

## 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.

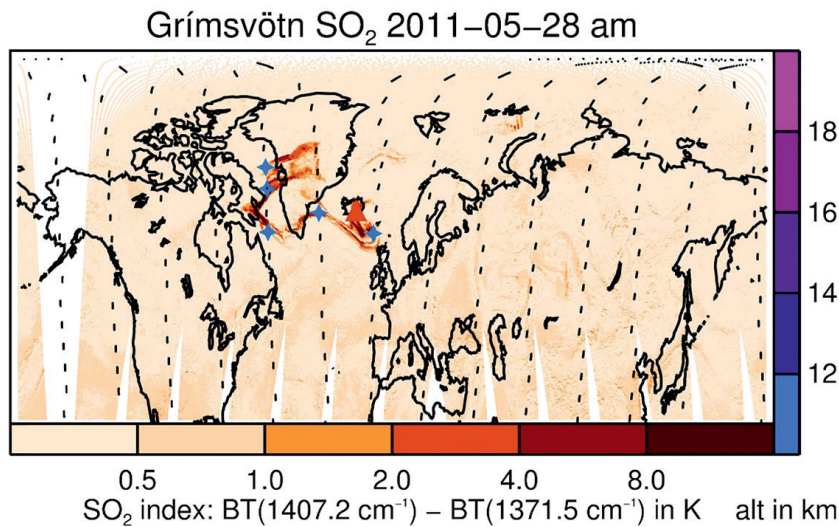
Vulkanemissionen in die Erdatmosphäre können sich erheblich auf Umwelt und Klima auswirken und auch schnell das Leben der Menschen durcheinanderwirbeln, wie der Vulkanausbruch des Eyjafjallajökull auf Island vor einigen Jahren gezeigt hat. Atmosphärenforscher und Computerwissenschaftler in Jülich beschäftigen 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

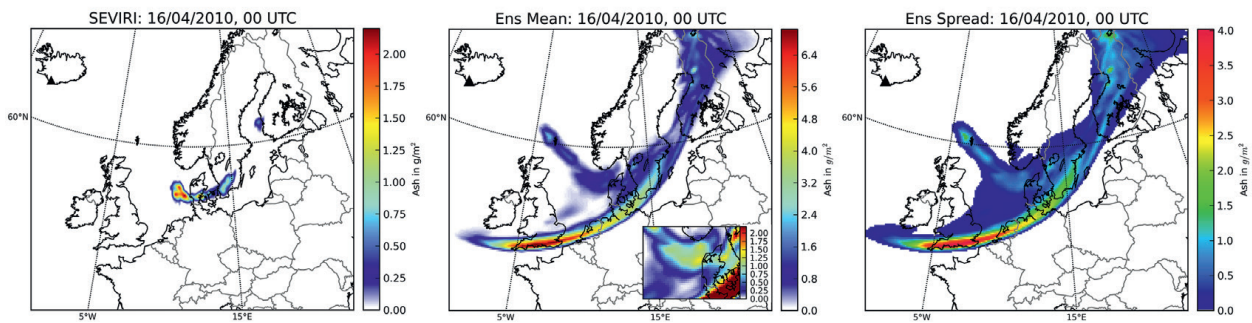
Nach dem Ausbruch des Eyjafjallajökull erfuhr die satellitengestützte Beobachtung von Vulkanemissionen einen neuen Schub. Geostationäre Satelliteninstrumente wie z. B. SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) befinden sich stationär über einem Punkt am Äquator und vermessen mit einer hohen 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-

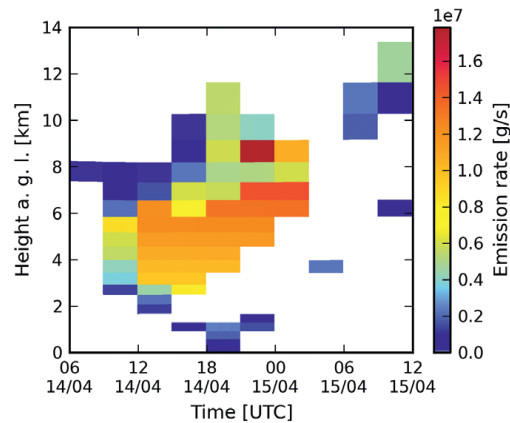


Abb. 3: Exemparisches Emissionsprofil des Ausbruchs des Eyjafjallajökull eines Ensemblemitglieds während der initialen Phase am 14. und 15. April 2010. (Quelle: Lange, 2018)

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

# 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

## Zitervorschlag:

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 | [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)