

## 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 Dichte 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.

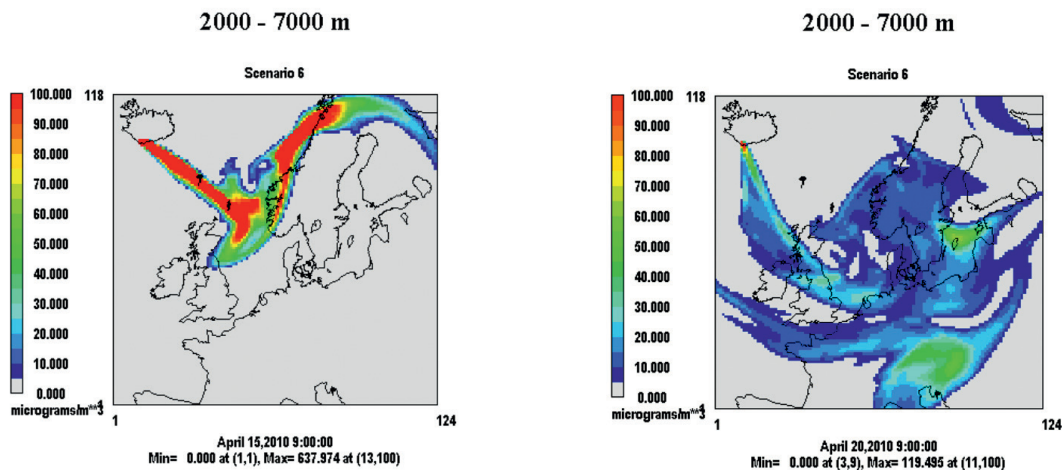


Abb. 1: Screenshots aus der Modellsimulation der Ausbreitung der Vulkanasche beim Ausbruch des Eyjafjallajökull auf Island am 14. April 2010. Gezeigt ist der Mittelwert der Aschekonzentration im Bereich zwischen 2000 m und 7000 m. GIF: HZG

### 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.

# 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/)