten Meteosat Third Generation-Imager (MTG-I), der voraussichtlich 2022 gestartet wird. Die FCI-Daten werden mit einer Wiederholperiode von zehn Minuten aufgenommen und zur EUMETSAT-Bodenstation in Darmstadt gesendet.

Damit werden ab dem Jahr 2022 über Afrika und Südeuropa ungesättigte MIR- und TIR-Daten von Feuern und aktiven Vulkanen im 10-Minuten-Takt mit Bodenaufösungen bereitgestellt, welche bisher nur von den polar-orbitierenden, also von Pol zu Pol umlaufenden, operationellen Sensorsystemen MODIS, VIIRS und SLSTR ein oder zwei Mal am Tag geliefert werden. FCI wird so zu einem „sehr aufmerksamen Wächter und

| Parameter   | Min TADR               | Max TADR                           |
|---|------------------------|------------------------------------|
| $T_{amb}$ ambient air temperature                                     |                        | 303 K                              |
| $T_{core}$ lava core temperature                                      |                        | 1273 K                             |
| $T_{base}$ flow base temperature                                      |                        | 773 K                              |
| $k$ lava thermal conductivity   | 0 W/m <sup>2</sup> /K  | 1.5 W/m <sup>2</sup> /K            |
| $h_c$ convective heat transfer coefficients                           | 10 W/m <sup>2</sup> /K | 15 W/m <sup>2</sup> /K             |
| $\rho$ lava density   | 2340 kg/m <sup>3</sup> | 2030 kg/m <sup>3</sup>             |
| $c_p$ lava specific heat capacity                                     | 1035 J/kg/K            | 900 J/kg/K                         |
| $\Delta T$ temperature diff. between eruption and solidus temperature | 350 K                  | 200 K                              |
| $f$ mass fraction of post eruption crystallization                    |                        | 0.45                               |
| $L$ latent crystallization heat                                       |                        | $3.5 \times 10^5$ J/m <sup>3</sup> |
| $h$ thickness of thermal boundary layer                               |                        | 1 m                                |

**Tabelle 3:** A-priori-Annahmen zur Abschätzung der minimalen und maximalen Werte für die durchschnittlichen zeitlichen Lavaaustritts-Raten (TADR). Tabelle aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

Melder“ von Bränden und Vulkanausbrüchen über Europa und Afrika. Die mit dem FCI gewonnenen Daten könnten genutzt werden, um die Blickrichtung von BIROS und/oder zukünftiger in einem niedrigen Erdumlauf fliegender „feuer- und lavatauglicher“ Kleinsatelliten mit einer Bodenaufklärung von ca. 300 Meter auf ausgewählte Feuer oder aktive Vulkane zu richten.

Möglich wäre es damit also, punktuell die Bodenaufklärung des FCI in seinen „feuer- und lavatauglichen“ MIR- und TIR-Bändern zu „schärfen“, indem man im Bedarfsfalle den BIROS-Satelliten oder vergleichbare Systeme bei ihrer Datenaufnahme so ausrichtet, dass Gebiete von besonderem Interesse räumlich detaillierter erfasst werden.

Die aus diesen mit z. B. 300 Meter Bodenaufklärung abgeleiteten Werte für die nach oben aufsteigende Strahlungsleistung eines Feuers oder eines Vulkanausbruchs (FRP oder VRP) können verwendet werden, um für dieses Feuer oder diesen Vulkanausbruch die jeweils zeitlich dazu passenden, aus den FCI-Daten abgeleiteten FRP- oder VRP-Werte wesentlich präziser zu bestimmen. Eine solche Prozedur wird in der Erdbeobachtung als „aufwärts-skalieren“ (engl. up-scaling) bezeichnet.

Für Stromboli- oder Ätna-Ausbrüche nach 2022 könnte man die z. B. einmal täglich mit BIROS und/oder einem vergleichbaren Kleinsatelliten mit feuer- und lavatauglichem IR-Sensor gewonnenen VRP-Werte durch VRP-Werte ergänzen, die im 10-Minuten-Takt aus den räumlich größeren FCI-Daten abgeleitet werden. Diese FCI-VRP-Werte können mit den präziseren VRP-Werten – abgeleitet z. B. aus BIROS-Messungen – „aufskaliert“ werden. Da die FCI-Daten über dem Vulkan im 10-Minuten-Takt gewonnen werden, sind mögliche kurzzeitige Schwankungen oder „Ausreißer“ in der Lavaaustritts-Rate viel besser zu überwachen als bei Aufnahmen mit einem zeitlichen Abstand von zwei aufeinander folgenden Meßüberflügen von einem Tag oder länger.

Es könnte durch diese Symbiose eine völlig neue Qualität bei der Beobachtung von Hoch-Temperatur-Ereignissen wie Vegetationsfeuern oder Vulkanausbrüchen und ihrer quantitativen Bewertung erreicht werden. Der Weg dorthin wäre die hier skizzierte Synthese der Hoch-Temperatur-Ereignis-Daten von zukünftigen geostationären meteorologischen Satellitensensoren, wie etwa dem MTG/FCI, mit den örtlich und zeitlich dazu passenden räumlich höher aufgelösten Daten von Kleinsatelliten-Konstellationen vom FireBIRD-Typ.

## Referenzen

- Halle, W., Terzibaschian, T. & Lorenz, E. (o.D.). FireBIRD [www.dlr.de]. Aufgerufen am 06.07.2020.
- Lorenz, E., Halle, W., Fischer, C., Mettig, N. & Klein, D. (2017). Recent Results of the Firebird Mission. *The International Archives of Photogrammetry, Remote sensing and Spatial information Sciences (XLII-3/W2)*, 105 -111. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-105-2017
- Oertel, D., Briess, K., Lorenz, E., Skrbek, W. & Zhukov, B. (2002). Fire Remote Sensing by the Small Satellite on Bi-spectral Infrared Detection (BIRD). *Photogrammetrie, Fernerkundung & Geoinformation*, 5, 341-350.
- Oertel, D., Terzibaschian, T. & Halle, W. (2019, 24. Dezember). FireBIRD sieht Waldbrände mit Adleraugen. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 6. doi:10.2312/eskp.007
- Wooster, M. J., Xu, W. & Nightingale, T. (2012). Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: Pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets. *Remote Sensing of Environment*, 120, 236-254. doi:10.1016/j.rse.2011.09.033
- Zaksek, K., Hort, M. & Lorenz, E. (2015). Satellite and Ground Based Thermal Observation of the 2014 Effusive Eruption at Stromboli Volcano. *Remote Sensing*, 7(12), 17190-17211. doi:10.3390/rs71215876

## Verbesserte Abschätzung von Vulkanemissionen mit Satelliten und Supercomputing

Dr. Philipp Franke, Dr. Anne Caroline Lange

(Forschungszentrum Jülich FZJ - Institut für Energie- und Klimaforschung IEK-8)

Dr. Sabine Griessbach, Dr. Lars Hoffmann (Forschungszentrum Jülich FZJ - Jülich Supercomputing Centre JSC)

**Mit besonders schnellen Computern, wie es sie am Forschungszentrum Jülich gibt, lassen sich Satellitendaten und Atmosphärenmodelle kombinieren, um so die Ausbreitung von Vulkanasche und Vulkangasen noch besser vorauszusagen.**

- Wie es der Ausbruch des Eyjafjallajökull gezeigt hat, können Vulkanausbrüche überraschend gravierende Folgen für den Luftverkehr über ganz Europa haben.
- Ausbreitungssimulationen und Satellitenbeobachtungen können dabei helfen betroffene Gebiete zu erfassen und Risiken abzuschätzen.
- Supercomputing hilft, die Möglichkeiten der Fernbeobachtung aus dem Orbit und der Ausbreitungsmodellierung weiter zu verbessern.

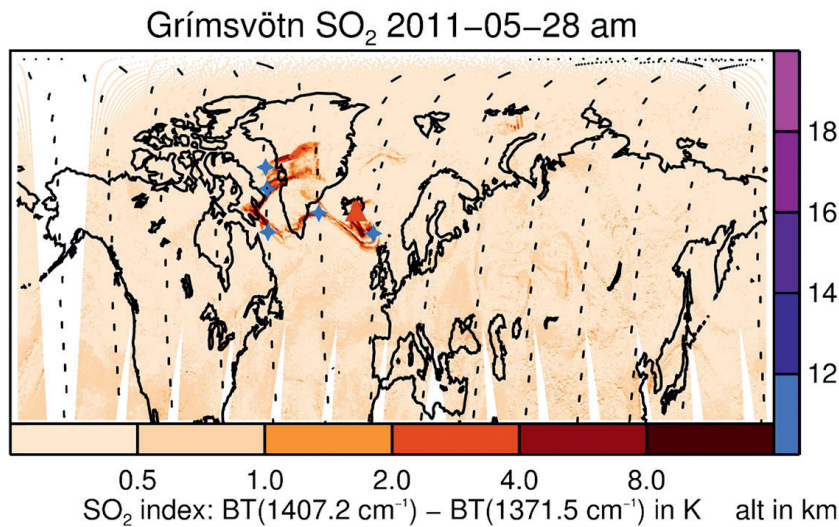
Vulkanemissionen in die Erdatmosphäre können sich erheblich auf Umwelt und Klima auswirken und auch schnell das Leben der Menschen durcheinanderwirbeln, wie der Vulkanausbruch des Eyjafjallajökull auf Island vor einigen Jahren gezeigt hat. Atmosphärenforscher und Computerwissenschaftler in Jülich beschäftigen sich mit der Verbesserung der Auswertung von Satellitenbeobachtungen und der inversen Modellierung, die durch Nutzung der Satellitenbeobachtungen eine Abschätzung von Vulkanemissionen ermöglicht, sowie der effizienten Nutzung von Supercomputern für diese Arbeiten.

### Vulkanasche und Luftverkehr

Vulkanasche stellt eine große Gefahr für den Luftverkehr dar, denn ihr Schmelzpunkt liegt im Bereich der Betriebstemperatur von Turbinentriebwerken und kann im schlimmsten Fall deren Ausfall bewirken. Des Weiteren können sich vulkanische Partikel und Gase stark auf die Gesundheit, die Umwelt und das Klima auswirken. Während des explosiven Ausbruchs des Vulkans

Eyjafjallajökull in Island im April und Mai 2010 kam es zu tagelangen Sperrungen des europäischen Luftraums. Die global-wirtschaftlichen Verluste in Folge dieses Vulkanausbruchs werden auf 4,7 Milliarden US-Dollar beziffert (Oxford Economics, 2010). Infolgedessen gab es zahlreiche Diskussionen, ob die Luftraumsperrung in diesem Umfang gerechtfertigt war.

Die Entscheidung zu Flugverboten wurde auf Grundlage von Ausbreitungsmodellen getroffen. Diese Modellberechnungen basieren meist nur auf groben Abschätzungen der Vulkanemissionen und beinhalten oft große Unsicherheiten. Im Falle des Eyjafjallajökulls standen verlässliche Abschätzungen der wichtigsten Parameter wie Emissionsstärke und Emissionshöhe nicht zeitnah zur Verfügung. Anfänglich fehlten viele wichtige Beobachtungen vom Boden, von Flugzeugen oder von Satelliten, über die man Emissionsparameter hätte ableiten können.



**Abb. 1:** Satellitenbeobachtungen des Grímsvötn Vulkanaerosols am Vormittag des 28. Mai 2011. Die AIRS-SO<sub>2</sub>-Messungen sind in Rottönen dargestellt. Je dunkler die Farbe, desto höher die SO<sub>2</sub>-Konzentration. Die MIPAS-Orbitspur ist durch schwarze gestrichelte Linien markiert. Die MIPAS-Aerosoldetektionen liegen zwischen 10 und 12 Kilometer und es handelt sich um Sulfataerosol (blaue Sternchen). „The analysis was supported by ESA within the framework of the „Particulate matter in the upper troposphere and stratosphere“ project (grant no. 400011677/16/NL/LvH).“

## Satellitenbeobachtungen

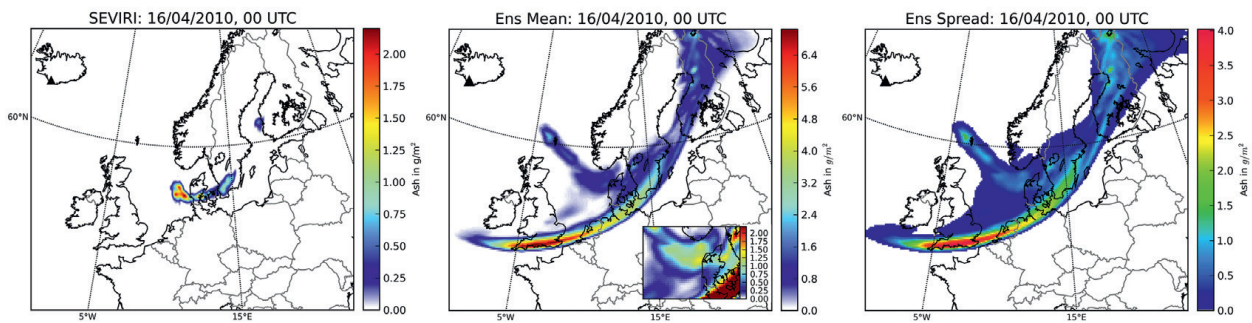
Nach dem Ausbruch des Eyjafjallajökull erfuhr die satellitengestützte Beobachtung von Vulkanemissionen einen neuen Schub. Geostationäre Satelliteninstrumente wie z. B. SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) befinden sich stationär über einem Punkt am Äquator und vermessen mit einer hohen zeitlichen Auflösung die stets gleiche Region über der Erdkugel.

Daneben gibt es polarumlaufende Satelliteninstrumente, wie z. B. AIRS, IASI, CALIOP oder MIPAS. Sie umkreisen die Erde in einem niedrigeren Orbit, sodass ihre Beobachtungen die Erde global abdecken. Allerdings ist dadurch die zeitliche Auflösung geringer. Instrumente wie SEVIRI, AIRS und IASI verwenden die sogenannte „Nadir-Blickrichtung“. Das heißt, sie schauen mit ihren Messgeräten senkrecht nach unten. Dadurch erreichen sie eine hohe räumliche Auflösung, aber die Information über die vertikale Verteilung ist beschränkt. Eine Ausnahme ist CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization), das mithilfe eines aktiven Lasers in Nadir-Richtung

hochaufgelöste Vertikalprofile entlang des Orbitalpfads liefert und zur Vermessung von Wolken und Aerosolen dient, allerdings mit eingeschränkter horizontaler Auflösung.

Instrumente wie MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) vermessen die Atmosphäre tangential, in „limb“-Richtung. Solche Systeme betrachten die Erde von der Seite; sie schauen quasi auf ihr Antlitz. Unser Planet sieht wie ein Kreis aus und die Erdatmosphäre umgibt ihn wie eine Hülle. Tangential vermessende Systeme liefern so auch Vertikalprofile entlang des Orbitalpfads mit ebenfalls begrenzter horizontaler Auflösung.

Satellitenmessungen im infraroten Spektralbereich sind besonders interessant, denn neben Vulkanasche können hier auch die Konzentrationen vieler Spurengase erfasst werden (siehe auch den ESKP-Beitrag Oertel et al., 2019). Vulkane emittieren oftmals große Mengen Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), welches chemisch in klimarelevantes Sulfataerosol umgewandelt wird. SO<sub>2</sub> kann zur Kontamination der Luft in einem Flugzeug führen.



**Abb. 2:** Analyse der vertikal integrierten Vulkanaschekonzentration von der initialen Eruptionsphase des Eyjafjallajökull am 16.04.2010, 00 UTC. Links: SEVIRI-Beobachtung; Mitte: Ensemblemittel, die Vergrößerung zeigt die Vulkanaschekonzentration über der Nordsee nordwestlich von Dänemark; rechts: Standardabweichung der Ensemblemitglieder. (Quelle: Lange, 2018)

Mithilfe von umfangreichen Datenanalysen gelang es Forschenden am Jülich Super Computing Center, bestehende Methoden zur Entdeckung von Vulkanasche und  $\text{SO}_2$  für das NASA Satellitengerät AIRS deutlich zu verbessern (Hoffmann et al., 2014). Für das europäische Instrument MIPAS wurden Detektionsmethoden für Asche und Sulfataerosol ganz neu entwickelt (Griessbach et al., 2014, 2016). Die wissenschaftlichen Datenprodukte von AIRS, MIPAS und weiteren Satelliteninstrumenten werden inzwischen in Echtzeit ausgewertet und sind für alle frei zugänglich (AIRS, 2020; MIPAS, 2019; Support to Aviation Control Service, 2018). Ein Beispiel für die Charakterisierung einer Vulkanemissionswolke ist in Abbildung 1 für den Ausbruch des Grimsvötn auf Island im Mai 2011 zu sehen. Die mit AIRS gewonnenen Schwefeldioxid-Daten zeigen die horizontal filamentartige (fadenartige) Struktur der Vulkanwolke. MIPAS liefert Informationen über die Höhe und Zusammensetzung der vulkanischen Wolke. Dies ist ein schönes Beispiel für den Nutzen kombinierter Datensätze.

### Inversive Modellierung

Die Satellitenbeobachtungen und Atmosphärenmodelle bieten die Möglichkeit mittels sogenannter „inverser Modellierung“ Abschätzungen über die Konzentration der Vulkanemissionen zu erhalten (Wilkins et al., 2016). Hierbei werden Modelle und Beobachtungen über mathematische Algorithmen vereint, um optimale Analy-

sen unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehender Informationen zu erstellen. Am Institut für Energie und Klimaforschung – Troposphäre (IEK-8) des Forschungszentrums Jülich wird hierzu das Modell EURAD-IM (EUROPEAN Air pollution Dispersion – Inverse Model, Elbern et al., 2007; Elbern, 2014) mit dem vier-dimensionalen variationellen Datenassimilationsverfahren (4D-var) eingesetzt.

Das EURAD-IM ist ein regionales Chemie-Transport-Modell, d. h. es werden Gase und Aerosole in der unteren Atmosphärenschicht (Troposphäre) unter Berücksichtigung der atmosphären-chemischen und physikalischen Prozesse berechnet sowie deren Ausbreitung simuliert. Das 4D-var Verfahren nutzt Beobachtungen der Atmosphäre, z. B. von Satelliten, um verbesserte Analysen der Eingangsvariablen des Modells, z. B. der Emissionen, zu ermitteln. Ausbreitungssimulationen von Vulkanemissionen mit dem EURAD-IM sind im Internet einsehbar (Friese et al., 2014; Institut für Energie- und Klimaforschung, Troposphäre, o.D.).

Bei der 4D-var Methode werden die modellierten Konzentrationen der Vulkanemissionen in einem bestimmten Zeitraum mit den Beobachtungen verglichen und unter Berücksichtigung der jeweiligen Fehler derart korrigiert, dass sich eine optimale Übereinstimmung ergibt. Hierbei werden die zugrunde liegenden Eingangsdaten des Modells, d. h. die Anfangswerte oder Vulkan-

emissionen optimiert, sodass sich eine physikalisch konsistente Simulation für den gesamten Zeitraum sowie eine bestmögliche Abschätzung der Vulkanemissionen ergeben.

Entscheidungssträger, wie etwa die Flugsicherheitsbehörden, sind bei Ausbreitungssimulationen von Vulkanasche vor allem an der Güte der Analyse interessiert, also am Vorhersagefehler. Am Institut für Energie und Klimaforschung (IEK-8) wurde daher eine Methode entwickelt, die mittels sogenannter Ensemble-simulationen die Unsicherheit der Analyse berechnet (Franke, 2018). Ein Ensemble besteht hierbei aus einem Satz unterschiedlicher Modellläufe, die im Falle der Vulkananalyse unterschiedliche Emissionsdaten berücksichtigen. Das Analyseergebnis wird dann als Kombination der Ensemblemitglieder (einzelne Modellsimulationen, denen unterschiedliche Emissionsdaten zugrunde liegen) ermittelt, welche durch den Vergleich mit beobachteten Konzentrationen von Vulkanasche, SO<sub>2</sub> oder Sulfataerosol optimiert werden.

Um die Fähigkeiten des umfassenden Analyse-systems zu optimieren, wurde es auf die frühe Eruptionsphase des Eyjafjallajökull-Ausbruchs im April 2010 angewandt (Lange, 2018). Hierbei wurde das Emissionsprofil durch Satellitenbeobachtungen der vertikal integrierten Vulkanaschekonzentration ermittelt.

Abbildung 2 zeigt den Vergleich zwischen der Aschekonzentration der SEVIRI-Beobachtung (links) und des simulierten Ensemblemittels (Mitte) sowie deren Standardabweichung (ein Maß für den Unterschied der verschiedenen Ensemblemitglieder, rechts) als Unsicherheitsmaß am 16. April 2010 um 00 UTC. Während das Ensemblemittel die Vulkanaschekonzentration über Südschweden sehr gut reproduziert, wird diese über der Nordsee um ca. 0,5–0,7 g/m<sup>2</sup> deutlich unterschätzt. Allerdings zeigt die hohe Standardabweichung von 1 g/m<sup>2</sup>, dass hier einerseits eine große Unsicherheit bezüglich der tatsächlichen Aschemenge unter den Ensemblemitgliedern herrscht, andererseits aber einige Ensemblemitglieder höhere Vulkan-

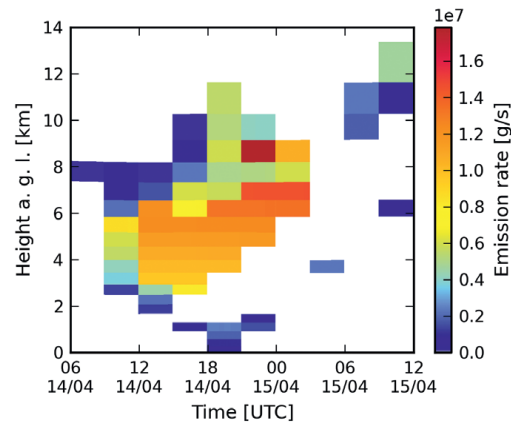


Abb. 3: Exemparisches Emissionsprofil des Ausbruchs des Eyjafjallajökull eines Ensemblemitglieds während der initialen Phase am 14. und 15. April 2010. (Quelle: Lange, 2018)

aschekonzentrationen simulieren. Somit liegen die Beobachtungen innerhalb der Spannweite der von dem Ensemble simulierten Konzentrationen.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Vulkanascheemissionen eines Ensemblemitglieds. In den ersten Tagen der Eyjafjallajökull-Eruption im April 2010 wurde die Vulkanasche hauptsächlich am 14. April 2010 zwischen 12 UTC und 00 UTC in Höhen zwischen 3 km und 9 km emittiert, wobei mit fortschreitender Eruptionsdauer die Emissionshöhe anstieg (vgl. auch Kristiansen et al., 2012; Arason et al., 2011).

### Supercomputing

Obwohl die 4D-var Methode sicher eine der besten und genauesten Methoden zur Abschätzung von Vulkanemissionen ist, gibt es bei ihrer Nutzung dennoch ein großes Hindernis. Die Methode ist extrem rechenaufwändig und erfordert den Einsatz von Supercomputern. Dabei handelt es sich um besonders leistungsfähige Computer mit besonders vielen Prozessoren. Die Ensemble-simulationen mit EURAD-IM bieten hier den immensen Vorteil, dass sie weitgehend getrennt voneinander berechnet und daher auf einer Vielzahl von Rechenkernen parallel verteilt werden können. Erst der Einsatz von Höchstleistungsrechnern, wie sie etwa durch das Jülich Supercomputing Centre (JSC) betrieben werden, er-



**Abb. 4:** Der Supercomputer „JUWELS“ am Forschungszentrum Jülich steht durch den Einsatz von Grafikkarten kurz vor dem Ausbau zu einem der stärksten Höchstleistungsrechner in Europa (Forschungszentrum Jülich, 2019).  
Foto: Forschungszentrum Jülich / R.-U. Limbach

möglichen damit die exakte Abschätzung und Ausbreitungssimulationen von Vulkanemissionen in nahezu Echtzeit.

Die Entwicklung von neuen und besseren Methoden wird durch die Infrastruktur an einem Höchstleistungsrechenzentrum, wie etwa dem JSC, erheblich vereinfacht. Neben der Rechenzeit, die für die Methodenentwicklung und Prozessierung der Rohdaten benötigt wird, wird auch ausreichend Speicherplatz für die Satellitendaten und Modellergebnisse benötigt. Neben dem Betrieb der Rechner unterstützt das JSC hierbei die Atmosphärenforscher mit fachlicher Expertise. Das Simulationslabor für Klimaforschung am JSC hilft den Forschern bei der Portierung ihrer Modellsysteme auf neue Rechnerarchitekturen, etwa zukünftige Generationen von Grafikprozessoren, sogenannte GPU-Systeme (Abbildung 4). So wird sichergestellt, dass die vorhandenen Ressourcen möglichst effizient genutzt werden.

Am Forschungszentrum Jülich sollen im Idealfall bei einem innereuropäischen Vulkanausbruch zeitnah Ausbreitungssimulationen mithilfe des EURAD-IM durchgeführt werden. Dabei wird der Transport der wichtigsten Vulkanemissionen wie Asche,  $\text{SO}_2$  und Sulfataerosol simuliert und die Ausbreitung über Europa anschließend evaluiert, um Gefahren für die Bevölkerung sowie den Flugverkehr besser abschätzen zu können. Das EURAD-IM ist in der Lage, unter Verwendung

von Satellitendaten die unsicheren Emissionsparameter zu optimieren und somit wahrheitsgetreue Ausbreitungsvorhersagen bereitzustellen. Zudem erlaubt die Nutzung von Ensembles eine Abschätzung der verbleibenden Unsicherheiten.

Das hochentwickelte Modellsystem weist hohe Anforderungen an Rechenkapazitäten auf, die durch die Anwendung auf Supercomputern (wie beispielsweise den Rechner JUWELS in Jülich) aufgefangen werden. Um in Zukunft noch schneller und noch zuverlässigere Vulkanausbreitungsvorhersagen bereitzustellen zu können, arbeiten die Wissenschaftler\*innen des IEK-8 und des JSC weiter gemeinsam an Fortschritten im Bereich von inverser Modellierung zur Abschätzung von Emissionen, besseren Satellitenbeobachtungen und Supercomputing.

## Referenzen

- AIRS/Aqua Observations of Volcanic Emissions. (2020, 23. April). [datapub.fz-juelich.de]. Aufgerufen am 23.04.2020.
- Arason, P., Petersen, G. N. & Bjornsson, H. (2011). Observations of the altitude of the volcanic plume during the eruption of Eyjafjallajökull, April-May 2010. *Earth System Science Data*, 3(1), 9-17. doi:10.5194/essd-3-9-2011
- Elbern, H. (2014). Eurad IM [eurad.uni-koeln.de]. Aufgerufen am 23.04.2020.
- Elbern, H., Strunk, A., Schmidt, H. & Talagrand, O. (2007). Emission rate and chemical state estimation by 4-dimensional variational inversion. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(14), 3749-3769. doi:10.5194/acp-7-3749-2007
- Forschungszentrum Jülich – FZJ. (2019, 6. Mai). Ein Turbolader für den Superrechner JUWELS [Pressemitteilung, www.fz-juelich.de]. Aufgerufen am 23.04.2020.
- Franke, P. (2018). *Quantitative estimation of unexpected emissions in the atmosphere by stochastic inversion techniques* (Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Köln). Verfügbar auf dem Kölner UniversitätsPublikationsServer.
- Friese, E., Nieradzik, L., Strunk, A & Elbern, H. (2014). Ausbruch des Vulkans Eyjafjalla 2010. Ausbreitung der Aschewolke über Europa [eurad.uni-koeln.de]. Aufgerufen am 23.04.2020.
- Griessbach, S., Hoffmann, L., Spang, R. & Riese, M. (2014). Volcanic ash detection with infrared limb sounding: MIPAS observations and radiative transfer simulations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(5), 1487-1507. doi:10.5194/amt-7-1487-2014
- Griessbach, S., Hoffmann, L., Spang, R., von Hobe, M., Müller, R. & Riese, M. (2016). Infrared limb emission measurements of aerosol in the troposphere and stratosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(9), 4399-4423. doi:10.5194/amt-9-4399-2016
- Hoffmann, L., Griessbach, S. & Meyer, C. I. (2014). Volcanic emissions from AIRS observations: detection methods, case study, and statistical analysis. *Proceedings SPIE*, 9242, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIX; and Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XVII, 924214. doi:10.1117/12.2066326
- Institut für Energie- und Klimaforschung, Troposphäre (IEK-8). (o.D.). ESKP. Wissensplattform „Erde und Umwelt“ – Earth System Knowledge Platform (ESKP) [www.fz-juelich.de]. Aufgerufen am 23.04.2020.
- Kristiansen, N. I., Stohl, A., Prata, A. J., Bukowiecki, N., Dacre, H., Eckhardt, S., ... Weinzierl, B. (2012). Performance assessment of a volcanic ash transport model mini-ensemble used for inverse modeling of the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D20). doi:10.1029/2011JD016844
- Lange, A. C. (2018). *Observability of Sudden Aerosol Injections by Ensemble-Based Four-Dimensional Assimilation of Remote Sensing Data* (Dissertation, Geowissenschaften, Universität Köln). Verfügbar auf dem Kölner UniversitätsPublikationsServer.
- MIPAS Aerosol and Cloud Profiles. (2019, 11. Juni). [datapub.fz-juelich.de]. Aufgerufen am 23.04.2020.
- Oertel, D., Terzibaschian, T. & Halle, W. (2019, 24. Dezember). FireBIRD sieht Waldbrände mit Adlerraugen. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 6. doi:10.2312/eskp.007
- Oxford Economics. (2010). The economic impacts of air travel restrictions due to the volcanic ash. A report prepared for Airbus [www.oxfordeconomics.com]. Oxford, UK.
- Support to Aviation Control Service – SACS. (2018, 31. Oktober). [sacs.aeronomie.be]. Aufgerufen am 23.04.2020.
- Wilkins, K. L., Benedetti, A., Kristiansen, N. I. & Lange, A. C. (2016). Chapter 13 – Applications of Satellite Observations of Volcanic Ash in Atmospheric Dispersion Modeling. In S. Mackie, K. Cashman, H. Ricketts, A. Rust & M. Watson (Hrsg.), *Volcanic Ash: Hazard Observation* (S. 233-246). Amsterdam/Oxford/Cambridge: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-100405-0.00019-7

## Konzepte für die Überwachung vulkanischer Seen

Interview mit Dr. Egbert Jolie (Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

**Nicht nur aktive Vulkane sollten kontinuierlich überwacht werden, auch von vulkanischen Seen können Gefahren ausgehen, die ein Monitoring notwendig machen. Wichtig zur Bewertung des Gefährdungspotentials und dem daraus resultierenden Risiko ist ein interdisziplinärer Monitoring-Ansatz. Hierzu gehören beispielsweise Verfahren zur Bestimmung von chemischen Parametern, Gasemissionen, der Wasser- wie auch Seebodentemperatur oder auch der Hangstabilität von Kraterflanken. Welche Parameter letztendlich entscheidend sind, hängt von den geologischen Gegebenheiten ab. Im Interview erläutert Dr. Egbert Jolie vom Deutschen GeoForschungsZentrum, auf was es beim Entwurf von Monitoring-Konzepten ankommt.**

- Ein geeignetes Monitoring vulkanischer Seen ist interdisziplinär und komplementär.
- Bathymetrische Vermessungen, die den Seeboden bildlich darstellen, helfen Störungszonen auszumachen, an denen heiße Fluide aufsteigen können.
- Seen, in denen sich vulkanische Gase über lange Zeit ansammeln können, sowie Kraterseen in aktiven Vulkanen, bei denen Magma in Kontakt mit Wasser kommen kann, sollten besonders gut überwacht werden.
- Die entwickelten Verfahren haben Relevanz für die Geothermie-Branche, die zukünftig geothermische Ressourcen im Off-shore-Bereich erkunden möchte.

**Wie unterscheidet sich die Überwachung eines vulkanischen Sees vom Monitoring eines Vulkans? Gibt es dabei grundlegende Unterschiede? Wenn ja, wovon sind diese abhängig?**

**Dr. Egbert Jolie:** Grundsätzlich hat das klassische Monitoring von Vulkanen natürlich auch einen Nutzen für die Überwachung vulkanischer Seen. Mit verschiedensten Verfahren können beispielsweise die seismische Aktivität, die Deformation der Erdoberfläche oder die Aktivität von Fumarolen beobachtet werden. Dabei handelt es um Stellen, an denen heiße vulkanische Gase aus großer Tiefe austreten. Diese Informationen erlauben uns Rückschlüsse darauf, was unterhalb vulkanischer Seen passiert. Sobald man jedoch Messungen auf der Wasseroberfläche oder unter Wasser durchführen möchte, steht man vor ganz anderen logistischen Herausforderungen und benötigt zudem angepasste Mess- und Probenahmeverfahren.

**Und welche Besonderheiten gibt es bei der Beobachtung vulkanischer Seen?**

**Jolie:** Ein vulkanischer See kann zusätzliche Gefahren und Risiken in sich bergen, die den Einsatz weiterer Beobachtungsverfahren nötig machen. So können solche Seen Speicher für vulkanische Gase wie Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) oder Methan (CH<sub>4</sub>) sein. Diese sammeln sich in den Seen über längere Zeiträume an und können spontan durch Gasausbrüche, Hangrutschungen oder andere Ereignisse freigesetzt werden. An Land stellen solche Gasemissionen weniger eine Gefahr dar. Hier können sich die Gase in der Regel schnell in der Atmosphäre vermischen und es kommt eher selten zu großen Anreicherungen. Ausnahmen bilden Höhlen oder Täler, in denen sich Gase sammeln können. Eine besondere Form vulkanischer Seen kann sich durch vulkanische oder geothermische Aktivität unter Gletschern bilden und dabei sogenannte „Jökulhlaups“ auslösen. Dabei handelt

es sich um Flutwellen, die beim Entleeren dieser Schmelzwasserseen entstehen. Dies erfordert spezielle Monitoringverfahren sowohl auf dem Gletscher als auch entlang der schmelzwasserführenden Flusssysteme.

#### **Gibt es noch weitere Gefahren?**

**Jolie:** Eine weitere große Gefahr stellen sogenannte phreatomagmatische Eruptionen dar. Sie können durch den direkten Kontakt von heißem Magma mit Oberflächenwasser entstehen und resultieren in besonders starken und explosiven Eruptionen. Aber auch Flutwellen, die durch Hangrutschungen ausgelöst werden können, stellen eine potentielle Gefahr dar.

#### **Was bedeuten diese Besonderheiten für die Forschung?**

**Jolie:** Aus diesen Besonderheiten ergeben sich eine Vielzahl an Faktoren und Gefahren, die bei der Erstellung von Konzepten zur Überwachung hinzugezogen werden müssen, auf die wir an Land nicht achten müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass ein direkter Zugang zu vulkanischen Seen in vielen Gegenden kaum möglich ist. In solchen Fällen kommen lediglich Verfahren in Frage, die Messungen aus der Ferne erlauben, zum Beispiel durch den Einsatz von Drohnen. Aufgrund der Komplexität der möglichen Gefahren ist es grundsätzlich wichtig, einen komplementären, multidisziplinären Ansatz zu verfolgen.

#### **Welche Seen sollten besonders beobachtet werden?**

**Jolie:** Um diese Frage zu beantworten, muss man zunächst das besondere Gefährdungspotential von Seen in vulkanisch aktiven Regionen und die damit verbundenen Risiken genauer verstehen. Denn ein See allein stellt ja an sich keine Gefahr dar. Die Gefahr entsteht vor allem durch das, was um den Wasserkörper herum und darunter passiert. Vulkanische Seen werden entsprechend ihrer Aktivität in verschiedene Klassen unterteilt. Auf dieser Grundlage ist es möglich zu entscheiden, welchem See besondere

Beachtung geschenkt werden muss und welche Monitoringverfahren anzuwenden sind.

#### **Von welchen Seen sprechen wir, wenn es um gefährliche Kraterseen geht?**

**Jolie:** Dies betrifft beispielsweise Kraterseen mit aggressiven geothermischen Fluiden oberhalb aktiver magmatisch-hydrothermalen Systeme. Solche Seen fallen durch saure Wässer und erhöhte Wassertemperaturen auf und sollten besonders gut überwacht werden. Es gibt jedoch auch vulkanische Seen, die überwacht werden, obwohl es dort keinen aktiven Vulkanismus mehr gibt. Ein Beispiel dafür ist der Laacher See in Deutschland. Dieses Monitoring wird vor allem durchgeführt, weil seismische Untersuchungen auf magmatische Aktivität in 10 bis 40 Kilometer Tiefe hindeuten und zudem CO<sub>2</sub> kontinuierlich bis zur Erdoberfläche aufsteigt.

#### **Das Entweichen von gesundheitsschädlichen Gasen, Unterwassereruptionen oder auch durch Erdbeben bzw. Erdbeben ausgelöste Tsunamis sind besondere Gefahren, die mit vulkanischen Seen direkt verbunden sind. Welche Überwachung empfehlen Sie aus Sicht des Bevölkerungsschutzes für vulkanische Seen?**

**Jolie:** Ob potentielle Gefahren dieser Art tatsächlich ein Risiko für die Bevölkerung darstellen, hängt davon ab, in welcher Entfernung zum See sich Menschen regelmäßig aufhalten und wie groß die Reichweite bestimmter Ereignisse ist. Tsunamis können eine Gefahr darstellen. Sie werden allerdings auch nur dann zum Risiko, wenn Menschen tatsächlich in der Nähe des Sees leben. In dem Kontext kommen natürlich verschiedenste Überwachungsmethoden ins Spiel, die auch für andere Seen notwendig sind. Hierzu gehört die Überwachung der Stabilität von Hängen und deren Neigung zu Hangrutschungen.



Abb. 1: Der Kratersee in der Caldera des Ngozi-Vulkans im südlichen Hochland von Tansania. Foto: Egbert Jolie

### **Gibt es weitere Methoden, die besonders wichtig sind?**

**Jolie:** Ebenfalls wichtig ist ein seismisches sowie geochemisches Monitoring. Durch die Untersuchung von Wasserproben können wir unter anderem Veränderungen in der Zusammensetzung des Wassers feststellen und somit Veränderungen im Untergrund ableiten. Bei erhöhter magmatischer Aktivität beobachtet man zudem erhöhte Gasemissionen, die auf dem See mit verschiedenen Verfahren bestimmt werden können. Bathymetrische Untersuchungen dienen dazu, digitale Geländemodelle des Seebodens zu erhalten. Diese Messungen geben uns Hinweise auf geologische Strukturen, an denen Fluide aufsteigen können. Den Nutzen bathymetrischer Messungen konnten wir bereits in Projekten in Äthiopien, Tansania und Island eindrucksvoll zeigen.

### **Wie sieht es bei der Umsetzung von Handlungsempfehlungen aus, die sich aus den Risikoanalysen ergeben?**

**Jolie:** Vorrang hat zunächst eine umfassende Abschätzung und Bewertung der möglichen Gefahren. Darauf basierend lässt sich eine Risikoanalyse durchführen und ein angepasstes Monitoringkonzept entwickeln. Die Umsetzung obliegt i. d. R. den zuständigen Behörden. Deren

zentrale Aufgabe ist es, die Ergebnisse der Risikoanalyse in geeigneter Form an die Öffentlichkeit weiter zu kommunizieren, um die richtigen Schutzmaßnahmen zu treffen. Dies hat auch eine besondere Bedeutung in touristisch stark frequentierten Gebieten. In der Vergangenheit haben wir leider mehrfach sehen müssen, wie sich Touristen völlig ahnungslos in Hochrisikobereichen aufhielten und zu Schaden gekommen sind bzw. sogar Todesopfer zu beklagen waren.

### **Was hat beim Monitoring absolute Priorität? Gibt es eventuell eine Entscheidungsmatrix, die helfen könnte?**

**Jolie:** Es ist ganz wichtig, dass man sich nicht auf eine Methode allein verlässt, sondern immer einen interdisziplinären und sich ergänzenden Ansatz wählt. Dabei können Messungen von Gasemissionen, Wasser- und Seebodentemperaturen, chemischen Parametern, Hangstabilität und andere Parameter eine Rolle spielen. Eine Entscheidungsmatrix ist dabei immer lokal, entsprechend der vorhandenen Gegebenheiten, zu definieren.

**Welche Untersuchungen halten Sie darüber hinaus für sinnvoll, unabhängig von den Kosten? Was wäre nötig, um eine optimale Beobachtungssituation herzustellen?**

**Jolie:** Wir planen derzeit einen Feldeinsatz an einem vulkanischen See in Island, bei dem wir unter anderem auch mit wissenschaftlichen Tauchern arbeiten und möglicherweise zudem einen Tauchroboter einsetzen können, um gezielt Wasser- und Gasproben zu nehmen und Bodentemperaturen zu messen. Dies sind Verfahren, die bereits mit einfachen Methoden gut im Kratersee des Ngozi-Vulkans in Tansania funktioniert haben und auch im vergangenen Jahr von uns in Island mit wissenschaftlichen Tauchern getestet worden sind. Eine optimale Beobachtungssituation ist dann hergestellt, wenn wir basierend auf mehrerer Datensätze zu ähnlichen Einschätzungen kommen.

**Warum lohnen sich solche Projekte?**

**Jolie:** Grundsätzlich liefern diese Projekte Referenzstudien, die nötig sind, um letztendlich bestimmte Monitoringverfahren praxistauglich zu

machen und zu etablieren. Darüber hinaus hat die Forschung auch eine Relevanz für die Geothermie-Branche, die zukünftig geothermische Ressourcen im Offshore-Bereich erschließen möchte. Dafür benötigt es geeignete Explorations- und Monitoringverfahren.

**Gibt es unter Umständen Nutzungspotentiale, die sich durch eine vulkanische Aktivität in einem vulkanischen See ergeben?**

**Jolie:** Dazu schauen wir am besten einmal auf das Beispiel des Kivu-Sees im Grenzgebiet zwischen Ruanda und der Demokratischen Republik Kongo. Dort reichern sich in der Tiefe Kohlenstoffdioxid und Methan in so großen Mengen an, was eine kommerzielle Nutzung des Methans möglich macht. Mittlerweile ist es gelungen, dieses Methan aus den tiefen Schichten zu fördern, anzureichern und erfolgreich zur Stromproduktion zu nutzen.

**Herr Dr. Jolie, wir danken für das Interview.**

Das Interview führte Jana Kandarr (ESKP).

## Referenzen

- Jolie, E. (2019). Detecting gas-rich hydrothermal vents in Ngozi Crater Lake using integrated exploration tools. *Scientific Reports*, 9:12164. doi:10.1038/s41598-019-48576-5
- Kandarr, J. (2020). Vulkanische Seen: Blaue Fenster in die Tiefen eines Vulkans. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 17-24). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungs-Zentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.1.3

## Warum brauchen wir Vulkanforschung in Deutschland?

Interview mit PD Dr. Thomas Walter (Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

**Im direkten Einflussbereich von Vulkanen leben 800 Millionen Menschen. Vulkanausbrüche können daher schnell schwerwiegende Auswirkungen haben – und das weltweit. Doch die komplexe Vulkanforschung und -überwachung können viele Länder nicht allein stemmen. Und auch bei uns in Deutschland gibt es nur eine lückenhafte Überwachung hiesiger Vulkanregionen wie der Eifel. Ein Interview mit dem Vulkanologen PD Dr. Thomas Walter vom Deutschen GeoForschungsZentrum.**

- 
- Vulkanforschung in Deutschland ist sinnvoll, obwohl in naher Zukunft kein Ausbruch in Deutschland zu erwarten ist.
  - Die Eifel ist ein monogenetisches Feld, das unter geologischen Maßstäben betrachtet, aktiv ist.
  - In der Eifel kann auch viel über monogenetischen Vulkanismus im Allgemeinen gelernt werden, weil es nur wenige, von Menschen verursachte Störgeräusche gibt.
  - Da Vulkanausbrüche überregionale, sogar globale Wirkungen haben können, rücken Ländergrenzen in der Forschung in der Hintergrund.
- 

**Herr Privatdozent Dr. Walter, können Sie uns sagen, warum es Vulkanforschung in Deutschland gibt? Warum brauchen wir eine diverse Forschungslandschaft bei uns?**

**PD Dr. Thomas Walter:** Vulkanische Regionen sind reich an Ressourcen, aber auch an Gefahren – da finden wir zahlreiche Gründe, warum wir besonders in Deutschland die Vulkanforschung brauchen. Es gibt auch in Deutschland Vulkane, die als „aktiv“ eingestuft werden – auch wenn es sehr unwahrscheinlich ist, dass in der Eifel neuer Vulkanismus eintritt.

Über die Vulkanregionen in Deutschland hinaus, gibt es einige weitere gute Gründe, warum wir zu Vulkanismus forschen. Schauen wir uns Vulkane unter dem Gefährdungsaspekt an: Vulkanausbrüche sind bekanntermaßen nicht an Ländergrenzen gebunden. Das ist einfach zu verstehen, nicht erst seit 2010 der Vulkan Eyjafjallajökull in Island ausgebrochen ist. Damals hat die Asche-

wolke den zivilen Luftverkehr Europas kalt erwischt, aber auch die Solarbranche registrierte Einbußen, die gesamte Wirtschaft und Wertschöpfungskette wurde gebeutelt. Dieser Ausbruch war wohlbemerkt noch relativ klein. Es gibt viel größere Ausbrüche, mit dem hundert- oder gar tausendfachen Volumen, mit globalen und andauernden Konsequenzen.

**Gibt es noch weitere Folgen?**

**Walter:** Nehmen wir den Tourismus. Wussten Sie, dass deutsche Mitbürger als Touristen im Ausland viel häufiger Opfer von Naturkatastrophen werden als im Inland? Um ein konkretes Beispiel zu nennen: Das Erdbeben 2004 in Indonesien und die darauffolgenden Tsunamis waren die größte Naturkatastrophe für Deutsche in neuerer Zeit – gemessen an der Opferzahl. Auch an Vulkanen: Immer wieder verletzen sich Touristen oder sterben sogar, beispielsweise am Stromboli, Mayon oder White Island. Gerade Vulkane

sind ein beliebtes Touristenziel und dies ist auch ein Grund, warum ein Vulkan-Monitoring bzw. angewandte Forschung gemacht werden muss.

### **Gibt es auch einen Nutzen?**

**Walter:** Denken wir über neue Energiequellen wie Geothermie nach, dann ist die Vulkanologie letztendlich der grundlegende Baustein, um zu verstehen, wie wir die Energiereserven der Erde nutzen können und wie dies nachhaltig möglich ist. Deshalb gibt es zum Beispiel unter Leitung des Deutschen GeoForschungsZentrums Projekte in Island, Mexiko, Indonesien im Bereich Vulkanologie und Geothermie.

### **Und wenn wir den Blick von Deutschland etwas wegnehmen?**

**Walter:** Wenn wir den Blick und Fokus von Deutschland ein bisschen abwenden, dann sehen wir, dass circa zehn Prozent der Weltbevölkerung in einem Radius von 100 Kilometern um aktive Vulkane lebt. Das sind rund 800 Millionen Menschen. Viele dieser Regionen liegen in Entwicklungs- und Schwellenländern. Es ist also auch ein sehr wichtiger Beitrag Deutschlands im Bereich internationaler Politik und globaler Sicherheit, diese von Vulkanen ausgehende Gefährdung zu verstehen. Hinzu kommt, dass Deutschland insbesondere mit seinen hochentwickelten Technologien und Satellitenmethoden besonders viel beitragen kann. Wir haben bei uns die Möglichkeit, nicht nur einzelne, sondern gleichzeitig viele Vulkane zu überwachen. Dadurch können wir neue Verfahren der Früherkennung entwickeln.

### **Gibt es da Regionen in Entwicklungsländern, an die Sie ganz besonders denken, die besonders gefährdet sind? Mit Indonesien gab es ja eine langjährige Kooperation.**

**Walter:** Die meisten Vulkane findet man entlang des Pazifischen Feuerrings. Dazu zählen Mittelamerika, Südostasien und Kamtschatka – alleamt Regionen, in denen man sich großteils eine teure Vulkanüberwachung nicht leisten kann

oder will. Angesichts der Vielzahl an Vulkanen weltweit wird Deutschland alleine eine intensive Überwachung auch nicht realisieren können. Denn Vulkanüberwachung mit klassischen Überwachungsmethoden kostet ab einer Million Euro pro Jahr – und pro Vulkan. Die Daten müssen gesendet und die Messstationen gewartet werden, das heißt man braucht technisches Personal und Wissenschaftler\*innen, die sich die Daten anschauen und auswerten. Die Informationen müssen regelmäßig mit Zivilschutz und anderen Behörden diskutiert werden, die letztlich Entscheidungen zu fällen, umzusetzen und zu verantworten haben. Daher muss eine Investition in die Überwachung natürlich mit zu erwartenden Schäden im Falle einer Eruption abgewogen werden.

### **Es ist also wichtig, auch über Deutschland hinaus zu forschen?**

**Walter:** Vulkane lassen sich in und von Deutschland aus hervorragend erforschen, mit vielfältigem, direktem und indirektem gesellschaftlichen Nutzen. Ich sehe eine besondere Stärke in der technologischen Entwicklung und methodischen Innovationen, auch in Hinblick auf die Datenanalyse und Simulation. Deutschland bietet eine hervorragende Forschungsinfrastruktur, wengleich auch die Konkurrenz nicht schläft. Gerade die Krater aktiver Vulkane können wir mit den deutschen TerraSAR-TanDEM-Satelliten hochauflösend abtasten; leider sind diese Satelliten jetzt in die Jahre gekommen und wir bangen um die zukünftige Überwachung. Satellitentechnologien und Datenwissenschaft betrachte ich als eine große Chance für die Forschung hierzulande, aber auch für Länder, die sich eine intensive Forschung nicht leisten können. Eine sehr große Anzahl von Firmen und Start-ups baut auf diesen Grundlagen auf und entwickelt marktreife Produkte auch für andere Regionen der Erde. Insbesondere in Zeiten höherer Verwundbarkeit der Gesellschaft und der globalen Umwälzungen, sind diese Beobachtungen für unterschiedlichste Disziplinen äußerst wertvoll.

## ” Immer wieder verletzen sich Touristen oder sterben sogar, beispielsweise am Stromboli, Mayon oder White Island.

**Aber hier zuhause in Deutschland werden doch alle Vulkanregionen überwacht?**

**Walter:** Nehmen wir die Eifel als die aktivste Vulkanregion in Deutschland. Die Eifel wird nicht systematisch in der technisch möglichen Gesamtheit überwacht. Da muss man sich natürlich fragen, wie Länder in Mittelamerika eine Vulkanüberwachung leisten sollen? Oder ob man in Indonesien, wo es 140 aktive Vulkane gibt, überhaupt davon ausgehen kann, dass alle Vulkane jemals annähernd umfänglich überwacht werden? Meiner Meinung nach ist das nahezu unmöglich. Ich sehe hier einen wichtigen Beitrag deutscher Forschung insbesondere in der Entwicklung von automatisierten Verfahren der Satellitenbeobachtung, seismischer Netzwerke, Infraschall und Glasfaserkabel, aber auch die Nutzung von künstlicher Intelligenz bei der Auswertung der Daten.

**Wie würden Sie die Vulkanforschung in Deutschland beschreiben? Womit beschäftigen sich Ihre Kolleginnen und Kollegen noch?**

**Walter:** Die Schar der deutschen Vulkanologen ist heute deutlich vernetzter als noch vor einigen Jahren. Jährliche Treffen helfen, sich auszutauschen und Studierende werden gemeinsam ausgebildet. Man sieht hier allerdings auch ganz gut, dass die Forschungsinteressen sehr unterschiedlich sein können. An Vulkanen forschen Geologen, Geophysiker, Biologen, Geodäten, Chemiker, Meteorologen, Soziologen und andere. Besonders spannend finde ich hier die Grenzflächen dieser klassischen Disziplinen. Wie verändern Vulkane das Klima und Ozeane und umgekehrt, inwiefern ändert der Klimawandel

die zukünftige Vulkantätigkeit. Oder: Welche Organismen reagieren wie auf vulkanische Gase und Zusammensetzungen. Es gibt also kaum den klassischen „Vulkanologen“, das Feld der Forschenden ist eher heterogen.

**Gibt es größere Forschungsprojekte in der Eifel?**

**Walter:** Die Eifel wird einerseits jedes Jahr durch Kolleg\*innen und Student\*innen besucht, da hier sowohl Nutzen als auch Gefahren in Exkursionen sehr gut vermittelt werden können. Was die Grundlagenforschung angeht, gibt es in der Eifel derzeit aber, soweit ich weiß, kein großes und koordiniertes Forschungsprojekt. Daher versuchen derzeit zahlreiche Kolleg\*innen einen Forschungsschwerpunkt in der Eifel neu zu definieren, mit einer ganzen Fülle von spannenden und noch gänzlich unverstandenen Fragestellungen und Prozessen. Noch ist die Projektrealisierung aber ungewiss.

**Wie kam es dazu, dass in der Eifel Aktivität beobachtet wurde?**

**Walter:** Es gibt in den vergangenen Monaten einige äußerst interessante Neuerungen im Verständnis der Eifel. Sicherlich ganz wichtig war die Erkenntnis, dass kürzlich ausgebrachte seismische Stationen tatsächlich viele kleine Erdbeben zeigen. Erst sehr tiefe Erdbeben, die 2017–2018 nach oben wanderten bis sie schließlich westlich und nordwestlich vom Laacher See ganz nah an die Oberfläche kamen. Dieser Weg des Knisterns ist erstmals deutlich nachgewiesen worden.

**Welche Bedeutung haben diese seismologischen Messungen für die Eifel?**

**Walter:** Bislang galt für die Eifel immer die Meinung: Solange die Seismologen keine Aktivität messen, gibt es keinen Grund zur Beunruhigung. Das Problem war aber einfach, dass man sich die Situation vor Ort lange nicht mit modernen Verfahren angeschaut hatte. Jetzt nimmt das Ganze Fahrt auf. Kolleg\*innen aus den USA haben so-

eben Daten und Modelle zu einer gewaltigen Hebungszone in der Eifel veröffentlicht. Das heißt, international aber auch verschiedene Institute und Universitäten national, intensivieren die Messungen und Analysen. Ich vermute, das ist nur der Anfang und die Eifel wird noch eine ganze Fülle von neuen Erkenntnissen des Magmaaufstiegs, Entgasung und Erdbeben inmitten des europäischen Kontinents liefern.

**Die neuseeländische Großstadt Auckland liegt – genauso wie die Eifel – auf einem monogenetischen Feld, das heißt in einem Gebiet mit hoher Vulkandichte. Für Auckland hat man Ausbruchsszenarien bestimmen können. Warum lassen sich diese Szenarien nicht für die Vulkaneifel bestimmen?**

**Walter:** Zunächst vorab zur Erklärung: Monogenetisch bedeutet auch, dass die kleineren Schlacken- und Vulkankegel nur kurzzeitig aktiv sind, d. h. sich nicht zu einem großen Zentralvulkan entwickeln. Es gibt in der Vulkaneifel über 300 Eruptionszentren. Einige waren wiederholt aktiv wie der Laacher See. Aber an den meisten gab es nur wenige große Explosionen und dann war wieder Ruhe und die Aktivität wanderte. Diese Wanderungen sind leider noch nicht genügend dokumentiert, sodass sich daraus letztendlich nicht prognostizieren lässt, wo die Eifel in Zukunft wieder aktiv wird. Bei Auckland in Neuseeland war das allgemeine Interesse am Verständnis des Vulkanfeldes selbstverständlich anders: Auckland ist die wirtschaftlich stärkste Stadt Neuseelands und wurde genau auf einem solchen „unberechenbaren“ monogenetischen Feld erbaut. Deshalb wurde hier auch besonders intensiv geforscht. Ich bezweifle aber, dass sich die Kenntnisse einfach übertragen lassen, wenn wir auch sicherlich in Bezug der Risikoforschung und Informationsketten, der Kommunikation von Wissenschaft und Zivilschutz viel abschauen können (s. auch den Beitrag Rivalta, 2020 in diesem Themenspezial).

**Der letzte Ausbruch eines Vulkans in Auckland liegt auch nicht so lang zurück wie in der Eifel?**

**Walter:** Genau, die Aktivität ist dort deutlich jünger, erst 500 Jahre seit dem letzten Ausbruch. Die Problematik ist jedoch vermutlich ähnlich: Ob Auckland oder Eifel – für diese monogenetischen Felder kann man langfristig nicht genau vorhersagen, wo der nächste Vulkan ausbrechen wird. Mittlerweile kennen wir andere Regionen und Städte, die auf solchen monogenetischen Feldern gebaut sind, Mexiko-Stadt zum Beispiel. Auch hier kann man bislang noch nicht sagen, wo das Feld wieder aktiv sein wird. In Mexiko-Stadt gab es selbst in geologisch jüngerer Zeit Ausbrüche, vergleichbar mit der Eifel. Ein vielversprechender Ansatz ist, an solchen Feldern über Simulationen am Computer die Spannungen in der Tiefe und die erwartbaren Wegsamkeiten von Magmen nachzustellen. Bei derartigen Simulationen haben wir tatsächlich enorme Fortschritte gemacht.

**Wie werden diese monogenetischen Felder unter einer Großstadt wie Auckland oder Mexiko-Stadt überwacht?**

**Walter:** Das Problem ist, dass es in solchen Stadtbereichen wie Auckland oder Mexiko-Stadt natürlich immense Hintergrundgeräusche gibt: S- und U-Bahn bzw. der Verkehr ganz allgemein. Diese Vibrationen führen dazu, dass man letztendlich das kleine Knistern eines Vulkans kaum entdecken kann. Hier kommt wiederum die Eifel ins Spiel, eine Region mit sehr gutem Zugang und einem geringen Hintergrundrauschen und somit einer Datenlage, die beitragen könnte, auch die Prozesse in anderen Hochrisikoregionen der Welt zu verstehen.

**Schauen wir noch einmal nach Europa: Italien ist ein Land mit sehr aktivem Vulkanismus. Wie ist die Situation in den Phlegräischen Feldern, den Campi Flegrei bei Neapel?**

**Walter:** Die Phlegräischen Felder sind ein heißes Eisen, weil wir dort eine Hebung sehen. Die Hebung dauert nicht nur seit über 10 Jahren an,

sondern wird begleitet von Entgasung und Erdbeben. Mittlerweile beträgt die Hebung bei Pozzuoli bereits fast einen halben Meter. Wohin das führt, weiß man im Moment noch nicht. Manch britischer Kollege warnt, dass eine derartige Hebung verbunden mit Erdbeben und Entgasungen andernorts gewöhnlich zu einem Ausbruch führten. Das ist für die Region Neapel daher in der Tat sehr alarmierend.

### **Sie sagten, es gibt zahlreiche Erdbeben in den Phlegräischen Feldern. Wie hängen Erdbebenaktivität und Vulkanismus zusammen?**

**Walter:** Erdbeben sind ein ganz typischer Überwachungsparameter. Es gibt unterschiedliche Vorgehensweisen, die meisten Vulkanobservatorien messen vor allem vier Hauptparameter: Gase, Temperatur, Deformation und Erdbeben. Man kann sich das so vorstellen: Wenn sich Magma in der Tiefe ansammelt, dann steigt der Druck und darüber wölben sich die Erde und der Vulkan leicht auf. Ist der Druckanstieg so groß, dass das Gestein brechen kann, entstehen Erdbeben und Gase steigen auf. Das ist genau das, was man bei den Phlegräischen Feldern auch misst.

### **Was sehen Sie dabei genau?**

**Walter:** Bei den Phlegräischen Feldern beobachten wir in drei Kilometer Tiefe einen Anstieg des Drucks. Die Erdbeben sind nicht in der Magmakammer, sondern in dem Bereich ringsherum bzw. hauptsächlich darüber lokalisiert – genau dort, wo das Gestein bricht. Dadurch erkennen wir, wo die Magmakammern sind. Die derzeit anschwellende Magmakammer liegt ab einer Tiefe von drei Kilometern. Ob und wann von hier auch zähfließendes Magma auf Wanderschaft geht und schließlich einen Ausbruch auslöst, kann man derzeit nicht sagen. Vulkanologen gehen aber davon aus, dass sich dies durch kurzzeitige Änderungen der Überwachungsparameter ankündigt. Der Zivilschutz hofft, dass das zur Evakuierung genügt.

### **Hier sprechen Sie von Erdbeben, die entstehen, wenn Gestein bricht. Wie ist es mit tektonischen Beben, die teils weit entfernt stattfinden? Wie hängen diese mit Vulkanismus zusammen? Gibt es hierzu Forschung?**

**Walter:** Tektonische Erdbeben und Vulkanismus sind ein anderes, nicht minder spannendes Forschungsfeld. Mich persönlich fasziniert, dass seismische Wellen von weit entfernten Erdbeben, teils auch noch in über 1.000 Kilometern Entfernung, einem Vulkan quasi den letzten „Kick“ geben und so einen Ausbruch fördern können. Es hat sich insbesondere in den letzten Jahren gezeigt, dass dieser Ferneffekt global nachweisbar ist. Da sich Erdbeben nach heutigem Kenntnisstand nicht voraussagen lassen, wird es also auch weiterhin plötzlich auftretenden Vulkanismus geben. Gemessen an der Gesamtzahl der Eruptionen ist dieses Phänomen der Wechselwirkung aber vermutlich relativ selten.

### **Herr Privatdozent Dr. Walter, wir danken für das Interview.**

Das Interview führte Jana Kandarr (ESKP).

## **Referenzen**

- Rivalta, E. (2020). Wo neue Vulkane entstehen können. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 51-53). Potsdam: Deutsches Geo-ForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.3.2

## 7. Vulkanismus im Sonnensystem

### Einleitung

Warum brechen Vulkane überhaupt aus? Die Gesetze der Thermodynamik helfen, Vulkanismus zu verstehen. Vulkanspuren lassen sich auf vielen Planeten unseres Sonnensystem finden. Sie können völlig unterschiedliche Formen und Erscheinungsweisen annehmen. Im Sonnensystem gibt es auch Kryovulkanismus. Hier verhalten sich Wasser und Schlamm ähnlich wie Magma. Der größte Vulkan des Sonnensystems liegt auf dem Mars. Der Durchmesser von Olympus Mons beträgt rund 600 Kilometer, seine Steilkanten sind bis zu 7.000 Meter hoch.

### Themen-Überblick

---

- ▶ Vulkanismus im Planetensystem – ein Überblick
- ▶ Marsvulkan Olympus Mons – der größte Vulkan unseres Sonnensystems

## Vulkanismus im Planetensystem – ein Überblick

Prof. Dr. Ralf Jaumann (Freie Universität Berlin, Institut für geologische Wissenschaften)

**Vulkanismus ist schon auf unserem Planeten ein faszinierendes Phänomen. Nimmt man auch noch andere Himmelskörper in den Blick, dann zeigt sich, dass Vulkanismus ein grundlegender Prozess in unserem Sonnensystem ist.**

- Vulkane erklären sich aus dem Wärmeausgleich zwischen Himmelskörpern und dem umgebenden Weltall.
- In unserem Sonnensystem sind sie ein verbreitetes Phänomen, das aber sehr unterschiedliche Formen und Erscheinungsweisen annehmen kann.
- Neben dem Transport von heißer Materie (Magma/Lava besteht aus Silikaten) gibt es auch Kryovulkanismus, bei dem sich Wasser und Schlamm ähnlich wie Magma verhalten.

Energieerhaltung ist ein fundamentaler Grundsatz der Physik. Energie kann nicht erzeugt werden oder verloren gehen. Allerdings kann sich ihre Form ändern. Bei der Entstehung der Sonne konzentrierte sich fast die gesamte Materie im Stern und nur weniger als 2 Prozent verblieben in der rotierenden Staubscheibe, aus der dann die Planeten unseres Sonnensystems entstanden sind. Diese Scheibe enthielt allerdings fast die gesamte Bewegungsenergie der Protowolke aus gasförmiger Materie, aus der unser Sonnensystem entstanden ist. Unstetigkeiten in dieser Scheibe führten zur Konzentration von Materie und damit zur Zunahme der Gravitation.

Bei diesem Prozess der Zusammenballung von Materie und der Entstehung der Planeten, der Akkretion, wurde Wärme erzeugt. Damit ist ein Planet im Inneren heiß und außen vom extrem kalten Weltraum umgeben. Das Innere wird sehr schnell nach der Planetenentstehung durch eine erste feste erkaltete Kruste aus Gestein vom Weltraum getrennt. Gemäß den Gesetzen der Thermodynamik streben die Temperaturunterschiede mit der Zeit aber einem Ausgleich entgegen. Dabei muss Wärme aus dem Innern eines Planeten durch die feste Kruste zu seiner Oberfläche transportiert werden. Dies geschieht durch geschmolzenes Material (Magma), das

über Vulkane die Oberfläche erreicht und dort erstarrt. Bezüglich dieses Grundsatzes verhalten sich Planeten, Mond und auch einige kleine Körper alle gleich.

### Woher speist sich die Energie im Innern der Planeten?

Unterschiedlich sind jedoch die Energiequellen, die spezielle Art des Energietransportes, was die Effektivität beeinflusst und auch das transportierte Material (z. B. Jaumann, 2015). Bei der Erde ist der Wärmetransport besonders effektiv, weil das Magma nicht nur durch einzelne Schlotte – die Vulkane – nach oben befördert wird, sondern vor allem entlang riesiger Spalten, die den ganzen Planeten durchziehen – den Mittelozeanischen Rücken. Der Erdkruste wird entlang dieser Spalten immer neues Material hinzugefügt, was dazu führt, dass die Kruste horizontal wächst.

Da die Erde aber mehr oder weniger eine Kugel ist, kann die neue Kruste sich nicht beliebig ausdehnen, sondern stößt auf Hindernisse – die Kontinente –, an deren Rändern Krustenmaterial nach unten gedrückt wird, um schließlich im Erdmantel wieder zu schmelzen. Dabei entsteht ein Kreislauf der altes, kaltes Krustenmaterial

versenkt und neues heißes nach oben bringt (z. B. Jaumann et al., 2018). Ein Kreislauf, der auch für die Entstehung des Lebens und die Habitabilität der Erde, ihre Bewohnbarkeit, von Bedeutung ist.

Die Energiequellen eines planetaren Körpers sind vielfältig. Neben der ursprünglichen Akkretionswärme, die aus der Zusammenballung von Material in der Protowolke stammt, spielt auch die bei der Materialtrennung freigesetzte Energie eine wichtige Rolle. Bei diesem Prozess der Differenzierung trennen sich schwere und leichte Stoffe voneinander. Deshalb besteht der Erdkern aus Eisen und aus diesem Grund ist unsere Atmosphäre gasförmig. Vor allem aber kommt dem Zerfall radioaktiver Elemente im Planeteninnern eine wichtige Bedeutung zu. Zu berücksichtigen ist darüber hinaus die sogenannte Gezeitenreibung. Diese kann eine bedeutende Energiequelle sein, die z. B. den Vulkanismus im äußeren Sonnensystem antreibt. Gezeitenwirkung entsteht, wenn ein Himmelskörper beim Orbit um einen anderen durch Gravitation deformiert wird.

Die Akkretionsenergie ist von der Größe des planetaren Objekts abhängig, sie kann aber enorme Werte erreichen. Die Akkretionsenergie der Erde betrug  $2.3 \times 10^{29}$  Joule (Cassen et al., 1982; Janle, 1996; Lissauer & de Pater, 2013). Dies entspricht in etwa eine Milliarde Mal dem heutigen jährlichen weltweiten Energieverbrauch (International Energy Agency, 2009). Mit Ausnahme der kleinen Körper, d. h. der Asteroiden und Kometen, ist die Akkretionsenergie ausreichend, um Planeten und größere Monde vollständig aufzuschmelzen.

In diesen aufgeschmolzenen Magma-Ozeanen trennen sich Elemente und Moleküle in Abhängigkeit ihrer spezifischen Dichte. Schwere Elemente sinken ins Zentrum während leichtere an die Oberfläche aufsteigen. Während dieser Differentiation formt sich ein dichter Kern aus Eisen unter einem schweren heißen Mantel, der von einer leichteren, aber festen Kruste bedeckt wird. Hierbei werden für einen Körper von der Größe und Zusammensetzung der Erde  $10^{31}$

Joule frei, das ist mehr als die Akkretionsenergie (Janle, 1996; Lissauer & de Pater, 2013).

Gewaltige Kollisionen in der Frühzeit des Sonnensystems haben ebenfalls große Energiemengen freigesetzt und zur zusätzlichen Aufschmelzung der entstehenden Planeten beigetragen. Dieser Prozess hat zwar mit der Zeit abgenommen, aber auch noch vor 65 Millionen Jahren, als ein 10 Kilometer großer Asteroid die Erde im Golf von Mexiko nahe der Yukatan-Halbinsel traf, wurden  $4 \times 10^{23}$  Joule (Bralower et al., 1998; Convey et al., 1994) an Energie freigesetzt. Dies entspricht in etwa 100.000 Mal der Sprengkraft des Krakatau-Vulkanausbruchs in der Sundastraße zwischen Sumatra und Java im Jahr 1883 (z. B. Jaumann, 2015). Gewaltige Druckwellen, Erdbeben und Vulkanausbrüche haben dabei fast alles Leben auf der Erde ausgelöscht.

Neben leichten Elementen befanden sich in der Staubwolke um die Sonne auch schwere radioaktive Elemente, die Bestandteil der sich bildenden Planeten und Monde wurden. Ihr stetiger Zerfall stellt für jeden planetaren Körper eine konstante Energiequelle dar, deren zeitliche Wirkung allerdings von der Menge dieser Elemente und damit von der Größe des Körpers abhängt. Etwa die Hälfte der jährlichen Dissipationsenergie der Erde in Höhe von  $2 \times 10^{27}$  Joule stammt aus dem Zerfall von Uran-238 und Thorium-232. Der Rest entstammt der im Kern gespeicherten ursprünglichen Zusammenballungs- und Differentiationswärme (Janle, 1996).

Eine weitere Energiequelle, die bereits genannte Gezeitenreibung, entsteht wenn sich ein Körper im nicht-zirkularen Orbit innerhalb des Gravitationsfeldes eines anderen Körpers bewegt. Die dabei verursachte Deformation erzeugt innere Reibung und damit Wärme. Im Erde-Mond-System erhält die Erde dadurch etwa  $1,6 \times 10^{20}$  Joule pro Jahr (Janle, 1996; Lissauer & Pater, 2013), was verglichen mit dem radioaktiven Zerfall wenig ist. Da die bei der Gezeitenreibung umgesetzte Energie von der Dimension des Gravitationsfeldes abhängt, kann es im sehr viel mächtigeren Jupiter- oder Saturnsystem aber durchaus zur Aufschmelzung von Monden kommen.

## Die Rolle der Vulkane

Der Wärmetransport thermaler Energie geschieht durch Wärmeleitung, Konvektion – Strömungstransport in einer Flüssigkeit – oder Strahlung. Da planetare Körper von einem nahezu perfekten Vakuum umgeben sind, ist der Austausch mit dem Weltraum durch Wärmestrahlung dominiert.

Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Stefan, 1879; Boltzmann, 1884) ist die Strahlungsleistung eines Körpers proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur. Oder weniger kompliziert und der Alltagserfahrung entsprechend: Je heißer ein Körper, desto mehr Energie wird abgestrahlt! Damit war die Abstrahlung am intensivsten, als der planetare Körper noch aufgeschmolzen war. Deshalb bildete sich schnell eine feste Kruste, die wiederum den Strahlungstransport hemmte.

Diese Kruste schirmt, zumindest teilweise, die Reste der Akkretions- und Differentiationsenergie sowie die Wärme aus radioaktivem Zerfall über lange Zeit vom Wärmetransport aus dem Inneren ab. Unter der Kruste setzt Konvektion ein und transportiert die Energie aus dem flüssigen Inneren bis unter diese Kruste. Von hier muss die Energie dann über Wärmeleitung an die Oberfläche gelangen, um wieder per Strahlung an den Weltraum abgegeben zu werden. Alle größeren Körper im Sonnensystem mit einer festen Kruste müssen sich so verhalten. Der geologische Prozess der diesen Wärmetransport leistet, ist der Vulkanismus. Damit ist Vulkanismus ein fundamentaler physikalischer Prozess im Sonnensystem (z. B. Jaumann, 2015). Die Materialien, die durch Vulkanismus transportiert werden, reichen dabei von Gesteinsschmelzen über Wasser zu Gasen.

## Vulkanismus auf den inneren Planeten des Sonnensystems

Die Oberfläche des innersten Planeten Merkur ist ebenso wie der Erdmond durch Einschlagskrater und große Einschlagsbecken gekennzeichnet. Zwischen den Kratern und auch in den

Einschlagsbecken befinden sich ausgedehnte Ebenen. Diese Ebenen sind sehr wahrscheinlich das Ergebnis früher vulkanischer Tätigkeit, was zu mehreren Kilometer mächtigen Ablagerungen aus dünnflüssiger Lava geführt hat. Auch im Bereich des Merkur-Nordpols finden sich zahlreiche Hinweise auf vulkanische Ablagerungen. Ungeklärt ist allerdings, wie sich so große Mengen an Gesteinsschmelzen im relativ dünnen Mantel des Merkur gebildet haben konnten (Jaumann, 2015).

Die Venus ist etwa so groß wie die Erde, hat aber eine sehr dichte CO<sub>2</sub>-Atmosphäre. Das führt zu einem Treibhauseffekt, der eine Erwärmung der Oberflächentemperatur auf bis zu 460° Celsius bewirkt. In der Konsequenz hat die Venus alles Wasser verloren. Auf der Erde ist das Wasser ein geologisches Schmiermittel und trägt erheblich zur Funktion der Plattentektonik bei, die wiederum ein effektiver Prozess der Wärmeabgabe ist. Auf der Venus hat sich dagegen die Hitze unter der immer dicker werdenden Kruste über hunderte von Millionen Jahren gestaut, bis der Druck durch Vulkanausbrüche überall auf der Oberfläche abgebaut wurde. Die weit über tausend Vulkane, die über die ganze Venus verteilt sind, belegen diese Hypothese ebenso wie das junge Alter der Venuskruste. Vor etwa 500 Millionen Jahren wurde die gesamte Venus von mächtigen Lavaablagerungen bedeckt. Unklar ist, ob die Venus heute noch vulkanisch aktiv ist. Frische Ascheablagerungen im Gipfelbereich des höchsten Vulkans Maat Mons lassen dies allerdings vermuten.

## Die Erde und ihr Mond

Die Erde hat den wohl effektivsten und variantenreichsten Vulkanismus im Sonnensystem. Ihre Position im Sonnensystem erlaubt dem Molekül H<sub>2</sub>O einen Aktionsspielraum in allen Aggregatzuständen. Als Treibgas und besonders in der flüssigen Form als Schmiermittel für die Plattentektonik ist es auch ein wichtiges vulkanisches Molekül und unterstützt damit die Mantelkonvektion. In den letzten 10.000 Jahren waren etwa 1500 Vulkane auf der Erde aktiv. Die Erdkruste besteht aus sich gegenseitig verschieben-

den Krustenplatten. Die vulkanische Aktivität konzentriert sich an deren Rändern, wo die Platten untereinander abtauchen sowie in deren Zentrum, wo Magma aufdringt und die Platten auseinanderdrückt. Ein weiterer effektiver Vulkanismus sind die innerhalb einer Platte ausbrechenden Hot Spots. Weil sich die Platten über diese Vulkanzentren hinwegbewegen, entstehen immer neue Vulkanbauten.

Die Plattentektonik hat dabei einige wichtige Auswirkungen für die Funktion der Erde. Das kalte und abtauchende Krustenmaterial kühlt den oberen Mantel, was Konvektion im Mantelmaterial erzeugt. Damit wird auch der untere Mantel gekühlt, was sich wiederum auf den äußeren Kern auswirkt. Damit entsteht auch im Eisenkern Konvektion, wodurch zusammen mit der unterschiedlichen Rotation des festen inneren Kerns gegenüber dem weicheren äußeren Kern das Magnetfeld der Erde entsteht (z. B. Christensen, 2008), was wiederum den von der Sonne ausgehenden Partikelstrom geladener Teilchen um die Erde herumlenkt. Für die Entwicklung des Lebens auf der Erde ist das von erheblicher Bedeutung.

Die Vulkane der Subduktionszonen, dort wo kalte mit Wasser und Karbonaten angereicherte Kruste versenkt wird, setzen neben unterschiedlichen Gasen vor allem Wasserdampf und CO<sub>2</sub> frei, die der Atmosphäre zugeführt werden und als wichtiger Kreislauf zur Stabilisierung der klimatischen Bedingungen auf der Erde beitragen. Ein bestimmter Anteil von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre war und ist notwendig, um die Temperatur auf der Erde zu stabilisieren und einen für die Biosphäre unabdingbaren hydrologischen Kreislauf zu ermöglichen.

Plattentektonik und Hot Spots führen zu einer weitgehend homogenen Verteilung der vulkanischen Aktivität über den Planeten, was einen kontinuierlichen Wärmefluss in Raum und Zeit ermöglicht. Das ist anders als auf der Venus, wo der Vulkanismus nur alle mehrere hundert Millionen Jahre auftritt, dann jedoch global. Auch auf dem Mars sind die Bedingungen anders. Dort

kommt der Vulkanismus zwar zeitlich kontinuierlich vor, aber hauptsächlich nur in zwei Regionen (Jaumann, 2015).

Die chemischen Gemeinsamkeiten des Erdmondes mit dem Mantel und der Kruste der Erde und der hohe Drehimpuls des Systems sprechen für eine Entstehung des Mondes als Ergebnis einer Kollision (z. B. Jaumann et al., 2018). Der Mond war daher in seiner Anfangsphase ganz aufgeschmolzen, differenzierte und bildete dann eine Kruste, die schnell erkalte. Der Wärmefluss aus dem Mantel ist, entlang der von großen Einschlägen erzeugten Schwächezonen, nach außen gedrungen. Vornehmlich auf der der Erde zugewandten Seite mit ihrer geringeren Krustendicke, füllten sich die großen Einschlagsbecken mit Lava.

Bei seiner heißen Entstehung hat der Mond nahezu alle flüchtigen Bestandteile verloren. Damit ist der lunare Vulkanismus im Gegensatz zu dem auf der Erde gasarm. Die heiße, schnell fließende Lava konnte dabei weite Flächen bedecken, ohne dass große Vulkanbauten entstanden sind (z. B. Jaumann, 2015). Da der Mond relativ klein ist, hat seine Energie aus der Differentiation und dem radioaktiven Zerfall nicht lange genug Wärme geliefert, um den Vulkanismus bis heute aktiv zu halten. Die letzten vulkanischen Aktivitäten auf dem Mond sind vor etwa einer Milliarde Jahren zum Erliegen gekommen.

## Der Mars

Der Mars ist nur etwa halb so groß wie die Erde und hat daher seine ursprüngliche Wärme weitgehend verloren. Auch ist die Erwärmung durch radioaktive Aufheizung wegen der geringeren Menge an radioaktiven Elementen nicht so effektiv.

In der Anfangsphase hat sich auf dem Mars schnell eine dicke Kruste gebildet. Möglicherweise kam es anfänglich und kurzfristig zu plattentektonischen Prozessen, was magnetische Anomalien in der ältesten Kruste vermuten lassen. Diese kamen aber schnell wieder zum Er-

liegen. Es erfolgte keine Kühlung des Mantels und Kerns und damit kam es weder zu einer langfristigen Stabilisierung eines Magnetfeldes noch zu einem ausgeprägten Kreislauf von Gas wie CO<sub>2</sub>, der die Atmosphäre kontinuierlich erneuert. Daher hat der Mars vermutlich große Mengen seiner ursprünglichen Atmosphäre mit dem Sonnenwind an den Weltraum verloren.

Wegen der dicken Kruste blieb der Mantel heiß und gewaltige Magmenreservoirs bildeten sich vornehmlich dort, wo die stärksten durch radioaktiven Zerfall erzeugten Hitzequellen waren. Da sich die Kruste nicht bewegte, entstanden über diesen Hot Spots gewaltige vulkanische Aufwölbungen gekrönt von Schildvulkanen, in deren Umgebung sich ausgedehnte Lavaebenen finden.

Der Vulkanismus auf dem Mars konzentriert sich hauptsächlich in zwei Regionen. Dem Tharsis-Komplex, eine gewaltige vulkanische Aufwölbung mit über 20 Kilometer hohen Schildvulkanen, wobei der höchste Vulkan des Sonnensystems – der Olympus Mons – am nordwestlichen Rand von Tharsis zu finden ist. Die zweite vulkanische Region ist die Elysium-Aufwölbung. Sie ist nicht so gewaltig wie Tharsis, aber ebenfalls von Schildvulkanen dominiert. Die Hauptaktivität des Marsvulkanismus ging vor etwa 100 Millionen Jahren zu Ende, wie die Alter der jüngsten Gipfelkaldern von Olympus Mons und auch Elysium Mons zeigen. Allerdings gibt es sowohl auf Tharsis als auch Elysium sehr junge Lavaströme, sodass auch heute noch von Restaktivitäten ausgegangen werden muss.

### Die Systeme der großen Gasplaneten

Auch die großen Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun strahlen Wärme ab. Allerdings läuft es hier über Konvektion vom tiefen Inneren über die Gashülle zum Weltraum. Die Energiequellen sind auch hier Akkretion, Differentiation und radioaktiver Zerfall, wobei die Akkretion wegen der Größe zumindest bei Jupiter und Saturn auch heute noch eine entscheidende Rolle spielt (z. B. Jaumann et al., 2018).

Betrachtet man die Monde der Gasplaneten, so sind auf einigen sehr junge Oberflächen zu finden. Da die Monde aber zusammen mit den großen Planeten entstanden sind, müssen diese Oberfläche durch Ablagerungen aus dem Inneren erneuert worden sein. Da die Monde kleiner sind als die Planeten des inneren Sonnensystems, reicht die Energien aus Differentiation und radioaktiver Aufheizung bei weitem nicht aus, um heute noch aktiven Vulkanismus zu erklären.

Aufgrund der enormen Masse der Gasplaneten sind die Gezeiteneffekte besonders im Jupiter- und Saturnsystem auch heute noch sehr stark ausgeprägt. Gezeitenreibung heizt das Innere einiger Monde auf und erzeugt so Vulkanismus. Die Geschwindigkeit der Rotation der Gasplaneten wird durch Drehimpulsübertrag auf die Bahnbewegung der Satelliten abgebremst. Gleiches gilt für die Monde, die wegen ihrer geringen Masse schon früh in eine gebundene Rotation gezwungen wurden, also dem Planeten immer dieselbe Hemisphäre zeigen. Sind, wie im Falle der Laplace-Resonanz, mehrere Satelliten in eine Orbit-Orbit-Resonanz eingebunden, verteilen sich die Reibungsverluste auf die beteiligten Satelliten und deren Bahnentwicklung. So stehen Umlaufdauern der drei inneren Jupitermonde Io, Europa und Ganymed stehen in einem ganzzahligen Verhältnis 1:2:4, was als Laplace-Resonanz bezeichnet wird. Der Mond Io umkreist Jupiter genau viermal so schnell wie der Mond Ganymed und zweimal so schnell wie der Mond Europa. Damit treffen sich alle drei Jupitermonde periodisch immer wieder an derselben Bahnposition, was zu einer geringen Auslenkung von Io's Orbit führt. Da Jupiter mehr als die dreihundertfache Masse der Erde besitzt, sind die synchron rotierenden Trabanten Io und Europa auf ihren leicht elliptischen Bahnen im Gravitationsfeld des Jupiters enormen Verformungen und somit der inneren Aufheizung durch Reibung ausgesetzt. Der Verlust an der Rotationsenergie im System von Jupiter und Saturn ermöglicht somit gegenwärtig den Vulkanismus auf einigen Monden (z. B. Jaumann et al., 2018).

## Die Jupitermonde – Lavaströme und Kryovulkanismus

Unter der Gezeiteneinwirkung Jupiters wird Io stark deformiert und aufgeheizt. Die dadurch, seit einer Entstehung, freigesetzten  $10^{31}$  Joule reichen aus, den bis heute aktiven Vulkanismus und einen Magmaozean im Innern aufrecht zu erhalten (z. B. Jaumann, 2015). Die hohe Wärmeenergie erklärt auch, warum Io vollkommen trocken ist, da alles Wasser schon bei der Entstehung ausgetrieben wurde.

Der Jupiter-Mond Io misst nur 30 Prozent des Erddurchmessers, hat aber mehr als 150 aktive Vulkane. Diese sind allerdings um einiges größer als die Vulkane auf der Erde. Ihre Lavaströme erreichen mehrere hundert Kilometer Länge und die Eruptionswolken der Ausbrüche sind noch 300 Kilometer über der Oberfläche zu sehen. Die Zusammensetzung der vulkanischen Auswurfmasse und Ablagerungen in erster Linie basaltisch, allerdings ist in den Laven auch ein hoher Anteil an Schwefel enthalten.

Die schwefelhaltigen Moleküle erscheinen, je nach Temperatur, als unterschiedliche chemische Anordnung der Schwefelatome. Dies verleiht Io ein sehr farbenprächtiges, von gelb über grün, rot, orange und schwarz wechselndes Aussehen. Das vulkanische Treibgas ist hauptsächlich Schwefeldioxid, das sich als weißlicher Frost auf der Oberfläche abgelagert. Wegen seiner geringen Größe hat Io während seiner Entstehung die Zusammenballungsenergie zu schnell verloren, um vollständig zu differenzieren, so dass viel Schwefel im Mantel verblieb und nicht mit dem Eisen in den Kern gelangte wie z. B. in der Erde. Wegen seines geringen Schmelzpunktes gelangt dieser Schwefel dann sehr leicht mit dem Silikatvulkanismus an die Oberfläche.

Ebenso wie Io wird auch der Jupiter-Mond Europa durch Gezeitenreibung aufgeheizt und die Oberfläche ist ebenfalls sehr jung. Europas Kruste besteht aus Eis und wird durch die Gezeitenkräfte periodisch um etwa 60 Meter angehoben. Die freigesetzte Energie ist zwar viel geringer als bei Io, reicht aber um das Wassereis im Inneren

aufzuschmelzen, besonders wenn es mit Salzen vermischt ist. Dringt warmes, salzhaltiges Wasser – vermischt mit tonhaltigem Gesteinsschlamm aus der Mantel/Kern-Grenze – durch die Kruste an die Oberfläche, so bewegt sich die Masse dem Gefälle folgend ähnlich wie Lava oder ein Gletscher. Schließlich gefriert dieses Material an der Oberfläche und erstarrt nach einiger Zeit zu einer mächtigen Ablagerung.

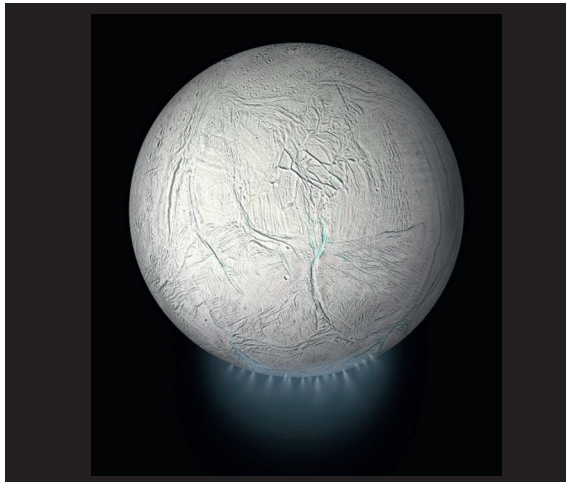
Bei höheren Temperaturen im Inneren von Europa wird Wasserdampf wie bei einem Geysir ausgestoßen, gefriert und fällt als Schnee auf die Oberfläche zurück. Dieser Prozess zusammen mit dem Austreten von Wasser/Schlammgemischen wird Kryovulkanismus genannt. Sich kreuzende Risse, Spalten, Gräben, steile Böschungen, langgezogene Bergrücken, zerbrochene und ineinandergeschobene Schollen sind die dominanten Oberflächenformen auf dem Jupiter-Mond Europa und zeugen von der Beanspruchung der Kruste durch kryovulkanische und eistektonische Prozesse, verursacht durch einen etwa 100 Kilometer mächtigen Ozean unter der Eiskruste (z. B. Jaumann et al., 2018).

Auch der Jupiter-Mond Ganymed hat einen durch Gezeitenreibung erzeugten Wasserozean unter seiner Eiskruste. Allerdings ist seine Kruste mächtiger als bei Europa. Daher sind kryovulkanische Oberflächenformen weniger stark ausgeprägt und seine Oberfläche ist älter. Ganymed hat aber wie Europa eine ausgeprägte Eistektonik.

## Monde von Saturn und Neptun

Aktiver Kryovulkanismus ist auf dem Saturnmond Enceladus zu beobachten. Der Mond misst nur 502 Kilometer im Durchmesser. Seine Oberfläche besteht aus sehr hellem Wassereis und Frost und reflektiert nahezu das gesamte einfallende Sonnenlicht. Eine Hemisphäre weist keine Einschlagskrater auf und ist damit extrem jung (s. Abb. 1 und Abb. 2).

Die Raumsonde Cassini hat im Jahr 2004 in der Südpolregion eine Anzahl von langgezogenen breiten Spalten entdeckt, aus denen gewaltige geysirartige Eruptionen von Wasserdampf, an-



Die **Abbildung 1** zeigt den eisigen Saturnmond Enceladus mit der Wolke aus Eispartikeln, Wasserdampf und organischen Molekülen, die aus Brüchen in der Südpolregion des Mondes sprüht.  
Illustration: NASA/JPL-Caltech

deren Gasen und komplexen organischen Molekülen mehrere hundert Kilometer emporgeschleudert werden. Das ausgeworfene Material gefriert und fällt als Schnee auf die Oberfläche zurück. Die Temperaturen an den Spalten liegen bei  $0^{\circ}\text{C}$ , sind damit also  $200^{\circ}$  wärmer als die Umgebungstemperatur (z. B. Jaumann et al., 2018). Aber nicht alle Eiskristalle fallen zurück, die schnellsten verbleiben in einem Ring (dem E-Ring) auf der Bahn von Enceladus.

Da der Mond gebunden rotiert, zeigt eine Hemisphäre in Flugrichtung, die andere nach hinten. In Flugrichtung sammelt Enceladus dann die Eispartikel ein. Dies führt dazu, dass sich nicht nur am Südpol im Bereich der Ausbrüche, sondern auf der gesamten nach vorne gerichteten Hemisphäre eine mächtige Frostschrift ablagert, die für die hohe Reflexion der Sonneneinstrahlung verantwortlich ist. Die Energie für den Kryovulkanismus kommt auch bei Enceladus aus der Gezeitenreibung des Mondes mit Saturn und der Resonanz mit seinen Nachbarmonden.

Auch bei Enceladus befindet sich zumindest teilweise ein flüssiger Wasserozean unter der Eiskruste der Kontakt zum Gesteinskern hat, was die Zusammensetzung der Auswurfwolke be-

legt. Neben  $\text{H}_2\text{O}$  sind noch andere Gase wie  $\text{CO}_2$  und  $\text{NH}_3$  (Ammoniak) sowie auch komplexere Kohlenwasserstoffverbindungen im Eruptionsmaterial enthalten.

Auch der größte Saturnmond Titan hat einige Oberflächenformen, die an Kryovulkane erinnern. Zudem ist die dicht mit Methan angereicherte Stickstoffatmosphäre dieses großen Mondes vermutlich durch kryovulkanische Tätigkeit entstanden. Die Oberfläche des Neptun-Mondes Triton besteht aus Wassereis und gefrorenem Stickstoff. Auch hier sprechen kreuzende Risse, Spalten, Gräben, steile Böschungen und ausgedehnte Ebenen für tektonische und kryovulkanische Aktivität. Die Voyager-2-Sonde der NASA hat geysirartige Eruptionen, vermutlich von Stickstoff, beobachtet, die bis zu 8000 Kilometer über die Oberfläche reichten. Diese Eruptionen ebenso wie ausgedehnte Ebenen kommen besonders nahe dem subsolaren Punkt vor. Dies legt die Vermutung nahe, dass jahreszeitlich bedingte Sonneneinstrahlung Gas im Untergrund mobilisiert.

### Die Zwergplaneten Pluto und Ceres

Auch auf Pluto finden sich aus Stickstoff-, Methan- und Kohlenmonoxideis bestehende Ebenen. Die größte davon, Sputnik Planum, zeigt an einigen Stellen große, mehreckige Muster, die als Konvektionszellen interpretiert werden.

In diesen Zellen sind große Blöcke aus Wassereis eingebettet, deren Ränder von tiefen Einsenkungen umgeben sind. Vermutlich wurde in Sputnik Planum die Wassereiskruste durch austretenden flüssigen Stickstoff aufgebrochen, wodurch sich Krustenblöcke in dem ausfrierenden Stickstoffsee bewegen konnten. Da das Wassereis wärmer ist als Stickstoff, sublimierte dieser an den Rändern der Schollen, wodurch Verdampfungslöcher in Form der Einsenkungen entstanden sind. Der verdampfte Stickstoff ist an den gebirgigen Rändern von Sputnik Planum wieder ausgefroren und hat dort große Gletscher gebildet, die zurück in das Becken Sputnik Planum geflossen sind. Allerdings zeigen einige Berge auch zentrale Einsturzsenken, was auf kryo-

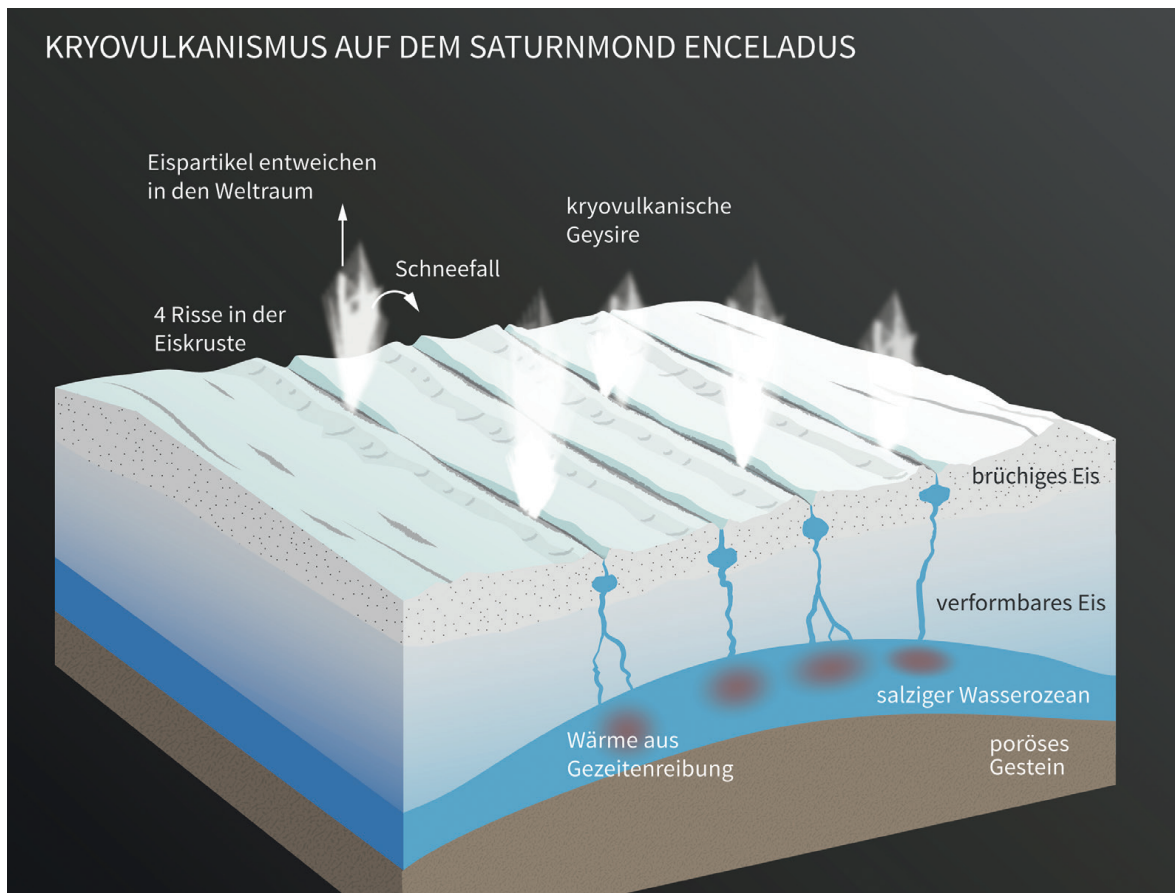


Abb. 2: Schematische Darstellung des Kryovulkanismus auf dem Saturnmond Enceladus.  
Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de / CC BY 4.0

vulkanische Aktivität hindeutet, die möglicherweise durch den großen Einschlag, der das Sputnik Becken bildete, ausgelöst wurde (z. B. Jaumann et al., 2018).

Auch auf dem anderen Zwergplaneten Ceres im Asteroidengürtel hat man domartige Aufwölbungen (Ahuna Mons) und ebenfalls domartige karbonathaltige helle Ablagerungen im Zentrum eines 92 Kilometer großen Einschlagskraters entdeckt, die auf hydrothermale kryovulkanische Prozesse zurückgeführt werden (z. B. Jaumann et al., 2018). Wie jedoch diese hydrothermalen Prozesse genau abgelaufen sind, was sie ausgelöst hat und wie es zur Ablagerung des hellen Materials kam, ist noch nicht vollständig geklärt.

Der Blick in unser Sonnensystem zeigt also, dass Vulkanismus eine Eigenschaft vieler Himmelskörper ist. Deutlich wird ebenso, dass dieser, trotz der erheblichen Bandbreite, die das Phänomen auf der Erde schon aufweist, noch vielfältiger und faszinierender ist als auf unserem Planeten. Das gilt insbesondere für den Kryovulkanismus, der funktional ähnlich dem Magma-Vulkanismus ist, aber völlig andere Medien ins Spiel bringt. In allen Fällen aber ist es letztlich der Wärmeausgleich nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der vulkanische Phänomene motiviert. Man darf gespannt sein, was der Kosmos den Vulkanologen in Zukunft noch präsentieren wird.

## Referenzen

- Boltzmann, L. (1884). Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. *Annalen der Physik*, 258(6), 291-294, doi:10.1002/andp.18842580616
- Bralower, T. J., Charles K. Paull, C. K. & Leckie, R. M. (1998). The Cretaceous-Tertiary boundary cocktail: Chicxulub impact triggers margin collapse and extensive sediment gravity flows. *Geology*, 26(4), 331-334. doi:10.1130/0091-7613(1998)026<0331:TCTBCC>2.3.CO;2
- Cassen, P. M., Peale, S. J. & Reynolds, R. T. (1982). Structure and evolution of the Galilean Satellites. In D. Morrison (Hrsg.), *Satellites of Jupiter* (S. 93-128). Tucson: Univ. of Arizona Press.
- Christensen, U. (2008). A sheet-metal geodynamo. *Nature*, 454, 1058-1059. doi:10.1038/4541058a
- Covey, C., Thompson, S. T., Weissman, P. R. & MacCracken, M. C. (1994). Global climatic effects of atmospheric dust from an asteroid or comet impact on Earth. *Global and Planetary Change*, 9, 263-273. doi:10.1016/0921-8181(94)90020-5
- International Energy Agency – IEA. (2009). *World Energy Outlook*. Paris: IEA Publications.
- Janle, P. (1996a). Vulkanismus im Planetensystem, Teil 1: Grundlagen und Vulkanismus auf Erde und Mond. *Sterne und Weltraum*, 35(1), 20-29.
- Janle, P. (1996b). Vulkanismus im Planetensystem, Teil 2: Vulkanismus der terrestrischen Planeten. *Sterne und Weltraum*, 35(2), 102-115.
- Janle, P. (1996c). Vulkanismus im Planetensystem, Teil 3: Vulkanismus im Jupitersystem. *Sterne und Weltraum*, 35(5), 357-363.
- Jaumann, R. (2015). Volcanism in the Solar System. *SPATIUM*, 35, 3-19.
- Jaumann, R., Köhler, U., Sohl, F., Tirsch, D. & Pieth, S. (2018). *Expedition zu fremden Welten: 20 Milliarden Kilometer durch das Sonnensystem*. Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-54996-4
- Lissauer, J. J. & de Pater, I. (2013). *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability*. New York: Cambridge Univ. Press.
- Stefan, J. (1879). Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 79, 391-428.

## Marsvulkan Olympus Mons – der größte Vulkan unseres Sonnensystems

Oliver Jorzik, PD Dr. Dierk Spreen (Earth System Knowledge Platform | ESKP)

Fachliche Durchsicht: Prof. Dr. Ralf Jaumann (Freie Universität Berlin, Institut für Geologische Wissenschaften)

**Der Olympus Mons auf dem Mars ist der größte und beeindruckendste Vulkan im Sonnensystem. Er gehört zum Typus der Schildvulkane und liegt über einem „Hotspot“. Er gilt als erloschen, vielleicht ruht er aber auch bloß. Wie auch auf der Erde, spielen Vulkane auf dem Mars eine wichtige Rolle in der Planetengeschichte. Dennoch ist diese Geschichte völlig anders verlaufen.**

- Auf dem Mars befindet sich der größte Vulkan unseres Sonnensystems.
- Neben Einschlagkratern prägen die Folgen des Vulkanismus den heutigen Mars.
- Die Erforschung des Mars ist mit der Frage nach außerirdischem Leben eng verbunden.

Als Giovanni Schiaparelli im Jahr 1877 seine „Canali“ auf dem Mars entdeckte, wurde der Astronom am Osservatorio Astronomico di Brera in Mailand auf einen Schlag weltberühmt. Er nahm riesige linienförmige Strukturen wahr, 1.000 Kilometer lange Marskanäle, hinter deren Entstehung phantasiebegabte Autoren später intelligente Lebewesen sahen. Mit dieser Interpretation riefen sie den Mythos vom Marsmenschen ins Leben. Schiaparelli selber war unentschieden, ob die Kanäle wetterbedingte und geologische Ursachen hatten oder ob es nicht doch Wesen auf dem Mars gäbe, die sie gebaut hätten. Der Rote Planet ließ Schiaparelli nicht los. Zwei Jahre später entdeckte er bei weiteren Untersuchungen in der Region Tharsis ein helles Gebiet. Schiaparelli dachte, es würde sich um Schnee handeln und nannte das große Gebiet „Nix Olympica“ („nix“ für lateinisch Schnee).

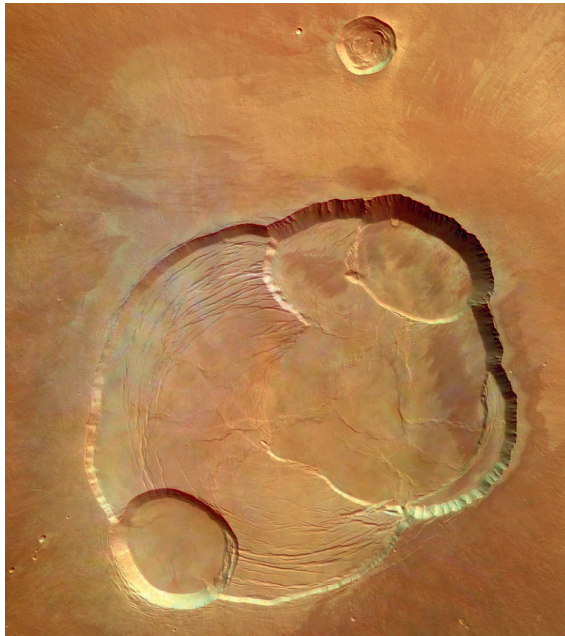
Schnee und Wasser auf dem Mars? Der Gedanke daran treibt die Forschung bis heute an. Hundert Jahre nach Schiaparellis Entdeckungen schickte die NASA mehrere Mariner-Sonden Richtung Mars. Mitte der sechziger Jahre setzte die Mariner-4-Sonde dem Mythos von intelligentem Leben auf dem Mars ein Ende. Der Mars entpuppte sich als mondähnlicher Himmelskörper

mit einer dünnen Atmosphäre, die im Wesentlichen aus Kohlendioxid besteht. Auch von künstlichen Kanälen fand sich keine Spur. Die Mitte der 1970er auf dem Mars gelandeten Viking-Sonden führten zwar Experimente mit sich, die nach Lebensspuren fahnden sollten, aber sie erbrachten keine eindeutigen Ergebnisse. Bis heute ist die Frage, ob es auf dem Mars, während seiner langen Geschichte, zumindest einmal Leben gegeben haben könnte, nicht endgültig geklärt.

### Die drei Marszeitalter

Die Geschichte des Planeten Mars wird von der Forschung in drei große geologische Epochen eingeteilt. Das erste Marszeitalter, das Noachium, wird von etwa 4,1 bis 3,7 Milliarden Jahren vor heute datiert. Für diese Zeit sind eine hohe Zahl von Meteoriteneinschlägen („das große Bombardement“), zahlreiche Flusssysteme mit pH-neutralem Wasser, eine hohe Vulkanaktivität und gewaltige Spannungen in der Marskruste charakteristisch.

Hiernach folgte das Hesperium, das von etwa 3,7 bis 3,4 Milliarden Jahren vor heute datiert wird. Kennzeichnend für dieses Zeitalter sind



**Abb. 1:** Der Marsvulkan Olympus Mons ist der größte Vulkan in unserem Sonnensystem. Allein seine Caldera hat eine Tiefe von 3 Kilometern und einen Durchmesser von ca. 90 km. Diese Aufnahme ist das erste hochauflösende Farbbild, das die gesamte Gipfelregion des Olympus Mons abdeckt, aufgenommen mit einer hochauflösenden Stereokamera an Bord des Mars Express.

Foto: ESA/DLR/FU Berlin, CC BY-SA 3.0 IGO

gigantische, aber periodische Flutereignisse und große Canyons. Zu dieser Zeit muss es zu einem weitreichenden, marsweiten Klimawandel gekommen sein. Der pH-Wert des Wassers wurde geringer, also sauer, und die Ablagerungen, die dabei entstanden, bestanden nicht mehr aus Tonmineralen, sondern aus Salzen. Die vulkanische Aktivität setzt sich während dieser Epoche fort.

Das Amazonium ist das jüngste und längste Marszeitalter. Es begann von etwa 3,4 Milliarden Jahren und dauert bis heute an. Wasseraktivität, Tektonik und Vulkanismus kommen weitgehend zum Erliegen. Dagegen bildeten sich die meisten Gletscher und die Ablagerungen in den Polregionen. Die Windaktivität wird zu einem formgebenden Prozess an der Oberfläche. Durch Wind verursachte Abtragungen und Dünenbildungen

werden nicht mehr von anderen geologischen Prozessen verwischt (Jaumann et al., 2018, S. 126-128).

### Der größte Berg im Sonnensystem

Das von Schiaparelli benannte Schneegebiet in der Nähe der Mars-Region Tharsis nahmen 1969 und 1971 die amerikanischen Mariner-Sonden 7 und 9 genauer unter die Lupe. Bei den Fotoaufnahmen von dem Gebiet kristallisierten sich rund um das Nix Olympica vier riesige Vulkane heraus. Der größte dieser Vulkane war identisch mit dem von Schiaparelli entdeckten „Schneegebiet“.

Fortan wurde dieser gigantische Schildvulkan Olympus Mons („mons“ für lateinisch Berg) genannt. Der Berg hat wahrlich olympische Ausmaße. Nimmt man die Umgebung als Referenzpunkt ist er etwa 26 Kilometer hoch. Relativ zum Nullniveau, das auf dem Mars durch einen Luftdruck von 6,1 Millibar definiert ist, da es dort keine Meere und folglich auch keinen Meeresspiegel gibt, erreicht der Olympus Mons eine Höhe von 21 Kilometern (Jaumann et al., 2018, S. 131). Das ist auf jeden Fall ein Vielfaches der Höhe des Mount Everest, der mit 8.838 Metern über dem Meeresspiegel der höchste Berg auf der Erde ist. Der optische Eindruck vor Ort muss eindrucksvoll sein – man versuche einfach, sich den Blick auf einen Berg vorzustellen, der sich 26 Kilometer über seine Umgebung erhebt.

Mit seinen immensen Ausmaßen ist Olympus nicht nur der größte bekannte Vulkan unseres Sonnensystems, sondern der größte bekannte Berg in unserem Planetensystem überhaupt. Sein Durchmesser beträgt rund 600 Kilometer, das entspricht etwa der Strecke von Paris nach Frankfurt am Main. Seine Außenhänge weisen bis zu acht Kilometer hohe Steilkanten auf (Jaumann et al., 2018, S. 131). Sie geben ihm das Bild einer gigantischen außerirdischen Trutzburg.

Schildvulkan heißt er wegen seines schildartigen Aussehens. Es entsteht, wenn dünnflüssige Lava in hoher Geschwindigkeit ausfließt. Wir kennen

solche Vulkane auch auf der Erde auf Hawaii oder auf Island. Der Marsvulkanberg Olympus Mons wuchs wahrscheinlich ganz ähnlich wie die hawaiianischen oder kanarischen Vulkane auf einem „Hot Spot“, d. h. auf einem heißen Punkt tief unter der Oberfläche, von dem flüssiges Material aufsteigt. Weil es auf dem Mars aber keine Plattentektonik gibt, bildet ein Hotspot keine Kette von Vulkanen auf einer sich darüber hinwegschiebenden ozeanischen oder kontinentalen Platte, sondern bleibt immer an derselben Stelle. Die an die Oberfläche kommende dünnflüssige Lava verteilt sich folglich nicht auf mehrere Feuerberge, sondern bildet mit jeder erneuten Aktivität Schicht für Schicht einen einzigen, gewaltigen Vulkan.

### Weitere Vulkangiganten in der Nachbarschaft

In der Mitte dieses Mars-Schildvulkans liegen mehrere Calderen – riesige trichterförmige Mulden, die durch Explosion oder Einsturz der Magmakammern entstanden sind. Bekannte Calderen auf der Erde sind die des Vesuvs in Italien oder des Mount St. Helens in den USA. Die Calderen dieser beiden Vulkane durchmessen wenige Kilometer und sind Winzlinge im Vergleich zu der zentralen Caldera des Olympus Mons, die einen Durchmesser von bis zu 90 Kilometer aufweist (Köhler, 1978, S. 119). Die ineinander liegenden Calderen des Olympus Mons weisen unterschiedliche Alter auf. Die jüngsten sind 134 Millionen Jahre (134 Ma = Megaannum) alt, die ältesten 712 Millionen Jahre (Werner, 2005, S. 130).

Der Vulkan Olympus Mons ist nicht allein. Die Oberfläche des Mars ist mit weiteren zahlreichen großen Vulkankegeln bestückt. Insgesamt konzentrieren sich die Marsvulkane in vier Regionen auf dem Planeten. Olympus Mons liegt nahe der Tharsis Region, die sich 4000 Kilometer in Ost-West-Richtung und über 3500 km in Nord-Süd-Richtung ausdehnt. In dieser Region finden sich zwölf größere Vulkane, mehr als hundert kleinere Schildvulkane und ausgedehnte Lavaebenen. Etwas nordöstlich vom Olympus Mons befindet sich der Vulkan Alba Patera. Sein Durchmesser

### ENTSTEHUNG DES PLANETEN MARS

Das geschah vor ...



- ▶ **4,5 Milliarden Jahren**
  - Entstehung des Planeten, älteste Gesteine
- ▶ **etwa 4,3 Milliarden Jahren**
  - vermutlich Kollision mit planetarem Körper
  - Entstehung der nördlichen Tiefebene
- ▶ **4,3 Milliarden Jahren**
  - mögliche initiale plattentektonische Aktivität mit kurzfristigem Magnetfeld
  - Kruste wächst schnell, Einplattenplanet entsteht
  - Spuren von Wasser auf der Oberfläche
- ▶ **4 Milliarden Jahren**
  - Beginn vulkanischer Aktivität in der Tharsisregion
- ▶ **3,9 Milliarden Jahren**
  - Entstehung des Argyre-Einschlagbeckens
  - Beginn vulkanischer Aktivität in der Elysiumregion
- ▶ **3,8–3,7 Milliarden Jahren**
  - Ausbruch des Olympus Mons
- ▶ **4–3,5 Milliarden Jahren**
  - dramatischer globaler Klimawandel
  - große Flutereignisse
  - Einschlag eines kilometergroßen Asteroiden
  - Entstehung des Hellasbeckens (südliche Hemisphäre)
  - Wechsel von neutralem zu saurem Milieu
- ▶ **3,7 Milliarden Jahren**
  - Ende des ersten Marszeitalters (Noachium)
  - Beginn des zweiten Zeitalters (Hesperium)
- ▶ **3,1 Milliarden Jahren**
  - Beginn des jüngsten Marszeitalters (Amazonium)
  - Gletscher und die Ablagerungen an den Polen entstehen
  - stärkere Präsenz von Windabtragungen und Dünenbildungen

Abb. 2: Zeitleiste zur Entstehungsgeschichte des Mars. Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de / CC BY 4.0

ist mit mehr als 1.000 Kilometer beinahe doppelt so groß wie der des Mons Olympus, allerdings ragt er nur drei Kilometer über seine Umgebung auf. Ebenfalls in der Nähe sind Ascreaus Mons, 18 Kilometer hoch, der 12 Kilometer hohe Pavonis Mons oder der 14 Kilometer hohe Arsia Mons beheimatet (Jaumann et al., 2018, S. 132). Diese drei Riesenvulkane liegen auf einer Linie im Scheitel von Tharsis und bilden mit dem Olympus ein gleichschenkliges Dreieck, mit Olympus an der Spitze und Pavonis fast in der Mitte der Basis.

Keiner dieser Vulkane ist noch aktiv. Die älteste nachgewiesene Lava auf dem Olympus Mons ist

etwa zwei Millionen Jahre alt. Geologisch gesehen ein relativ kurzer Zeitraum, der durchaus auch nur eine Ruhepause bedeuten kann. Das ursprüngliche Entstehungsdatum des „Proto-Olympus“ könnte durchaus 3,8 Milliarden Jahre (3,8 Ga = Gigaannum) zurückliegen. Die Entwicklungsgeschichte des Vulkans führt allerdings naturgemäß zu unterschiedlichen Angaben bezüglich des Alters erstarrter Lavaablagerungen in der Caldera des Vulkans (Musiol et al., 2016, S. 257; Werner, 2005, S. 127 ff.). Olympus Mons kann daher gut auch der Vulkan mit der längsten Aktivitätsdauer im Sonnensystem sein.

### Marsatmosphäre von Vulkanen beeinflusst

Die CO<sub>2</sub>-haltige Atmosphäre des Mars erklärt sich aus den vulkanischen Aktivitäten. Die vulkanische Aktivität begann von mehr als vier Milliarden Jahren und endete mit Ausnahme lokaler Einzelereignisse vor etwa hundert Millionen Jahren. Letzte Vulkanaktivitäten hat es am Olympus Mons aber noch vor zwei Millionen Jahren gegeben. Der Mars ist kleiner als die Erde, seine erkaltete Kruste dicker und es gibt zudem keine Plattentektonik, weshalb der Vulkanismus im Gegensatz zu dem auf der Erde im Großen und Ganzen erlosch. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass es in der Marskruste irgendwo noch heiße Magmakammern gibt, die auch in der Zukunft zu erneuter vulkanischer Aktivität führen können.

Wie auf der Erde reicherten die Vulkane auch auf dem Mars die Atmosphäre mit Treibhausgasen an. Aufgrund des 95%igen CO<sub>2</sub>-Gehalts seiner Atmosphäre ist es auch heute auf dem Mars noch vergleichsweise „mild“. Am Boden kann die Temperatur in Äquaturnähe tagsüber durchaus auch etwas über 0° Celsius steigen, nachts fällt sie dann aber auf bis zu minus 80° Celsius. Anders als auf der Erde reicherte sich die Marsatmosphäre aber nicht nachhaltig und dauerhaft mit Sauerstoff an. Für den Sauerstoffgehalt von 21 Prozent auf der Erde ist einerseits die Photosynthese verantwortlich – ein organischer Prozess, der CO<sub>2</sub> in Zucker und Sauerstoff um-

wandelt (Jaumann et al., 2018, S. 95 f.). Andererseits wurden durch die Sedimentablagerungen aus Kalkstein, die das Leben auf der Erde hinterlassen hat, gewaltige Mengen CO<sub>2</sub> aus der Erdatmosphäre entnommen und in die Erdkruste eingelagert (Geldmacher et al., 2020). Zudem hat die Erde ein stärkeres Gravitationsfeld und kann daher Sauerstoff besser an sich binden.

Auf der Erde begann der Umwandlungsprozess der Atmosphäre vor etwa 3,5 Milliarden Jahren, ausgelöst durch den Stoffwechsel von Blaualgen. Die Erdatmosphäre, wie wir sie kennen, gibt es aber erst seit ca. 350 Millionen Jahren. Dennoch könnte der Mars in der Frühzeit des Sonnensystems eine größere Ähnlichkeit mit unserem Planeten gehabt haben als heute. Die Forschung schwankt in Bezug auf die Marsfrühzeit zwischen den Hypothesen „warm und feucht“ und „kalt und feucht“ (Köhler, 2019a). „Vieles deutet darauf hin, dass es kurz vor dem Übergang vom Noachium zum Hesperium (etwa vor 3,7 Milliarden Jahren) einen einschneidenden Klimaumschwung gab, bei dem sich das Marsklima von mäßig kühlen, feuchten und neutralen Bedingungen zu deutlich kühleren, trockeneren und sauren Umweltbedingungen gewandelt hat“ (Jaumann et al., 2018, S. 136). Heute dagegen ist der Mars trocken und kalt. Ob es aber auch auf dem Mars zur Entstehung von Leben gekommen sein könnte, ein solches vielleicht sogar heute noch existiert, soll nun in einer Reihe von Missionen erforscht werden. Die NASA plant die Mission „Mars 2020“ noch dieses Jahr zu starten. „ExoMars“ (ESA/Roskosmos) wurde auch wegen COVID-19 auf 2022 verschoben (Köhler, 2019b; Nestler, 2020; Schulze-Makuch, 2020).

## Referenzen

- Geldmacher, J., Werner, R., Hauff, F. & Uenzelmann-Neben, G. (2020). Marine Supervulkane und deren Auswirkungen in der Erdgeschichte. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* (S. 117-120). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2.5.6
- Jaumann, R., Köhler, U., Sohl, F., Tirsch, D. & Pieth, S. (2018). *Expeditionen zu fremden Welten. 20 Milliarden Kilometer durch das Sonnensystem*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-662-54996-4
- Köhler, H. W. (1978). *Der Mars. Bericht über einen Nachbarplaneten*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. doi:10.1007/978-3-322-99038-9
- Köhler, U. (2019a). Marsforschung aktuell (I). Die Perspektive aus dem Orbit – Das große Ganze aus der Distanz erkennen. *Raumfahrt Concret*, 21(106), 23-27.
- Köhler, U. (2019b). Marsforschung aktuell (II). Auf „dem Boden der Tatsachen“. Der Versuch, zwei große Fragen zu beantworten. *Raumfahrt Concret*, 21(109/110), 39-45.
- Musiol, S., Holohan, E. P., Cailleau, B., Platz, T., Dumke, A., Walter, T. R., Williams, D. A. & van Gasselt, S. (2016). Lithospheric flexure and gravity spreading of Olympus Mons volcano, Mars. *JGR Planets*, 121(3), 255-272. doi:10.1002/2015JE004896
- Nestler, R. (2020, 12. März). Start von „ExoMars“ wird erneut verschoben [www.tagesspiegel.de]. Aufgerufen am 14.03.2020.
- Platz, T. (2011). Marsvulkane – Giganten des Sonnensystems. *Sterne und Weltraum*, (5), 24-32.
- Rauchhaupt, U. v. (2009). *Der neunte Kontinent. Die wissenschaftliche Eroberung des Mars*. Frankfurt am Main: Fischer.
- Schulze-Makuch, D. (2020, 10. Juni). Trocken und kalt: Suche nach Leben auf dem Mars. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 7. doi:10.2312/eskp.029
- Werner, S. C. (2005). *Major Aspects of the Chronostratigraphy and Geologic Evolutionary History of Mars* (Dissertation, Geowissenschaften, Freie Universität Berlin). Berlin. doi:10.17169/refubium-15705



## Anhang: Information für Reisende

### Einleitung

Auch wenn aktive Vulkane zunehmend ein touristisches Ziel werden – Vulkane sind und bleiben gefährlich. Weil sie immer auch eine unkalkulierbare Gefahr darstellen, sollten Touristen sich informieren, ob es in ihrer Urlaubsregion Vulkangefahren gibt. Für Reisende in Regionen mit aktivem Vulkanismus haben wir eine kommentierte Linkliste mit Online-Informationsangeboten zusammengestellt.

### Überblick über die Regionen

---

- ▶ Europa
- ▶ Amerika und Karibik
- ▶ Asien und Ozeanien
- ▶ Afrika

## Wo finden Reisende aktuelle Informationen zu Vulkanaktivitäten?

Oliver Jorzik, Jana Kandarr, Pia Klinghammer, PD. Dr. Dierk Spreen  
(Earth System Knowledge Platform | ESKP)

**Die nächste Reise soll in ein Land gehen, in dem es Vulkane gibt. Möglicherweise sind diese Vulkane jedoch gerade aktiv. Nicht alle Urlauber haben Vulkane als Naturgefahr im Blick, wenn sie eine Reise planen. Ob es in der Nähe des Urlaubsziels Vulkanaktivitäten gibt, sollte jeweils aktuell in Erfahrung gebracht werden. Dafür haben wir als ESKP-Redaktion eine Linkliste der lokalen Vulkanüberwachungsdienste zusammengestellt, die aktuelle Vulkan-Informationen für ausgewählte Urlaubsländer und Regionen bereitstellt.**

Für Reisende und Urlauber bieten wir an dieser Stelle eine kommentierte Linksammlung. Mit ihr können sich Reisende über aktuelle Vulkanaktivitäten am geplanten Reiseziel informieren. Sofern diese von lokalen Überwachungsdiensten zur Verfügung gestellt werden, sind auch Links zu aktuellen Gefahrenkarten aufgeführt. Die aufgeführten Länder stellen allerdings lediglich eine Auswahl an möglichen Reisezielen dar. Auch lässt der Umfang der Erläuterungen oder die Anzahl der Links keine Rückschlüsse auf dem Umfang der vulkanischen Aktivität in der betreffenden Region zu, sondern erklärt sich aus der Bereitstellung von Informationen.

Für Reisende, deren touristische Ziele nicht in der aufgeführten Liste stehen, gibt es eine Alternative mit fundierten Informationen: Mit ihrem speziellen „Global Volcanism Program“ stellen das Smithsonian-Forschungsinstitut gemeinsam mit dem USGS, dem United States Geological Survey, weitestgehend aktuelle, weltweite Informationen zu Vulkanaktivitäten online zur Verfügung. Mittels einer interaktiven Karte und einer ausgeklügelten Filtersuche lassen sich alle Regionen der Welt ansteuern, um eine schnelle Übersicht zu erhalten. Über diese Seite findet man auch die direkte Quelle aktueller Informationen, also die Observatorien der jeweiligen Vulkane. Auf der GVP-Seite finden sich seriöse Informationen über eine Vielzahl von Vulkanen in allen Regionen unseres Planeten. Die Vulkanberichte und Vulkan-Neuigkeiten gibt es in englischer Sprache.

Dies ist besonders für Reisen in Regionen sinnvoll, die über keine öffentlichen Warn-Websites verfügen oder in denen die örtlichen Informationen nur in der jeweiligen Landessprache verfügbar sind, die jedoch oft nicht von allen Besucherinnen und Besucher des Landes gesprochen werden. Aus diesem Grund kann sich ganz generell der Zugang zu Online-Übersetzungsdiensten als wertvoll erweisen. Inwieweit eine Landessprache wie z. B. Bahasa (Indonesien) übersetzt werden kann, sollte vorab geklärt werden.

Nun zur Linkliste. Für folgende Länder und Regionen haben wir hier Links zu aktuell gehaltenen Informationsdiensten zusammengestellt.

### **Europa:**

Island, Italien, Spanien & Kanarische Inseln

### **Amerika und Karibik:**

Chile, Costa Rica, Ecuador, Kolumbien, Karibik, Mexiko, USA & Hawaii

### **Asien und Ozeanien:**

Indonesien, Japan, Neuseeland, Philippinen

### **Afrika:**

Kenia & Tansania



Zur Online-Version dieses Artikels bitte QR-Code scannen.



## Europa

### Island

Island hat mehr als 30 aktive Vulkane. Zuletzt aktiv waren der Bárðarbunga (2014), der Vulkan Grimsvötn (2011), der Eyjafjallajökull (2010) sowie der Vulkan Hekla (2000). Das Vulkan-System Reykjanes machte sich in jüngster Zeit durch Erdbeben bemerkbar. Der Ausbruch des Eyjafjallajökull zeigte den Einfluss, den Vulkane auf Mobilität und Reisen haben können. Damals wurde wegen der großen Aschewolke in weiten Teilen Europas der Flugverkehr eingestellt.

#### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Eine gute Übersichtsseite über die Vulkane auf Island und den aktuellen Aktivitätsgrad der einzelnen Vulkane stellt die isländische Wetterbehörde zur Verfügung. Das Angebot ist in englischer Sprache verfügbar.

**Link zur Website:** <http://icelandicvolcanos.is/?volcano=REY>

Häufig zeigen sich vor Vulkanausbrüchen erhöhte seismische Aktivitäten. Die isländische Wetterbehörde (Icelandic Met Office) hält daher ein spezielles Informationsangebot zu aktuellen Erdbebenaktivitäten unter Vulkanen bereit.

**Link zur Website:** <https://en.vedur.is/earthquakes-and-volcanism/earthquakes/>

### Italien

Das beliebte Reiseland Italien verfügt über zahlreiche vulkanische Gebiete, von denen einige wegen ihrer regelmäßigen Aktivitäten bekannt sind. Dazu zählen: Campi Flegrei (Phlegräische Felder) nahe Neapel, Vesuv, Ätna, sowie die Liparischen Inseln (auch Äolische Inseln) mit den Inseln Stromboli und Vulcano. Gerade der Ätna oder Stromboli können als mehr oder weniger „daueraktiv bezeichnet werden“.

#### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Eine Echtzeitkarte über Vulkanaktivitäten bietet das Nationale Institut für Geophysik und Vulkanologie (INGV):

**Link zur Website:** <http://www.ingv.it/it/dati-in-tempo-reale-vulcani-maps>

Eine komplette Übersicht der aktuellen Vulkanaktivitäten für Italien stellt das Vulkanobservatorium am Ätna in tabellarischer Form und italienischer Sprache zur Verfügung.

**Link zur Website:** <http://www.ct.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-sorveglianza/prodotti-del-monitoraggio/comunicati-attivita-vulcanica>

## Kanarische Inseln (Spanien)

Die Kanarischen Inseln sind sämtlich vulkanischen Ursprungs. Vulkanausbrüche wurden von Menschen auf dem Kanarischen Archipel für die letzten 500 Jahre dokumentiert. Die zuletzt aktiven Vulkane auf den Kanaren sind: der Timanfaya-Vulkan (Montañas del Fuego), der in den Jahren 1730 bis 1736 und dann wieder im Jahr 1824 ausbrach. Er veränderte das Aussehen der Insel Lanzarote völlig. Ein Viertel der Insel wurde unter Lava und Asche begraben. Der Vulkan Chinyero auf Teneriffa war zuletzt im Jahr 1909 aktiv. Der Ausbruch dauerte nur knapp 10 Tage. Auf La Palma gab es dann 1971 einen Ausbruch währenddessen der Vulkan Teneguía und dessen Lava eine Fläche von circa 2.845.000 m<sup>2</sup> unter einer vier Meter dicken Schicht begrub. Die Lava erreichte das Meer und vergrößerte die Insel. Die letzte vulkanische Aktivität ereignete sich unter Wasser. Der Unterwasservulkan vor El Hierro brach im Juli 2011 aus. Der bekannteste Vulkan der Kanaren ist der Pico del Teide auf Teneriffa. Aber es gibt noch weitere Vulkane: die Vulkankette Cumbre Vieja auf La Palma, der Vulkan Tanganasoga auf El Hierro, der La-Gomera-Vulkan auf La Gomera und die Vulkanreihe Volcanes de Bayuyo auf Fuerteventura.

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Das Instituto Geográfico Nacional (IGN) bietet aktuelle Informationen zu den Vulkanaktivitäten auf den Kanaren. Die Meldungen und Berichte sind in spanischer Sprache verfügbar, ein Teil des Informationsangebots wird auch ins Englische übersetzt:

**Link zur Website:** <https://www.ign.es/web/ign/portal/vlc-area-volcanologia>

Wie überall sollte im Notfall den Hinweisen des Zivilschutzes Folge geleistet werden:

**Link zur Website:** <http://www.gobiernodecanarias.org/academia/scripts/default.asp>

Es gibt ein CanariWiki, welches drei Vulkane (Chinyero, Teneguía und den submarinen El Hierro-Vulkan) vorstellt und von der Regierung der Kanarischen Inseln bereitgestellt wird:

**Link zur Website:** <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Categor%C3%ADa:Volcanes>

Die „Association Volcanoes of the Canary Islands“ ist eine zivilgesellschaftliche Initiative, die zu Informationszwecken ein eigenes Portal mit vielen Informationen und News zu Vulkanen und vulkanischen Aktivitäten auf den Kanaren erstellt hat. Am Ende jedes Artikels zur jeweiligen Kanarischen Insel findet sich eine Art Karte, die farblich die Warnstufen abbildet. Die Informationen sind in spanischer Sprache verfügbar:

**Link zur Website:** <https://www.volcanesdecanarias.org/tenerife/>



## Amerika und Karibik

### Chile

Das beliebte Reiseland Chile ist geprägt von einer Vielzahl an Vulkanen, von denen etliche Aktivitäten aufweisen. 92 Vulkane werden überwacht. Die 14 gefährlichsten Vulkane sind laut Ranking des geologischen Dienstes in Chile (beginnend mit dem Gefährlichsten): Villarrica, Llaima, Calbuco, Nevados de Chillán, Puyehue-Cordón Caulle, Osorno, Mocho-Choshuenco, Antuco, Carrán-Los Venados, Cerro Azul-Quizapu, Chaitén, Lonquimay, Hudson und Láscar (Stand Juli 2020). Zunehmend sind ausländische Besucherinnen und Besucher Chiles daran interessiert, die Vulkane zu beobachten und zu besteigen. Wer das vorhat, sollte sich unbedingt über aktuelle Vulkanaktivitäten im Land informieren. Ähnlich wie die neuseeländischen Behörden bietet auch der chilenische geologische Dienst alle wichtigen Informationen und Karten übersichtlich auf einer einzigen Webseite an. Ist die Warnstufe orange oder rot erreicht, dann gibt es tägliche Berichte zur Lage am jeweiligen Vulkan.

#### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Der nationale geologische Dienst Chiles hat eine spezielle Website eingerichtet, die über aktuelle vulkanische Aktivitäten informiert und Warnsignale ausgibt. Die Reports zu aktiven Vulkanen in Chile sind in spanischer Sprache verfügbar. **Link zur Website:** <https://www.sernageomin.cl/informacion-alertas-volcanicas/>

Will man wissen, ob das eigene Reiseziel im Einflussbereich eines Vulkans liegt, sollte man für den jeweiligen Vulkan die Liste der nahe gelegenen Orte („Centros poblados o asentamientos más cercanos“) durchschauen. Hier als Beispiel für den Vulkan Nevados do Chillán: <https://www.sernageomin.cl/complejo-volcanico-nevados-de-chillan/>

### Costa Rica

Der zentralamerikanische Staat Costa Rica ist ebenfalls ein echter Vulkan-Hot-Spot. Die wichtigsten Vulkane in Costa Rica sind: Turrialba, Rincón, Poás, Irazú und Arenal.

#### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Die Universität Universidad Nacional de Costa Rica hat eine Website eingerichtet, die unter anderem über die Vulkane in Costa Rica informiert. Einer der Dienste zeigt den Aktivitätsgrad wichtiger Vulkane im Land. Das dort angezeigte Aktivitätsniveau wird derzeit etwa alle 14 Tage aktualisiert. **Link zur Website:** <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/vulcanologia/nivel-de-actividad-volcanica>

Darüber hinaus gibt es auch Echtzeit-Bilder, die alle 10 Sekunden erneuert werden und zwar von folgenden Vulkanen: Turrialba, Rincón, Poás.

**Link zur Website:** <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/camaras>

## Ecuador

Ecuador verfügt über mehr als 50 Vulkane, rund 20 davon gelten als aktiv. Bekannte Vulkane im Land sind der (inaktive) Chimborazo, der Reventador oder der Sangay. Übersichtlich auf einer Website sind für die Vulkane Reventador, Cotopaxi, Sierra Negra (auf den Galapagos-Inseln), Tungurahua, Chiles-Cerro Negro und Sangay die jeweiligen Aktivitätsniveaus (Warnstufen) zu finden. Auch alle anderen Vulkane sind in einer interaktiven Karte mit ihren jeweiligen Aktivitätsniveaus aufgeführt. Es gibt hier auch einen Steckbrief (Bsp. Chimborazu, <https://www.igepn.edu.ec/chimborazo>) zu jedem Vulkan.

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Informationen zu aktuellen vulkanischen Aktivitäten liefert das Instituto Geofísico (IG), das in der Hauptstadt Quito beheimatet ist:

**Link zur Website:** <https://www.igepn.edu.ec>

## Karibik

Viele der karibischen Inseln entlang des Antillenbogens sind vulkanischen Ursprungs. Ihre besondere Gefährlichkeit zeigte sich im Jahr 1995 beim Ausbruch des Schichtvulkans Soufrière Hills auf der Insel Montserrat. Der Ausbruch verwüstete weite Teile der Insel sowie die Hauptstadt Plymouth. Anbei eine Übersicht mit ausgewählten Vulkanen in der Karibik: Dos Hermanos, San Juan und Valle Nuevo (Dominikanische Republik), Morne la Vigie und Thomazeau (Haiti), Kick ,em Jenny und Mount St. Catherine (Grenada), Axial Chain, Morne aux Diables, Morne Diablotins und Morne Garu (St. Vincents and the Grenadines), Soufrière Hills (Montserrat), Soufrière St. Vincent (St. Vincent), Montagne Pelée (Martinique), Soufrière Guadeloupe (Guadeloupe), The Quill (St. Eustatius), Nevis Peak (Nevis), Mount Liamuiga (St. Kitts), Mount Scenery (Saba).

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Die University of the West Indies mit Sitz in Jamaika betreibt ein Monitoringprogramm für die östliche Karibik mit einer Übersicht über Vulkanaktivitäten:

**Link zur Website:** <http://uwiseismic.com/General.aspx?id=19>

Das Montserrat Volcany Observatory veröffentlicht aktuelle Informationen zum Vulkan Soufrière Hills:

**Link zur Website:** <http://www.mvo.ms>

## Kolumbien

Nach Angaben des Dienstes „Volcano Discovery“ gibt es aktuell in Kolumbien 15 Vulkane, die als aktiv gelten. Bekannte Vulkane des Landes sind der Cumbal, der Galera oder der Nevado del Huila.

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Informationen zum Vulkangeschehen liefert der Servicio Geológico Colombiano, der kolumbianische geologische Dienst mit aktuellen Meldungen und einer interaktiven Karte:

**Link zur Website:** <https://www.sgc.gov.co/volcanes>

## Mexiko

Die Webseite von Mexikos „Centro Nacional de Prevención de Desastres“, kurz CENAPRED, bietet keine ständig aktualisierten Gefahrenkarten oder Videos. Es gibt zwar täglich Berichte, die sich allerdings nicht systematisch auf einen Vulkan beziehen. Die Berichte erscheinen in spanischer Sprache. Folgende Vulkane werden überwacht: Fuego de Colima, Popocatépetl, El Chichón, Tacaná. Es ist ratsam, sich vor Ort direkt zu informieren sowie die Webseiten des anfangs beschriebenen Global Volcanism Program von Smithsonian Institut und USGS zu konsultieren. Sie bieten einen Überblick auch zu anderen Vulkanen des Landes.

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Der berühmte Vulkan Popocatépetl findet sich rund 90 km südöstlich der Hauptstadt Mexico City. CENAPRED liefert jeden Tag einen Bericht mit einem Bild:

**Link zur Website:** <https://www.gob.mx/cenapred/es/archivo/articulos?>

Zudem gibt es ein Ampelsystem mit den verschiedenen Warnstufen.

**Link zur Website:** <https://www.gob.mx/segob/articulos/el-semaforo-de-alerta-volcanica-del-volcan-popocatepetl-se-encuentra-en-amarillo-fase-2>

Das Monitoring-Zentrum der Universität UNICACH liefert Warn-Informationen zum Vulkan Tacaná. Die Alarmstufe ist auf der Webseite rechts im Bild farblich gekennzeichnet:

**Link zur Website:** <https://monitoreo.unicach.mx/index.php?p=page&v=MTA=>

UNICACH beobachtet ebenfalls den Vulkan El Chichón und macht mit dem beschriebenen Warnsystem Angaben zum Aktivitätsgrad.

**Link zur Website:** <https://monitoreo.unicach.mx/index.php?p=page&v=OO>

Der Vulkan Fuego de Colima ist laut CENAPRED der aktivste Vulkan Mexikos. Die Universität von Colima veröffentlicht regelmäßig Bulletins zur Aktivität des Vulkans.

**Link zur Website:** <https://portal.ucol.mx/cueiv/>

## USA

Die Vereinigten Staaten sind geprägt von Vulkanen. Nach Angaben von US-amerikanischen Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern gibt es aktuell 169 Vulkane, die als aktiv zu bezeichnen sind.

Viele Vulkane, die wegen ihres Aktivitätsgrades oder ihrer Nähe zu dichter besiedelten Gegenden als besonders gefährlich gelten, liegen im Westen und Nordwesten der USA. Dazu zählen: Redoubt Volcano (Alaska), Mount Okmok (Alaska), Augustine Volcano (Alaska), Mount Spurr (Alaska), Makushin Volcano (Alaska), Akutan Island (Alaska), Long Valley Caldera (Kalifornien), Mount Shasta (Kalifornien), Crater Lake (Oregon), Newberry Volcano (Oregon), Three Sisters (Oregon), Mount Hood (Oregon), Glacier Peak (Washington), Mount Baker (Washington), Mount Rainier (Washington), Mount St. Helens (Washington), Yellowstone (Wyoming).

Neben den aufgeführten Vulkanen in den US-Bundesstaaten Alaska, Washington, Oregon, Wyoming und Kalifornien gibt es noch viele weitere Vulkane in den Bundesstaaten Utah, Nevada, Idaho, New Mexico, Colorado und Arizona.

Ein weiteres Zentrum des Vulkanismus in den USA ist Hawaii mit den Vulkanen Kilauea, Mauna Loa, Hualalai, Mauna Kea, Loihi und Haleakala. Darüber hinaus gibt es im Pazifik mit den Nördlichen Mariannen, Guam und Amerikanisch-Samoa offizielle Außengebiete der USA, in denen weitere Vulkane beheimatet sind.

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Als wissenschaftliche Behörde bietet der United States Geological Survey (USGS) eine Vielzahl an Informationsangeboten zu Vulkanaktivitäten. Dazu zählt eine interaktive Übersichtskarte:

**Link zur Website:**

[https://www.usgs.gov/natural-hazards/volcano-hazards?utm\\_source=Science%20Explorer&utm\\_medium=Highlighted%20Box&utm\\_campaign=Volcano%20Observatories](https://www.usgs.gov/natural-hazards/volcano-hazards?utm_source=Science%20Explorer&utm_medium=Highlighted%20Box&utm_campaign=Volcano%20Observatories)

Weiterhin stellt der USGS ein News-Angebot mit aktuellen Meldungen und Artikeln zur Verfügung:

**Link zur Website:**

<https://www.usgs.gov/natural-hazards/volcano-hazards/news>

Für einzelne Vulkane und Regionen gibt es gesonderte Zusatzinformationen:

Yellowstone: **Link zur Website:**

<https://www.usgs.gov/volcanoes/yellowstone>

Yellowstone Volcano Observatory: **Link zur Website:**

<https://www.usgs.gov/observatories/yellowstone-volcano-observatory>

Mt. Rainier: **Link zur Website:**

<https://www.usgs.gov/volcanoes/mount-rainier>

Mt. St. Helens: **Link zur Website:**

<https://www.usgs.gov/volcanoes/mount-st-helens>

Long Valley Caldera: **Link zur Website:**

<https://www.usgs.gov/volcanoes/long-valley-caldera>

Kilauea (Hawaii): **Link zur Website:**

<https://www.usgs.gov/volcanoes/kilauea>

California Volcano Observatory: **Link zur Website:**

<https://www.usgs.gov/observatories/california-volcano-observatory>

Lassen Volcanic Center (Kalifornien): **Link zur Website:**

<https://www.usgs.gov/volcanoes/lassen-volcanic-center>

Hawaiian Volcano Observatory: **Link zur Website:**

<https://volcanoes.usgs.gov/observatories/hvo/>

---

## Asien und Ozeanien



### Indonesien

Indonesien liegt am berühmten Pazifischen Feuerring. Das Land wird in höchstem Ausmaß geprägt von zahlreichen Vulkanen, die regelmäßig eine hohe Aktivität zeigen. Bekannt sind auch die Vulkane Rinjani auf Lombok oder Anak Krakatau auf Sumatra.

#### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Wie auch bei Reisen nach Japan, ist besonders für Indonesien empfehlenswert, sich vor Reiseantritt über vulkanische Aktivitäten in der Nähe des eigenen Reiseziels zu informieren.

Die Webseite „Magma“, die vom indonesischen Ministerium für Energie und Bodenschätze betrieben wird, zeigt auf einer interaktiven Karte eine Übersicht der Vulkane Indonesiens mit dem jeweiligen Status:

**Link zur Website:** <https://magma.esdm.go.id>

Die VONA-Website (Volcano Observatory Notice for Aviation) ist zwar für Piloten angelegt, die über vulkanische Aktivitäten informiert werden müssen. Sie kann aber von allen Interessierten genutzt werden. Vorteil: Die Informationen zu vulkanischen Aktivitäten in Indonesien sind top-aktuell in englischer Sprache verfügbar:

**Link zur Website:** <https://magma.esdm.go.id/v1/vona>

## Japan

Da Japan an einer sehr aktiven Subduktionszone liegt, finden sich – auch aktive – Vulkane in fast allen Regionen und auf den Hauptinseln Hokkaidō mit Vulkanen wie Usu und Asahi-dake, der Hauptinsel Honshū mit dem berühmten Fuji sowie die Hauptinsel Kyūshū mit den Vulkanen Aso, Sakurajima und Unzen.

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Es empfiehlt sich vor dem Antritt einer Reise nach Japan, Informationen über aktuelle Vulkanaktivitäten in der Nähe des Reiseziels einzuholen.

Die Webseite der japanischen meteorologischen Behörde hält für alle Gebiete eine interaktive Karte mit den neuesten Informationen zu Vulkanaktivitäten bereit:

**Link zur Website:** <https://www.jma.go.jp/en/volcano/>

Die übersichtliche interaktive Karte und die dazugehörigen Informationen sind in englischer Sprache verfügbar.

## Neuseeland

Auch Neuseeland ist ein Land mit zahlreichen Vulkanen. Wichtige Vulkane bzw. Vulkanfelder sind auf Neuseeland: Ruapehu, Whakaari/ White Island, Auckland Volcanic Field, Kermadec Islands, Mayor Island, Ngauruhoe, Northland, Okataina, Rotorua, Taranaki, Taupo sowie Tongariro. Die letzten Eruptionen waren 2012 am Tongariro und 2019 am White Island.

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Neuseeland hat für alle Vulkane eine zentrale Anlaufstelle im Internet eingerichtet, die einfach verständlich, übersichtlich und aktuell ist.

Wie aktiv sind die neuseeländischen Vulkane im Moment? Alle Informationen sind hier übersichtlich zusammengefasst:

**Link zur Website:** <https://www.geonet.org.nz/volcano>

Es gibt fünf Warnstufen. Diese Warnstufen werden hier erläutert:

**Link zur Website:** <https://www.geonet.org.nz/about/volcano/val>

Auch bietet der Informationsdienst Videos zu jedem einzelnen der oben genannten Vulkane:

**Link zur Website:** <https://www.geonet.org.nz/volcano/cameras>

## Philippinen

Derzeit sind auf den Philippinen 24 Vulkane aktiv, unter ihnen der berühmte Pinatubo, dessen Eruption 1991 zu den größten des vergangenen Jahrhunderts zählt und hunderte Todesopfer forderte. Dementsprechend gefährlich und aktiv sind etliche Vulkane im Inselstaat. Dies betrifft die Zentral-Philippinen, aber auch die großen Inseln Luzon und Mindanao. Bekannte Vulkane sind der Taal, der Pinatubo, der Bulusan oder der Mayon. Der Taal-Vulkan brach Anfang des Jahres aus. Er liegt nur etwa 75 Kilometer von der Metropolregion rund um die Hauptstadt Manila entfernt.

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Auch auf den Philippinen ist es empfehlenswert, sich vor Reiseantritt über vulkanische Aktivitäten in der Nähe des Reiseziels zu informieren.

PHIVOLCS, das philippinische Institut für Vulkane und Seismologie, betreibt eine Website in englischer Sprache. Sie fasst anlassbezogen den aktuellen Zustand der Vulkanereignisse im Land in speziellen Bulletins zusammen:

**Link zur Website:** <https://www.phivolcs.dost.gov.ph/index.php/volcano-hazard/volcano-bulletins3>

---

## Afrika



### Kenia, Tansania, Kongo

In Tansania gibt es nach Angaben des Dienstes „Volcano Discovery“ mehr als 20 Vulkane. Die bekanntesten sind der Kilimanjaro und der Ol Doinyo Lengai. In Kenia werden sogar mehr als 30 Vulkane und Vulkanfelder gezählt. Genannt werden muss auch der Vulkan Niragongo in der Demokratischen Republik Kongo.

### Informationen zu Vulkanaktivitäten

Aktuelle Informationen zu den Vulkanen in Kenia und Tansania sind über das Informationsangebot von Smithsonian und USGS erhältlich. Die dortige Ländersuche ermöglicht einen schnellen Zugriff auf die Vulkane vor Ort:

**Link zur Website:** [https://volcano.si.edu/search\\_volcano.cfm](https://volcano.si.edu/search_volcano.cfm)

## Eintrag in die ELEFAND-Liste des Auswärtigen Amtes

Wie immer gilt für Reisen in Risikogebiete die Empfehlung des Auswärtigen Amtes für deutsche Staatsangehörige, sich für Dauer des Auslandsaufenthalts über das Internet in die sogenannte **Krisenvorsorgeliste (ELEFAND: „Elektronische Erfassung von Deutschen im Ausland“** <https://elefand.diplo.de/elefandextern/home/login!form.action>) eintragen zu lassen. Die Liste hilft den deutschen Auslandsvertretungen die in ihrem Amtsbezirk ansässigen Deutschen und ihre Familienangehörigen im Notfall schnell erreichen können. Zur vertiefenden Lektüre empfehlen wir auch den ESKP-Beitrag „Urlaub in Hochrisikogebieten“ (Jorzik, 2019).

Stand: 8. Juli 2020

## Referenzen

- Jorzik, O. (2019, 31. Juli). Urlaub in Hochrisikogebieten. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 6. doi:10.2312/eskp.022
- Strehlow, K. (2020, 31. Januar). Vulkanismus auf den Philippinen und die Taal Eruption im Januar 2020. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 7. doi:10.2312/eskp.005

## Weitere Themenspezial-Ausgaben:



### ESKP-Themenspezial Rohstoffe in der Tiefsee: Metalle aus dem Meer für unsere High-Tech-Gesellschaft

Stand: Dezember 2018

Heft-DOI: <https://doi.org/10.2312/eskp.2018.2>

Online: <https://themenspezial.eskp.de/rohstoffe-in-der-tiefsee/inhalt-937105/>



### ESKP-Themenspezial Biodiversität im Meer und an Land: Vom Wert biologischer Vielfalt

Stand: Februar 2020

Heft-DOI: <https://doi.org/10.2312/eskp.2020.1>

ISBN: 978-3-98-16597-4-0

Online: <https://themenspezial.eskp.de/biodiversitaet-im-meer-und-an-land/inhalt-937146/>

## Was ist ESKP ?

Die **Earth System Knowledge Platform** ([www.eskp.de](http://www.eskp.de)) ist die Wissensplattform des Forschungsbereichs Erde und Umwelt der Helmholtz-Gemeinschaft. Getragen wird ESKP vom **Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)**, dem **Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)**, dem **Forschungszentrum Jülich (FZJ)**, dem **GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel**, dem **Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)**, dem **Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG)**, dem **Karlsruher Institut für Technologie (KIT)** sowie dem **Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ**.

Das Themenspezial-Format der Wissensplattform ESKP bietet online übergreifende Syntheseperspektiven jeweils zu einem Forschungsthema ([themenspezial.eskp.de](http://themenspezial.eskp.de)). Bereits erschienen sind die Ausgaben **„Rohstoffe in der Tiefsee“**, **„Metropolen unter Druck“**, **„Plastik in Gewässern“** sowie **„Biodiversität im Meer und an Land“**. Sämtliche Beiträge der neuen Themenspezial-Ausgabe **„Vulkanismus und Gesellschaft“** sind in der vorliegenden Publikation zusammengefasst.

Heft-DOI: [doi.org/10.2312/eskp.2020.2](https://doi.org/10.2312/eskp.2020.2)

ISBN: 978-3-9816597-3-3