



Doctoral Thesis

Cloud and Surface Responses to Stratospheric Aerosols following Major Volcanic Eruptions

Author(s):

Meyer, Angela

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010564608> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 22688

Cloud and Surface Responses to Stratospheric Aerosols following Major Volcanic Eruptions

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH
for the degree of Doctor of Sciences (Dr. Sc. ETH Zurich)

presented by
ANGELA MEYER
MASt Mathematics, University of Cambridge
born on 27 September 1982
citizen of Germany

Prof. Dr. Thomas Peter, examiner
Prof. Dr. Ulrike Lohmann and Dr. Claudia Stubenrauch, co-examiners

2015

Abstract

Major volcanic eruptions may inject large amounts of gases and aerosol particles into the lower stratosphere. Within weeks after an eruption, layers of aqueous sulfuric acid droplets will form from the sulfur dioxide precursor gas contained in the plume. The aerosol reduces the transmission of solar radiation towards the troposphere and can thereby significantly affect air temperature, evaporation and precipitation at the Earth's surface. At the same time, the influx of stratospheric aerosol droplets, which are typically larger than the upper tropospheric aerosol particles, into the comparatively moist upper troposphere may trigger the homogeneous freezing of the droplets and subsequent ice particle growth. It has been hypothesized, therefore, that the stratospheric sulfate aerosol may affect the abundance and the optical properties of ice clouds when it reaches the upper troposphere.

With respect to these two volcanic influences, the objectives of this thesis were (1) to assess how well state-of-the-art general circulation models (GCMs) capture surface climate anomalies observed after strong volcanic eruptions, and (2) to analyze backscatter measurements taken by the satellite-borne CALIOP lidar — one of the most suitable instruments currently available for global aerosol-cloud studies — for evidence of a modification of the optical properties and abundance of ice clouds by sulfate aerosol droplets of stratospheric origin.

In Chapter 2 of this thesis, I compare 17 GCMs with each other and with observational data following two major volcanic eruptions. After statistically removing the El Niño/ La Niña-Southern Oscillation (ENSO) surface climate impact, I found that the 17 investigated models successfully simulate the observed 4-months delay in the surface air temperature responses to the ENSO phase, but simulate somewhat too fast precipitation responses during the El Niño onset stage. The observed correlation between surface air temperature and ENSO phase (correlation coefficient: 0.75) is generally captured well by the models (simulated correlation coefficients of 0.71, ensemble means of 0.61 – 0.83). With regard to the precipitation over tropical land regions, the mean correlation coef-

ficients with the ENSO phase are -0.59 (observations) and -0.53 (models). However, individual ensemble members have correlation coefficients as low as -0.26 .

I find that the observed ENSO-removed tropical land temperature and precipitation decreased by about 0.35 K and 0.25 mm/day after the 1991 Pinatubo eruption, whereas no significant decrease in either variable was observed after the El Chichón eruption in 1982. The investigated models generally capture this behavior, despite a tendency to overestimate the precipitation response to El Chichón. There is substantial scatter both across the models and across the ensemble members of individual models, which implies that natural variability may still play a prominent role, despite the strong volcanic forcing.

In Chapter 3 of this thesis, I analyze eight years of CALIOP lidar backscatter measurements, taken from ice clouds between 82° N and 82° S, searching for signs of a sulfate-aerosol effect on the backscatter distributions, occurrence frequencies and altitudes of cirrus clouds and the glaciated parts of mixed-phase clouds. To this end I have focussed on the eruption of the Nabro volcano in Northeast Africa in June 2011. This event released $1\text{--}1.5$ Mt of sulfur dioxide into the lower stratosphere, making it the largest volcanic eruption since Pinatubo in 1991 in that respect. I found that the stratospheric aerosol that formed after the Nabro eruption did not modify the optical properties, abundance or residence altitudes of ice clouds in a statistically significant manner on a global scale, not even in the uppermost troposphere. Accordingly, the Nabro eruption induced no detectable volcanic aerosol-ice cloud radiative forcing effect in the four seasons following it.

Simulations of the Nabro sulfate aerosol plume performed with the global chemistry-climate model SOCOL-AER indicated number density increases of the largest aerosol droplets by more than a factor of 3 at the lower edge of the plume near the tropopause in the months after the eruption. As the largest droplets of any sulfate aerosol population are the ones expected to freeze first, our results suggest that the optical properties and the abundance of ice clouds are influenced at most weakly by volcanic eruptions. Our findings are consistent with previous studies which suggested that temperatures and cooling rates are the main determinants of the ice particle number density in ice clouds, whereas number densities and sizes of sulfate aerosol droplets play only a secondary role.

Finally, in Chapter 4 I used the CALIOP dataset to validate the occurrence frequencies of ice clouds in the aerosol-cloud GCM ECHAM6-HAM2, which is presently one of the most advanced aerosol-cloud GCMs. I found that there is generally a good match between the simulated and the observed ice-cloud occurrences. However, the simula-

tions show that ice-cloud abundance is substantially underestimated in the tropics and overestimated in regions south and west of the Taklamakan desert as well as over parts of Antarctica. Moreover, the altitudes of the highest ice-cloud tops are overestimated by 1–2 km at most latitudes, which may bias the ice-cloud radiative forcing by several W/m^2 .

Zusammenfassung

Bei starken Vulkanausbrüchen können grosse Mengen von Gasen und Aerosolpartikeln in die untere Stratosphäre gelangen. Innerhalb von wenigen Wochen nach einem starken Vulkanausbruch bilden sich Schichten aus Sulfataerosol-Tröpfchen aus bei dem Ausbruch freigesetztem Schwefeldioxid. Das Aerosol verringert die Transmission von Sonnenstrahlung in Richtung der Troposphäre und kann dadurch Lufttemperatur, Verdunstung und Niederschläge am Boden signifikant beeinflussen. Gleichzeitig kann der Eintritt von stratosphärischen Aerosoltröpfchen, welche typischerweise grösser sind als die Aerosolpartikel der oberen Troposphäre, in die vergleichsweise feuchte obere Troposphäre das homogene Gefrieren der Tröpfchen und anschliessendes Eisteilchenwachstum auslösen. Es ist deshalb vermutet worden, dass das stratosphärische Sulfataerosol die Häufigkeit und die optischen Eigenschaften von Eiswolken beeinflussen kann, wenn es in die obere Troposphäre gelangt.

Die vorliegende Arbeit hatte in Bezug auf diese zwei vulkanischen Einflüsse das Ziel, (1) zu bewerten, wie gut aktuelle globale Zirkulationsmodelle nach starken Vulkanausbrüchen an der Erdoberfläche beobachtete Klimaanomalien simulieren, und (2) von dem satellitenbasierten Lidar CALIOP gemachte Rückstreuungmessungen auf Anzeichen für eine Modifikation der optischen Eigenschaften und der Häufigkeit von Eiswolken durch stratosphärische Sulfataerosoltröpfchen hin zu untersuchen. CALIOP ist derzeit eines der geeignetsten Instrumente für globale Aerosol-Wolken-Studien.

In Kapitel 2 dieser Arbeit vergleiche ich 17 globale Zirkulationsmodelle miteinander und mit Beobachtungsdaten nach zwei starken Vulkanausbrüchen. Dabei habe ich nach Entfernen des klimatischen Einflusses der El Niño-Southern Oscillation (ENSO) herausgearbeitet, dass die 17 untersuchten Modelle die beobachteten viermonatigen Verzögerungen der 2-Meter-Lufttemperatur, mit der diese auf die ENSO-Phase reagiert, erfolgreich wiedergeben, aber andererseits eine etwas zu schnelle Reaktion des Niederschlags in der Anfangsphase von El Niños simulieren. Die Modelle simulieren die beobachtete Korrelation zwischen der 2-Meter-Lufttemperatur und der ENSO-Phase (Korrelationskoeffizient von 0.75) insgesamt erfolgreich (simulierte Korrelationskoeffizienten

von 0.71, Ensemble-Mittelwerte: 0.61 – 0.83). Die mittleren Korrelationskoeffizienten zwischen dem Niederschlag und der ENSO-Phase sind -0.59 (Beobachtungen) und -0.53 (Modelle). Einige Ensemble-Elemente weisen jedoch sehr geringe Korrelationen auf (Korrelationskoeffizienten bis -0.26).

Die beobachteten mittleren Temperaturen und Niederschläge über tropischen Landregionen nahmen nach dem Pinatubo-Ausbruch von 1991 um 0.35 K und 0.25 mm/Tag ab, jedoch traten nach dem Ausbruch des El Chichón 1982 keine signifikanten Abnahmen von Temperatur oder Niederschlag auf. Die untersuchten Modelle geben diese Beobachtungen trotz einer Tendenz zur Überschätzung der Niederschlagsreaktion auf den Ausbruch des El Chichón im Allgemeinen erfolgreich wieder. Die Streuung ist über die Modelle und Ensemble-Elemente der einzelnen Modelle hinweg gross. Dies legt nahe, dass natürliche Variabilität trotz des starken vulkanischen Forcings eine wichtige Rolle spielt.

In Kapitel 3 untersuche ich einen acht Jahre umfassenden Datensatz von CALIOP-Lidar-Messungen der Rückstreuung von Eiswolken zwischen 82° N and 82° S auf einen Einfluss des Sulfataerosols auf die Rückstreuerverteilungen, Häufigkeiten und Höhen von Zirruswolken und vereisten Teilen von Mischphasenwolken hin. Dazu habe ich mich auf den Ausbruch des Nabro-Vulkans im Nordosten Afrikas im Juni 2011 konzentriert. Dieses Ereignis hat zwischen 1 und 1.5 Mt Schwefeldioxid in die untere Stratosphäre eingebracht und ist damit der in dieser Hinsicht grösste Vulkanausbruch seit dem Pinatubo 1991. Unsere Ergebnisse zeigen, dass das stratosphärische Aerosol, das sich nach dem Nabro-Ausbruch gebildet hat, die optischen Eigenschaften, die Häufigkeit und die Höhen von Eiswolken global nicht signifikant beeinflusst hat. Dies gilt auch für die obersten Troposphärenschichten. Der Nabro-Ausbruch hatte keinen detektierbaren Aerosol-Wolken-Strahlungseffekt in den vier auf den Ausbruch folgenden Jahreszeiten.

Mit dem Globalen Chemie-Klimamodell SOCOL-AER durchgeführte Simulationen der stratosphärischen Sulfataerosol-Population nach dem Nabro-Ausbruch zeigen einen Anstieg der Anzahldichte der grössten Tröpfchen um mehr als einen Faktor 3 in der Tropopausenregion in den Monaten nach dem Ausbruch. Da die grössten Tröpfchen eines Sulfataerosols in der Regel als erstes gefrieren, legen unsere Ergebnisse nahe, dass die optischen Eigenschaften und die Häufigkeit von Eiswolken höchstens schwach durch Vulkanausbrüche beeinflusst werden. Unsere Ergebnisse sind konsistent mit früheren Studien, die zu dem Ergebnis kamen, dass Temperaturen und Kühlraten die wesentlichen Bestimmenden der Eisteilchenanzahldichte in Eiswolken sind, während Anzahldichten und Grössen von Sulfataerosoltröpfchen nur eine zweitrangige Rolle spielen.

In Kapitel 4 habe ich den CALIOP-Datensatz zur Validierung der Häufigkeit von Eiswolken in dem Aerosol-Wolken-GCM ECHAM6-HAM2 verwendet, das eines der derzeit hochentwickeltesten Aerosol-Wolken-GCMs ist. Die Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Eiswolken-Häufigkeiten ist grundsätzlich hoch. Verglichen mit den Beobachtungen ist die simulierte Häufigkeit von Zirrus- und vereisten Mischphasenwolken in den Tropen jedoch wesentlich zu niedrig und in Regionen südlich und westlich der Taklamakan-Wüste sowie über Teilen der Antarktis zu hoch. Die höchsten Eiswolken-Oberkanten werden auf fast allen geographischen Breiten um 1–2 km überschätzt, was einem systematischen Fehler des simulierten Strahlungsantriebs der Eiswolken von mehreren W/m^2 entspricht.