

5.3 Abkühlung durch starke vulkanische Eruptionen und ihre Nebeneffekte

CLAUDIA TIMMRECK

Große Vulkanausbrüche können Aufschluss über die möglichen Folgen von künstlich in die Stratosphäre eingetragenen Schwefelverbindungen geben, da sie die stratosphärische Hintergrundaerosolkonzentration für ein bis zwei Jahre erheblich erhöhen. In diesem Kapitel werden ihre wesentlichen Auswirkungen auf das Klima sowie den Wasser- und Kohlenstoffkreislauf dargestellt.

Cooling by strong volcanic eruptions and their side effects: *Large volcanic eruptions can provide insight into the potential consequences of sulfur compounds artificially introduced into the stratosphere, as they significantly increase the stratospheric background aerosol concentration for one to two years. This chapter presents their major impacts on climate and the hydrological and carbon cycle.*

Enfriamiento por fuertes erupciones volcánicas y sus efectos secundarios: *Las grandes erupciones volcánicas pueden arrojar luz sobre las posibles consecuencias de los compuestos de azufre introducidos artificialmente en la estratosfera, ya que aumentan significativamente la concentración de aerosol de fondo estratosférico durante uno o dos años. En este capítulo se presentan sus principales repercusiones sobre el clima y el ciclo del agua y del carbono.*

Große Vulkanausbrüche stellen eine der größten Unsicherheiten für die Entwicklung des Erdklimas auf Zeitskalen von einigen Jahren bis zu einem Jahrzehnt dar. Gleichzeitig bieten diese Ausbrüche eine einzigartige Gelegenheit, das Verhalten des Klimasystems zu untersuchen und unser theoretisches Verständnis darüber zu verbessern. Während diese Gründe allein schon wissenschaftliche Anstrengungen rechtfertigen, um die Auswirkungen von Vulkanausbrüchen besser zu verstehen, kommt eine weitere wichtige Motivation aus den Geoengineering-Diskussionen hinzu. Eine der am meisten diskutierten Geoengineering-Methoden beinhaltet die künstliche Erhöhung des Schwefelgehalts in der Stratosphäre, um die vulkanisch bedingte Abkühlung der Erdoberfläche nachzuahmen (s. Kap.5.4). Die Analogie mag begrenzt sein (z.B. ROBOCK et al. 2013), aber Vulkanausbrüche sind natürliche Experimente, die Aufschluss über die möglichen Folgen von künstlich in die Stratosphäre eingetragener Schwefelverbindungen (*stratospheric aerosol intervention*, SAI (s. Kap.5.4)) geben können. In diesem Kapitel werden daher die wesentlichen Klimaeffekte großer Vulkaneruptionen beschrieben.

Vulkaneruptionen können große Mengen von Gasen sowie festen Teilchen (Asche) in die obere Atmosphäre eintragen. Der Großteil der vulkanischen Asche fällt auf Grund ihrer Größe und Masse schnell aus der Atmosphäre aus. Sehr feine Ascheteilchen können jedoch mehrere Monate in der Atmosphäre verbleiben und in den ersten Tagen nach der Eruption Auswirkungen auf die Ausbreitung und die Strahlungseigenschaften der Vulkanwolke haben. Wasserdampf (H₂O) und Kohlendioxid (CO₂) sind dabei die volumenmäßig bedeutendsten vulkanischen Gase, ihre Menge ist jedoch im Vergleich zur atmosphärischen Hintergrund-

konzentration vernachlässigbar. Eine Ausnahme bildet die Eruption des submarinen Vulkans Hunga Tonga Hunga am 15. Januar 2022, der 146±5 Mt H₂O in die Stratosphäre einbrachte und damit die stratosphärische Wasserdampfkonzentration um 13% erhöhte (z.B. KHAYKIN et al. 2022). Sein möglicher Klimaeinfluss ist gegenwärtig Gegenstand mehrerer wissenschaftlicher Untersuchungen. Der Klimaeffekt von Vulkanen resultiert vor allem aus den Emissionen von schwefelhaltigen Gasen (H₂S, SO₂) in die Stratosphäre, aus denen sich Sulfataerosolpartikel bilden, deren Konzentration das stratosphärische Hintergrundaerosol um mehrere Größenordnungen übertreffen kann. Stratosphärische Aerosole, deren Durchmesser im Sub-Mikrometer-Bereich liegt, beeinflussen das globale Klimasystem auf vielfältige Weise, siehe Abb. 5.3-1. Sie haben einen direkten Strahlungseinfluss, indem sie die einfallende solare Strahlung streuen und damit zu einer Abkühlung der Erdoberfläche führen. Darüber hinaus absorbieren sie die Wärmestrahlung der Erde, wodurch es zu einer Erwärmung der mittleren und der unteren Stratosphäre kommt. Dies bedingt, dass sich große explosive Vulkanausbrüche auf den atmosphärischen Energiehaushalt und folglich auf den Wasserkreislauf auswirken. Global gesehen nimmt der Niederschlag ab, regional sind Änderungen nach dem Muster »dry-gets-wetter, wet-gets-drier« zu beobachten. Durch die Veränderung des atmosphärischen Temperaturprofils wird auch die chemische Zusammensetzung in der Stratosphäre verändert, es werden mehr Wasserdampf und Spurengase in die obere Atmosphäre transportiert. An den Oberflächen der vulkanischen Aerosolteilchen finden außerdem chemische Reaktionen statt, die zu einer Aufspaltung vorhandener Chlorverbindungen und nachfolgend zu einer Chloraktivierung und damit in einer halogen-

reichen Atmosphäre zu einem Abbau der Ozonschicht führen (s. Kap. 5.4). Die Temperaturänderungen in der Atmosphäre und im Ozean können auch Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation, wie eine Verstärkung des polaren Wirbels im nordhemisphärischen (NH) Winter, bewirken. Ebenso können Änderungen in der atlantischen meridionalen Zirkulation und der atlantischen multidekadische Variabilität und einer Zunahme des Meereises eintreten.

Beobachtungen und Rekonstruktionen vergangener vulkanischer Einflüsse

Obwohl der Ausbruch des philippinischen Vulkans Mt. Pinatubo im Juni 1991 bereits 30 Jahre zurückliegt, ist er immer noch der jüngste und am besten beobachtete große Vulkanausbruch und ist selbst nach 30 Jahren noch Gegenstand vieler wissenschaftlicher Untersuchungen (siehe MARSHALL et al. 2022 und Verweise darin). Bei dem Ausbruch des Mt. Pinatubo am 15. Juni 1991 wurden etwa 8,5 Mt Schwefel in die Stratosphäre geschleudert. Die genaue Menge ist jedoch unbekannt. Nach der Eruption des Mt. Pinatubo wurde eine globale maximale Abkühlung von 0,4 K an der Oberfläche und ein Temperaturanstieg in der unteren Stratosphäre um 2-3 K gemessen, die die atmosphärische Zirkulation beeinflusst haben. Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre wurde durch den Vulkanausbruch ebenfalls sehr stark verändert. So wurden 1992 und 1993 außergewöhnlich hohe Reduktionen des stratosphärischen Ozons beobachtet, wobei die maximale Ozonreduktion im Winter 1992/1993 in den hohen nördlichen Breiten auftrat. Signifikante Veränderungen wurden auch für den Wasserkreislauf beobachtet, unter anderem eine Abnahme des Niederschlags in den Tropen und ein Absinken des Meeresspiegels. Weitere

Details und entsprechende Referenzen sind in Übersichtsartikeln von ROBOCK (2000), TIMMRECK (2018), SCHMIDT & CARN (2022) und MARSHALL et al. (2022) zu finden.

Satellitenmessungen sind erst seit wenigen Dekaden verfügbar. Informationen über den Klimaeinfluss von historischen Vulkaneruptionen erhält man aus Daten über hydrologische und meteorologische Bedingungen zu den entsprechenden Zeiten, sogenannten Proxidaten. Sie werden aus der Analyse von Eisbohrkernen, Sedimenten, Baumringen u.a. gewonnen [siehe z.B. COLE DAI (2010)]. Die beste Chronologie klimatischer Effekte historischer Vulkanausbrüche kann anhand von Eisbohrkernen abgeleitet werden. Neue überarbeitete Datensätze von vergangenen Vulkanausbrüchen aus Eisbohrkernen haben zu einer verbesserten Rekonstruktion von Schwefelemissionen der letzten 11.500 Jahre geführt (SIGL et al. 2022). Der Klimaeinfluss historischer Eruptionen kann auch anhand von Baumringen und Korallen abgeleitet werden. Einige Eigenschaften von Baumringen, z.B. die Ringdicke und die Dichte des Spätholzes, korrelieren gut mit vulkanischer Aktivität. Baumring-Messungen von verschiedenen Orten können Informationen über die räumliche Variabilität des klimatischen Einflusses historischer Eruptionen geben. In den letzten Jahren sind zudem auch verstärkt historische Schriftquellen hinzugezogen worden, die über regionale Anomalien berichten. Multidisziplinäre Studien, die Eisbohrkernanalysen, vulkanisch-petrologische Messungen, historische Aufzeichnungen und Klimamodellierung miteinander verbinden, haben erfolgreich große Schwefelablagerungen in den Eisbohrkernen bestimmten Vulkaneruptionen zuordnen können, darunter der Eruption des Samalas im Jahr 1257, dem größten Ausbruch im letzten Jahr-

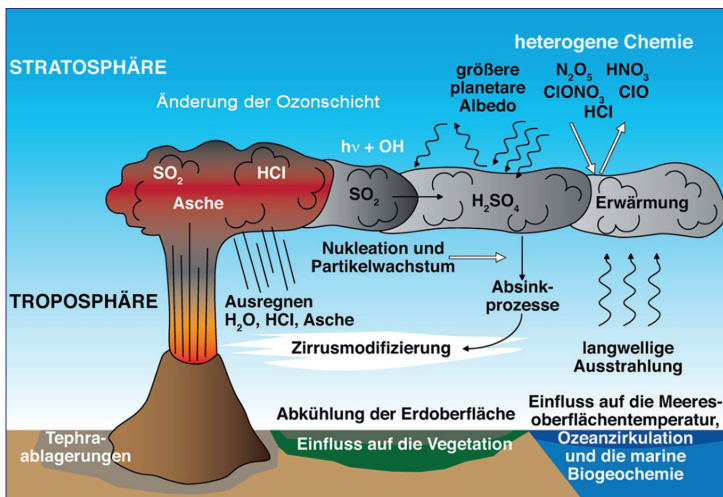


Abb. 5.3-1: Schematische Darstellung des Klimaeffektes von großen Vulkaneruptionen (Quelle: MPI-M).

tausend, deren genaue geographische Lage aber bis vor 10 Jahren unbekannt war (siehe LAVIGNE et al. 2013).

Während für die Samalas-Eruption nur sehr wenig historische Aufzeichnungen und keine Messungen vorhanden sind, existieren diese in einem gewissen Ausmaß für die größte Eruption in den letzten 500 Jahren, die Mt. Tambora-Eruption. Der Ausbruch des indonesischen Vulkans Mt. Tambora, am 11. April 1815, bei dem ca. 60 Mt SO₂ in die obere Atmosphäre eingetragen wurden, hatte einen erheblichen Einfluss auf das globale Klima (RAIBLE et al. 2016). Temperaturrekonstruktionen und Modellsimulationen zeigen eine über sieben bis acht Jahre anhaltende globale Abkühlung über Land mit maximalen Werten von über einem Grad zwei Jahre nach der Eruption. Bekannt ist das »Jahr ohne Sommer« 1816, in Europa und Nordamerika, in dessen Folge es zu Missernten, Hunger und Migration kam (BRÖNNIMANN & KRÄMER 2016).

Wichtige Faktoren für den Klimaeinfluss

Die Erforschung der vulkanischen Auswirkungen auf das Klima hat sich seit dem Pinatubo Ausbruch erheblich weiterentwickelt, auch wenn Eruptionen- größeren Ausmaßes nicht stattgefunden haben (MARSHALL et al. 2022). Seit dem Ausbruch des Pinatubo haben mehrere kleine bis mittelgroße Vulkanausbrüche den Aerosolgehalt der oberen Troposphäre und der unteren Stratosphäre beeinflusst, wobei die Schwefelemissionen um mindestens eine Größenordnung geringer waren als beim Pinatubo (SCHMIDT & CARN 2022). Durch die zahlreichen Studien aus den letzten Jahrzehnten wissen wir, dass große Vulkaneruptionen im Gegensatz zu Erdbeben und vielen anderen Naturgefahren, in der Lage sind, nicht nur eine lokale/regionale Wirkung zu erreichen, sondern das Wetter und auch das Klima auf hemisphärischen oder globalen Skalen über mehrere Jahre zu beeinflussen. Für den Klimaeffekt von Vulkaneruptionen ist die Menge der stratosphärischen Schwefelemission von zentraler Bedeutung. Neben der emittierten Schwefelmenge ist aber auch die Größenverteilung des resultierenden vulkanischen Aerosols für den Klimaeffekt entscheidend. Eine erhöhte stratosphärische Schwefelkonzentration führt zu einem Anwachsen der Aerosolpartikel. Große Partikel haben aber zum einen andere Strahlungseigenschaften als die kleineren Hintergrundaerosolteilchen. Zum anderen fallen sie schneller aus der Atmosphäre aus, so dass der Strahlungsantrieb für extrem große Eruptionen nicht mehr linear mit der Emissionsmenge zusammenhängt.

Die klimatischen Auswirkungen einer vulkanischen Störung sind nicht nur von der Stärke der SO₂ Emis-

son, sondern auch von ihrer geographischen Breite und der Jahreszeit der Eruption abhängig. Tropische Vulkane können das globale Klimasystem beeinflussen, da sich die Eruptionswolke leichter über beide Erdhälften ausbreiten kann. Eruptionen in mittleren bis hohen Breiten werden vornehmlich ihre eigene Hemisphäre beeinflussen. Neuere Studien fanden jedoch heraus, dass explosive extratropische Eruptionen im Verhältnis zu ihrer geschätzten Schwefelfreisetzung eine viel stärkere Abkühlung auf der jeweiligen Erdhalbkugel erzeugen als tropische Eruptionen (z.B. TOOHEY et al. 2019). Ein entscheidender Faktor ist dabei die Eintragshöhe der vulkanischen Emissionen: In den untersten Schichten der außertropischen Stratosphäre sind die Aerosole sehr kurzlebig. In vergleichbaren Höhen mit denen bei den großen tropischen Eruptionen entspricht die Lebensdauer der Vulkanaerosole etwa der bei großen tropischen Eruptionen, so dass die Störung gleich lang anhält. Die Ausbreitung der Eruptionswolke ist ebenfalls von der Höhe der Eruption, dem Ort der innertropischen Konvergenz (ITCZ) sowie der Phase der Quasi Biennial Oszillation (QBO) abhängig. Die QBO hat jedoch nicht nur einen Einfluss auf die räumliche Ausbreitung der Vulkanwolke, sondern wird auch ihrerseits beeinflusst. In den letzten Jahren haben jedoch mehrere Modellstudien den Einfluss von tropischen Vulkaneruptionen auf die QBO untersucht und festgestellt, dass es durch die zusätzliche Heizung der tropischen Atmosphäre zu einer Störung kommt, die abhängig von der anfänglichen QBO Phase ist, und dass dieser Effekt besonders bei der QBO Ostphase stark ausgeprägt ist (z.B. BRENNNA et al. 2021; DALLASANTA et al. 2021).

Einfluss auf die Atmosphäre und den hydrologischen Kreislauf

Große tropische Vulkaneruptionen beeinflussen auch erheblich die atmosphärische Dynamik im NH Winter, sie verändern die planetare Wellenaktivität und führen zu einer Verstärkung des stratosphärischen polaren Wirbels (z.B. GRAF et al. 2007). Eines der prominentesten Beispiele der dynamischen Änderungen nach großen tropischen Vulkaneruptionen ist dabei die Erwärmung des Nordostens Eurasiens, die oft mit einer Verstärkung des arktischen Polarwirbels in Verbindung gebracht wird. Aufgrund der großen natürlichen Variabilität im Winter der nördlichen Hemisphäre ist dieser Mechanismus jedoch umstritten. Während die Autoren einiger Studien argumentieren, dass die Auswirkungen von Pinatubo-ähnlichen Eruptionen auf den Polarwirbel in der Größenordnung von einigen Metern pro Sekunde zu gering wären, um ein klares Erwärmungssignal für den Nordpolarwinter zu verursachen,

zeigen andere Studien, dass die tropischen Meeresoberflächentemperaturen sowie die Stärke der vulkanischen Eruption eine entscheidende Rolle spielen, um eine signifikante Erwärmung im NH Winter zu erhalten (siehe MARSHALL et al. 2022 und Verweise darin)

Die Auswirkung vulkanischer Aerosole auf Zirruswolken in der oberen Troposphäre ist immer noch nicht eindeutig geklärt (SPORRE et al. 2022 und Verweise darin). Mehrere Beobachtungsstudien und Modellsimulationen weisen auf einen Einfluss von Vulkanausbrüchen auf die Zirruswolkenbildung hin. Die Studien deuten darauf hin, dass tropische Vulkanausbrüche größere und viel besser lösliche Aerosole in die obere Troposphäre einbringen, was zu Zirruswolkenbildung bei niedrigeren Wasserdampf-Übersättigungen und zu erhöhten Eiskristallanzahlkonzentrationen führt. Andere Studien ergeben dagegen, dass das vulkanische Aerosol keinen signifikanten systematischen Einfluss auf die Zirruswolkenbedeckung hat bzw. in der nördlichen Hemisphäre einen geringeren Eiswassergehalt, eine geringere Eiskristallanzahlkonzentration und einen geringeren Wolkenanteil aufweist, wenn die Aerosolbelastung in der untersten Stratosphäre im Frühjahr durch Vulkanismus erhöht ist. Neben den Zirren können vulkanische Eruptionen auch Wasserwolken beeinflussen. Troposphärische Vulkanemissionen können die Eigenschaften von Wolken in niedriger Höhe verändern. Nach dem Ausbruch des Bárðarbunga-Veiðivötnfissure in Island 2014-2015 wurde beispielsweise gezeigt, dass Eruptionen, die Gase hauptsächlich in die Troposphäre emittieren, das Reflexionsvermögen von Wolken durch eine Aerosol-Wechselwirkung, den sogenannten indirekten Aerosol-Effekt, erhöhen können und damit einen zusätzlichen Strahlungsantrieb auf das Klima haben (z.B. MALAVELLE et al. 2017; SCHMIDT et al. 2012).

Große Vulkaneruptionen haben auch Auswirkungen auf die tropische Klimavariabilität, insbesondere den Monsun. Der vulkanisch bedingte Abkühlungseffekt der Erdoberfläche ist nicht einheitlich. Da Kontinente stärker abkühlen als der Ozean, kann sich der Sommermonsun verändern und sich damit die Regenfälle über Asien und Afrika verringern. Der Einfluss auf das Monsunsystem ist dabei besonders groß für Vulkaneruptionen aus den NH Extratropen, aber auch größere tropische Eruptionen können das Monsunsystem erheblich beeinflussen (D'AGOSTINO & TIMMRECK 2022). Im Fall einer extrem großen Eruption mit Schwefelmengen, die 2 Größenordnungen höher sind als die beim Ausbruch des Pinatubo, ergeben Klimasimulationen, dass der asiatische und afrikanische Sommermonsun für mehr als 2 Jahre ganz ausbleibt (z.B. TIMMRECK et al. 2010). Niederschlagsanomalien in niedrigen Breitengraden werden stark von

Veränderungen der troposphärischen Zirkulation und den damit verbundenen Verschiebungen in der Position der ITCZ beeinflusst. Eine hemisphärisch asymmetrische Vulkanaerosolwolke verändert den hemisphärischen Temperaturkontrast und führt zu einer Verschiebung der Position der ITCZ und einer veränderten Niederschlagsverteilung. Zum Beispiel wurde die inter-hemisphärische asymmetrische Niederschlagsreaktion auf vulkanische Einflüsse im 20. Jahrhundert als eine der möglichen Ursachen für die Sahel-Dürre und des schwachen westafrikanischen Monsuns in den 1970er bis 1990er Jahren verantwortlich gemacht (HAYWOOD et al. 2013). Daten von Mineralablagerungen aus mittelamerikanischen Höhlen aus den letzten 450 Jahren (RIDLEY et al. 2015) zeigen, dass Vulkanausbrüche in der nördlichen Hemisphäre zu einer Verschiebung der ITCZ nach Süden führen, während Vulkanausbrüche in der südlichen Hemisphäre, wie der Tambora-Ausbruch von 1815, zu einer Verschiebung nach Norden führen. Die ITCZ-Verschiebung und die damit verbundenen Anomalien der Oberflächentemperatur führen auch zu Veränderungen der Intensität von tropischen Zyklonen. So konnte zum Beispiel in den Jahren nach den Ausbrüchen des El Chichón 1982 und des Mt. Pinatubo 1991 anhand einer Kombination aus Beobachtungen und Modellergebnissen ein Rückgang in der atlantischen Hurrikanaktivität festgestellt werden (EVAN 2012). Analog zu zonal gemittelten Niederschlagsänderungen sind die Änderungen in der tropischen Zyklonenaktivität für interhemisphärische asymmetrische Eruptionen stärker ausgeprägt als für symmetrische (z.B. YANG et al. 2019).

Einfluss auf Ozeandynamik und -zirkulation

Vulkaneruptionen beeinflussen die Klimavariabilitätsmoden (siehe SWINGEDOUW et al. 2017 für eine Übersicht), einschließlich der Nordatlantischen Oszillation und der El Niño Southern Oscillation (ENSO). Beobachtungen und Modellierungen legen nahe, dass El Niño-Ereignisse im Jahr nach einer tropischen Eruption wahrscheinlicher sind. Es gibt nur wenige Beobachtungen und paläoklimatische Belege für die Auswirkung von außertropischem Vulkanismus auf ENSO; Modelle deuten jedoch darauf hin, dass ein außertropischer Vulkanausbruch auf der nördlichen (südlichen) Hemisphäre zu einer El-Niño-ähnlichen (La-Niña-ähnlichen) Reaktion führt. Trotz der Konsistenz der oben dargestellten Ergebnisse gibt es immer noch viele feine Unterschiede zwischen den simulierten Reaktionen auf tropische und außertropische Vulkanausbrüche (siehe MCGREGOR et al. 2020; DOGAR et al. 2022 und Verweise darin).

Im Gegensatz zur Atmosphäre reagiert der Ozean auf den vulkanischen Antrieb auf längeren Zeitskalen, die weit über die der atmosphärischen Störung hinausgehen. In Modellstudien ist eine Verringerung des Wärmeinhaltes des Ozeans zu beobachten sowie eine Zunahme des arktischen Meereises. Insbesondere der Nordatlantik reagiert sehr empfindlich auf vulkanische Einflüsse, die Änderungen sind dabei von den klimatologischen Bedingungen zum Zeitpunkt des Ausbruchs abhängig. Klimamodellstudien zeigen, dass große Vulkanausbrüche zu einer erheblichen Verstärkung der atlantischen meridionalen Umwälzzirkulation (AMOC) und regionaler Erwärmung führen können (siehe TIMMRECK 2018; SWINGEDOUW et al. 2017; MARSHALL et al. 2022 und Verweise darin).

Man geht davon aus, dass eng beieinander liegende Vulkanausbrüche über Rückkopplungen mit dem Ozean und dem Meereis zu einer anhaltenden Abkühlung führen. In den letzten 2000 Jahren gab es mehrere Cluster von Vulkanausbrüchen und vulkanische Doppelereignisse, die in Eisbohrkernen aufgezeichnet sind, die mit Kaltzeiten in den Baumringaufzeichnungen der nördlichen Hemisphäre übereinstimmen (z.B. HELAMA et al. 2021). In der nördlichen Hemisphäre war die Mitte des 6. Jahrhunderts eine der kältesten Perioden der letzten 2000 Jahre, wie sowohl Temperaturrekonstruktionen als auch Erdsystemmodellsimulationen zeigen. Diese Kälteperiode wurde durch Vulkanausbrüche in den Jahren 536 und 540 n. Chr. ausgelöst. Historische Quellen, archäologische Funde und Baumringdaten deuten darauf hin, dass das Ausmaß und die Schwere dieser vulkanisch bedingten Abkühlung räumlich heterogen waren und dass die Auswirkungen auf die Gesellschaft an einigen Orten zu Anpassung und Widerstandsfähigkeit führten, während an anderen Orten eine soziale Krise zu beobachten war (VAN DIJK et al. 2022).

Einfluss auf die Vegetation und den Kohlenstoffkreislauf

In See- und Meeressedimenten wurden deutliche dynamische Veränderungen der Vegetation nach sehr großen Vulkanausbrüchen festgestellt. In globalen Klimamodell-Simulationen wurde ein großer Einfluss auf die Vegetationsbedeckung bisher nur für sehr große Vulkaneruptionen (Supereruptionen) festgestellt. Die Vegetationsverteilung verändert sich in den Simulationen infolge der Verringerung der Sonneneinstrahlung und der anschließenden Abkühlung durch die große Aerosolwolke dramatisch. So verschwinden zum Beispiel tropische Laubbäume fast völlig, und der Anteil der Laubbäume in den mittleren Breitengraden ist erheblich reduziert. Nach großen Eruptionen nimmt die

diffuse Strahlung zu, weil die direkt von der Sonne kommende Strahlung in alle Richtungen gestreut wird. Änderungen in dem diffusen Anteil der Sonnenstrahlung verändern die Verteilung des Sonnenlichts auf den Blättern der Bäume, was möglicherweise zu einer Erhöhung der photosynthetischen Aktivität führen kann. Da jedoch trotz dieser Zunahme der diffusen Strahlung die Gesamtstrahlung, die die Oberfläche erreicht, abnimmt, ist der Effekt auf die Vegetation eher gering. Große Vulkanausbrüche können den globalen Kohlenstoffkreislauf und die biogeochemischen Prozesse beeinflussen, da beide empfindlich auf Sonneneinstrahlung, Temperatur, Feuchtigkeit und Veränderungen der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation reagieren. Die vulkanischen Auswirkungen auf den globalen Kohlenstoffkreislauf wurden in einer Reihe von Modellstudien untersucht, die alle darauf hindeuten, dass die Landkomponente die Hauptsache für atmosphärische CO₂-Änderungen ist, aber sie unterscheiden sich in den vorgeschlagenen Mechanismen (Photosynthese gegenüber Respiration), durch die die Landkomponente eine Abnahme des atmosphärischen CO₂ bewirkt, und im relativen Anteil der Tropen gegenüber den Extratropen. Das Ausmaß der atmosphärischen CO₂-Anomalie wird dabei in erster Linie durch die Kohlenstoffspeicherung an Land bestimmt, während ihre Dauer durch den marinen Kohlenstoffzyklus festgelegt wird (siehe TIMMRECK 2018 und Verweise darin).

Zukünftige Vulkaneruptionen

Große Vulkanausbrüche sind selten und liefern daher nur unzureichende statistische Anhaltspunkte. Dies beeinträchtigt die Vergleichbarkeit der Modellergebnisse und die Vorhersagbarkeit der Klimaauswirkungen künftiger Eruptionen erheblich. Von den derzeitigen Erdsystemmodellen kann erwartet werden, dass sie die Änderung in der globalen Durchschnittstemperatur auf Vulkanausbrüche zuverlässig vorhersagen, doch die Vorhersagefähigkeit für die regionale Ebene und für andere Größen wie Niederschlag bleibt begrenzt. Um unsere Gesellschaft besser auf den nächsten großen Vulkanausbruch vorzubereiten, sind koordinierte nationale und internationale Anstrengungen erforderlich, an denen Wissenschaftler aus verschiedenen Bereichen und mit unterschiedlichem Fachwissen beteiligt sind. In den letzten Jahren haben sich daher sowohl nationale als auch internationale Initiativen gebildet, die einerseits die verschiedenen Aerosol-Klimamodelle miteinander vergleichen und die andererseits versuchen, die wissenschaftlichen Arbeiten nach einer solchen Eruption zu koordinieren. Dies soll gewährleisten, dass möglichst viele Beobachtungen so schnell wie möglich nach einem

Vulkanausbruch gesammelt werden. Informationen über die Größe, Höhe und Zusammensetzung der Vulkanwolke können in Aerosolmodellen verwendet werden, um die zukünftige Entwicklung der Aerosolwolke und ihrer Strahlungseigenschaften zu berechnen. Diese optischen Strahlungsparameter können dann in saisonalen und dekadischen Vorhersagemodellen verwendet werden, um mögliche saisonale bis jährliche globale und evtl. regionale Klimaänderungen zeitnah nach dem Ausbruch vorherzusagen. Die nächste zukünftige große Vulkaneruption wird aller Voraussicht nach weitere Erkenntnisse über den Klimaeinfluss von großen Vulkaneruptionen liefern, insbesondere durch extensive Beobachtungen der Wechselwirkungen zwischen schwefelhaltigen Gasen, Asche, Wasser und Halogenen sowie der Aerosolgrößenverteilung. Ein solches Ereignis kann darüber hinaus auch als neuer Testfall für die modernsten Aerosol-Klimamodelle verwendet werden. Da diese Modelle auch für Geoengineering-Studien mit Schwefelaerosol eingesetzt werden, siehe Kap. 5.4, wird dadurch auch die Qualität dieser Studien verbessert.

Literatur

- BRÖNNIMANN, S. & D. KRÄMER (2016): Tambora und das «Jahr ohne Sommer» 1816. Klima, Mensch und Gesellschaft. Geographica Bernensia G90, 48 S., doi:10.4480/GB2016.G90.02.
- BRENNHA, H., S. KUTTEROLF, M. J. MILLS, U. NIEMEIER et al. (2021): Decadal Disruption of the QBO by Tropical Volcanic Supereruptions. *Geophys. Res. Lett.*, 48(5), <https://doi.org/10.1029/2020GL089687>.
- COLE-DAI, J. (2010): Volcanoes and climate. *WIREs Clim Change*, 1:824-839, doi: 10.1002/wcc.76.
- D'AGOSTINO, R. & C. TIMMRECK (2022): Sensitivity of regional monsoons to idealised equatorial volcanic eruption of different sulfur emission strengths. *Environmental Research Letters*, 17: 054001. doi:10.1088/1748-9326/ac62af.
- DALLASANTA, K., C. ORBE, D. RIND, L. NAZARENKO & J. JONAS (2021): Response of the Quasi-Biennial Oscillation to historical volcanic eruptions. *Geophys. Res. Lett.* 48(20), <https://doi.org/10.1029/2021GL095412>.
- DOGAR, M. M., L. HERMANSON, A. A. SCAIFE, D. VISIONI et al. (2022): A Review of El Niño Southern Oscillation Linkage to Strong Volcanic Eruptions and Post-Volcanic Winter Warming. *Earth Systems and Environment*, 1-28.
- EVAN, A. T. (2012): Atlantic hurricane activity following two major volcanic eruptions. *Journal of Geophysical Research*, 117, D06101. <https://doi.org/10.1029/2011JD016716>.
- GRAF, H-F, Q. LI & MA GIORGETTA (2007): Volcanic effects on climate: revisiting the mechanisms. *Atmos Chem Phys* 7:4503-4511.
- HAYWOOD, J. M., A. JONES, N. BELLOUIN, & D. STEPHENSON, (2013): Asymmetric forcing from stratospheric aerosols impacts Sahelian rainfall. *Nature Climate Change*, 3(7), 660-665.
- HELAMA, S., M. STOFFEL, R. J. HALL, P. D. JONES et al. (2021): Recurrent transitions to Little Ice Age-like climatic regimes over the Holocene. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-021-05669-0, 56, 11-12, (3817-3833).
- KHAYKIN, S., A. PODGLAJEN, F. PLOEGER, J. GROOSS et al. (2022): Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 316.
- LAVIGNÉ, F., J. P. DEGEAI, S. KOMOROWSKI, S. GUILLET et al. (2013): Source of the great AD 1257 mystery eruption unveiled, Samalao volcano, Rinjani Volcanic Complex, Indonesia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(42), 16742-16747.
- MALAVELLE, F. F., J. M. HAYWOOD, A. JONES, A. GETTELMAN et al. (2017): Strong constraints on aerosol-cloud interactions from volcanic eruptions. *Nature*, 546(7659), 485-49.
- MARSHALL, L. E. C. MATERS, A. SCHMIDT, C. TIMMRECK et al. (2022): Volcanic effects on climate: recent advances and future avenues. *Bull Volcanol* 84, 54.
- MCGREGOR, S., M. KHODRI, N. MAHER, M. OHBA et al. (2020): The effect of strong volcanic eruptions on ENSO. *El Niño Southern Oscillation in a changing climate*, 267-287.
- RAIBLE, C. C., S. BRÖNNIMANN, R. AUCHMANN, P. BROHAN et al. (2016): Tambora 1815 as a test case for high impact volcanic eruptions: Earth system effects, *WIREs Clim Change*, 7, 569-589, doi:10.1002/wcc.407.
- RIDLEY, H., Y. ASMEROM, J. U. L. BALDINI, S. F. M. BREITENBACH et al. (2015): Aerosol forcing of the position of the inter-tropical convergence zone since AD 1550. *Nat Geosci*, 8: 195-200, doi: 10.1038/ngeo235.
- ROBOCK, A. (2000): Volcanic Eruptions and Climate, *Rev. Geophys.*, 38 (2): 191-219.
- ROBOCK, A., D. G. MACMARTIN, R. DUREN, & M. W. CHRISTENSEN (2013): Studying geoengineering with natural and anthropogenic analogs. *Climatic Change*, 121(3), 445-458.
- SCHMIDT, A., K. S. CARSLAW, G. W. MANN, A. RAP et al. (2012): Importance of tropospheric volcanic aerosol for indirect radiative forcing of climate. *Atmos. Chem. Phys.* 12 (16), 7321-7339. <https://doi.org/10.5194/acp-12-7321-2012>.
- SIGL, M., M. TOOHEY, J. R. MCCONNELL, J. COLE-DAI & M. SEVERI (2022): Volcanic stratospheric sulfur injections and aerosol optical depth during the Holocene (past 11 500 years) from a bipolar ice-core array, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 3167-3196, <https://doi.org/10.5194/essd-14-3167-2022>.
- SCHMIDT, A. & S. CARN (2022): Volcanic emissions, aerosol processes, and climatic effects. In *Aerosols and Climate* (pp. 707-746). Elsevier.
- SPORRE, M. K., J. FRIBERG, C. SVENHAG, O. SOURDEVAL, & T. STORELMO (2022): Springtime stratospheric volcanic aerosol impact on midlatitude cirrus clouds. *Geophysical Research Letters*, 49(2), e2021GL096171.
- SWINGEDOUW, D., J. MIGNOT, P. ORTEGA, M. KHODRI et al. (2017): Impact of explosive volcanic eruptions on the main climate variability modes. *Global and Planetary Change*, 150, 24-45.
- TIMMRECK, C., H. F. GRAF, S. J. LORENZ, U. NIEMEIER et al. (2010): Aerosol size confines climate response to volcanic super-eruptions. *Geophys Res Lett.* 37: L24705, doi: 10.1029/2010GL045464.
- TIMMRECK, C. (2018): Climatic effects of large volcanic eruptions. Habilitation Thesis, Hamburg: Universität Hamburg, doi:10.17617/2.2566000, überarbeitete Version von TIMMRECK, C. (2012): Modeling the climatic effects of large volcanic eruptions, *WIREs Clim. Change*, 3, 545-564, doi:10.1002/wcc.192.
- TOOHEY, M., K. KRÜGER, H. SCHMIDT, C. TIMMRECK et al. (2019): Extratropical volcanic eruptions produce disproportionately strong climate forcing. *Nature Geoscience*, 12, 100-107. doi:10.1038/s41561-018-0286-2.
- VAN DIJK, E., J. JUNGCLAUS, S. LORENZ, C. TIMMRECK & K. KRÜGER (2022): Was there a volcanic-induced long-lasting cooling over the Northern Hemisphere in the mid-6th-7th century?, *Clim. Past*, 18, 1601-1623, <https://doi.org/10.5194/cp-18-1601-2022>, 2022.
- YANG, W., G. VECCHI, S. FUEGLISTALER, L. W. HOROWITZ et al. (2019): Climate impacts from large volcanic eruption - a high-resolution climate model: The importance of forcing structure. *Geophysical Research Letters*, 46, 7690-7699. <https://doi.org/10.1029/2019GL082367>.

Kontakt:

Dr. Claudia Timmreck
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
claudia.timmreck@mpimet.mpg.de

TIMMRECK, C. (2023): *Abkühlung durch starke vulkanische Eruptionen und ihre Nebeneffekte*. In: LOZÁN J. L., H. GRAßL, S.-W. BRECKLE, D. KASANG & M. QUANTE (Hrsg.), *Warnsignal Klima*. S. 237-242. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.climate.engineering.36