

Externe und interne Variabilität in der multi-dekadischen Klimaentwicklung

Während der letzten 150 Jahre war der Anstieg der vom Menschen verursachten Treibhausgase der Hauptantrieb für den Klimawandel. Trotzdem wird der menschengemachte Erwärmungstrend über Jahre bis zu Jahrzehnten von der natürlichen Variabilität überlagert und mitbestimmt. Die natürliche Variabilität umfasst die interne Variabilität – spontan erzeugt durch Prozesse und Rückkopplungen im Klimasystem selbst – und die extern angetriebene Variabilität – verursacht zum Beispiel durch Änderungen der Sonneneinstrahlung und durch Vulkanausbrüche. Um die natürliche Variabilität zu untersuchen, richtet sich der Blick der Forschung oftmals mehrere Jahrhunderte zurück in die vorindustrielle Vergangenheit, in der der menschliche Einfluss noch gering war. Mit dem Erdsystemmodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) zeigen Dr. Davide Zanchettin und seine Kollegen, welche Rolle starke Vulkanausbrüche für die Klimavariabilität während der vorindustriellen tausend Jahre spielen. Die Wissenschaftler untersuchten, warum die Änderungen im Klimasystem, die durch diese Vulkanausbrüche erzeugt wurden, viel länger andauern, als es die kurzlebige Anwesenheit von vulkanischen Teilchen in der Atmosphäre vermuten lässt. Eine Vielzahl von Simulationen macht deutlich, dass einzelne Realisationen eines Vulkanausbruchs in Abhängigkeit von den Hintergrundbedingungen deutlich voneinander abweichen können. Genaue Kenntnis dieser Bedingungen ist daher notwendig, um die Vorhersage von Klimaereignissen, die durch starke Vulkanausbrüche hervorgerufen wurden, auf Zeitskalen von Jahrzehnten oder länger zu verbessern.

Auswirkungen von starken Vulkanausbrüchen

Während eines großen Vulkanausbruchs in den Tropen, bei dem vulkanische Gase bis in die obere Atmosphäre geschleudert werden, breitet sich bald eine dünne Aerosolwolke in der unteren Stratosphäre aus. Dort bleibt sie für einige Jahre und streut Anteile der eingehenden Sonneneinstrahlung zurück ins All, was zu dem bekanntesten direkten Klimaeffekt durch Vulkanausbrüche führt: zur Abkühlung am Boden. Gleichzeitig beeinflusst die vulkanische Aerosolwolke die Dynamik von Atmosphäre und Ozean und kann so Prozesse in Gang setzen, die für die langzeitliche Entwicklung des Klimasystems verantwortlich sind. Daher können die Auswirkungen der starken Vulkanausbrüche über die Dauer des kurzlebigen Strahlungsantriebs hinaus bestehen.

Klimasimulationen haben die These bestätigt, dass starke Vulkanausbrüche das Auftreten und die Entwicklung dekadischer und sogar noch längerer Klima-anomalien beeinflussen können. Nichtsdestotrotz gibt es noch Wissenslücken darüber, wie stark diese langzeitlichen Änderungen durch Ausbrüche verschiedener Ausprägung sind und wie diese Änderungen von den zugrundeliegenden Klimabedingungen abhängen (z.B. vom mittleren Klimazustand oder von zusätzlichen Antriebsfaktoren).

Im Rahmen des MiKlip-Projekts haben Dr. Davide Zanchettin und seine Kollegen am MPI-M wichtige Beiträge geleistet, diese Wissenslücken zu schließen, indem sie drei Forschungsfragen beantwortet haben:

Durch welche Mechanismen und wie stark beeinflussen starke Vulkanausbrüche in den Tropen die simulierte Variabilität auf einer Zeitskala von Jahrzehnten? (Veröffentlichung 1 und 2, siehe Quellenangabe)

Bestätigen Rekonstruktionen des vergangenen Klimas die Existenz der dekadischen Klimavariabilität, die durch starke Vulkanausbrüche angetrieben wird? (Veröffentlichungen 3, 4, 5)

Beeinflussen Hintergrundbedingungen die dekadischen Klimareaktionen auf starke Vulkanausbrüche? Wo sind die Grenzen der Reproduzierbarkeit von historischen Ereignissen? (Veröffentlichung 6)

In einer Reihe von Veröffentlichungen haben Dr. Davide Zanchettin und seine Mitarbeiter eine Reihe von verschiedenen Klimasimulationen analysiert, die es ihnen erlaubt haben, eine Vielzahl von starken tropischen Vulkanausbrüchen zu bewerten. Sie haben eine typische Klimareaktion im Nordatlantischen/Europäischen Sektor (1, 2) identifiziert und beschreiben einen Mechanismus, der eine über Dekaden reichende Reaktionsschleife zwischen großskaliger atmosphärischer Zirkulation, arktischem Meereis, der Ozeanzirkulation und den dazugehörigen Wärmetransporten im Atlantischen Ozean umfasst. Sie fanden Anzeichen aus der "echten Welt", die zu Mechanismen von mehreren hundert Jahre umfassenden Rekonstruktionen des nordatlantischen und europäischen saisonalen Klimas passen, und nannten das Phänomen "verspätete Wintererwärmung" (3).

Allerdings stellten die Wissenschaftler fest, dass zwar im Mittel Reaktionen wie die verspätete Wintererwärmung auftauchen, einzelne Realisierungen aber aufgrund unterschiedlicher Ausgangsbedingungen erheblich variieren können. Wenn sie den gleichen Vulkanausbruch im gleichen Modellsystem mit nur leicht veränderten Ausgangsbedingungen simulierten, konnte die Klimaentwicklung bereits deutlich unterschiedlich ausfallen.

Um diese Unsicherheit systematisch anzugehen, nutzten sie Sensitivitätsexperimente mit dem gekoppelten Klimamodell des MPI-M ECHAM5/MPIOM, mit dem sie Ensembles¹ von Simulationen mit verschiedener Klimageschichte vor dem Vulkanausbruch berechneten. Außerdem änderten sie die Größe anderer Antriebsfaktoren um die Zeit der Eruption (5). Sie wählten den Ausbruch des Vulkans Tambora im Jahr 1815 als Fallstudie, da dieser Ausbruch der stärkste in der Geschichte ist, über den es verlässliche Aufzeichnungen gibt ("Jahr ohne Sommer"). Er ereignete sich nur sechs Jahre nach einem anderen sehr starken Ausbruch (1809) und geht mit dem Dalton-Minimum in der Sonnenaktivität einher. Die drei Experimentreihen – ein realistisches Ensemble mit allen Antrieben, ein Ensemble nur mit vulkanischem Antrieb und ein Ensemble nur mit dem Tambora (ohne die Effekte des Ausbruchs von 1809) - zeigen nahezu identische Netto-Strahlungsungleichgewichte (Abb. 1 a) für die Tambora-Eruption. Sie unterscheiden sich aber deutlich in der Größe und Kohärenz der dekadischen klimatischen Signale nach dem Tambora-Ausbruch (Abb. 1 b, c).

¹ Ein Ensemble bezeichnet eine Experimentreihe aus mehreren gleichartigen Simulationen, die mit einer sehr kleinen Störung am Anfang gestartet werden, um den chaotischen Charakter der atmosphärischen Variabilität Rechnung zu tragen.

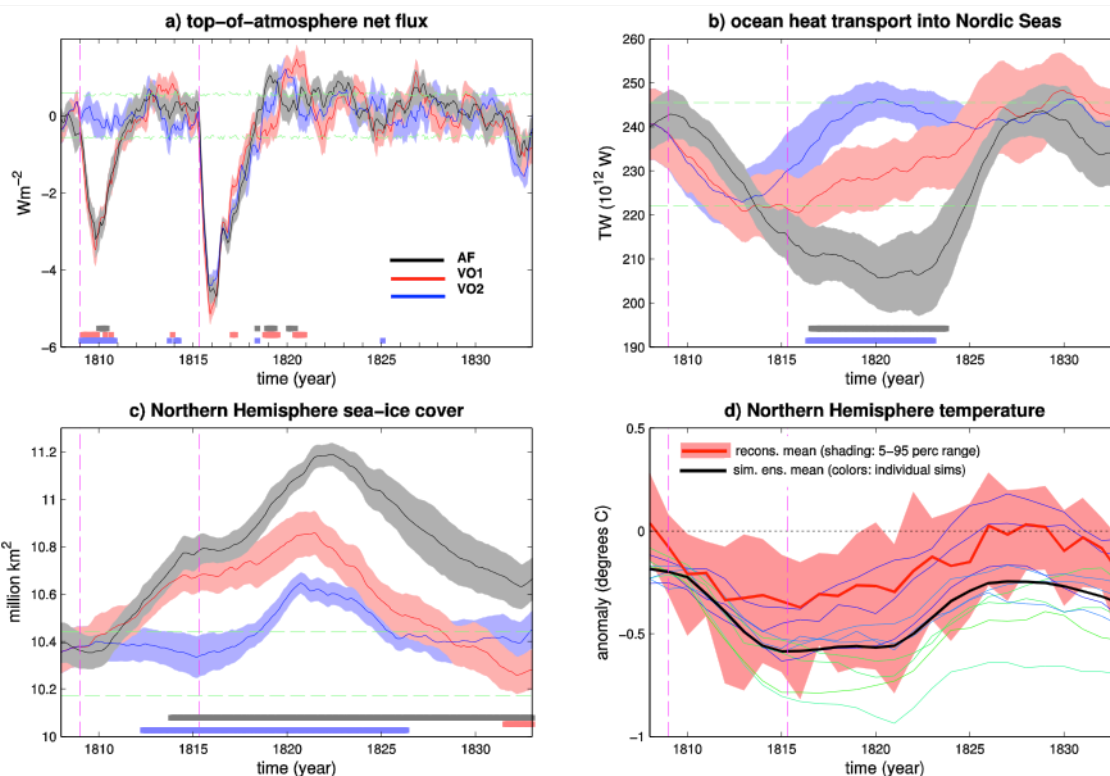


Abb. 1 a-c: Entwicklung von ausgewählten Klimakenngrößen um den Ausbruch des Tambora (1815) in drei Ensemble-Simulationen mit verschiedenen Anfangsbedingungen und Antrieben (schwarz/grau: Alle Antriebe (AF), rot/rosa: nur Vulkanantrieb, blau/hellblau: Alle Antriebe aber ohne den Vulkanausbruch von 1809). Linien bezeichnen das Ensemblemittel, Schattierung die Standardfehlerabschätzung. Grüne gestrichelte Linien: Abschätzung der Variabilität im Kontrolllauf ohne Antriebe. Die unteren Rechtecke zeigen Zeiträume an, in denen ein signifikanter Unterschied zwischen einem Ensemble (die gleichen Farben wie für Zeitserien) und den anderen zwei vorliegt. Abb. a: Simuliertes globales Mittel der Nettostrahlungsanomalien am Oberrand der Atmosphäre (3 Monate Glättung). Abb. b: Ozeanwärmehtransport in das Europäische Nordmeer (61-Monate Glättung). Abb. c: Arktisches Meereisbedeckung (61-Monate Glättung). Abb. d: Rekonstruierte Entwicklung der jährlichen mittleren Oberflächentemperatur der nördlichen Hemisphäre (Land und Ozean) um die Tambora-Eruption 1815 (rote Linie mit Abschätzung der Unsicherheit als rosa Schattierung) und der Simulationen mit allen Antrieben (11 Jahre gleitendes Mittel). Blaue bis grüne Linien sind individuelle Simulationen. Anomalien beziehen sich auf die Periode 1799-1808. In allen Abbildungen zeigen vertikal gestrichelte Linien die Eruption von 1809 und von Tambora an. Jedes Ensemble besteht aus 10 Simulationen mit unterschiedlichen Ausgangsbedingungen.

Die Experimente verdeutlichen, dass der Tambora die erheblichen Anomalien im Nordatlantik und den arktischen Gebieten, die bis zu den nächsten großen Eruptionen Mitte der 1930er Jahre anhielten (Abb. 1 d), nicht allein auslösen konnte. Dies zeigen nur die Experimente unter vollständigen Antriebsbedingungen. Die hier vorherrschenden kälteren Bedingungen - ausgelöst durch die Antriebshistorie, die Eruption von 1809 und das Dalton Minimum führen zu stärkeren positiven Rückkopplungen zwischen dem reduzierten nordwärts gerichteten ozeanischen Wärmetransport und dem angewachsenen arktischen Meereis.

Das bedeutet, dass die Ausgangsbedingungen (und dabei speziell der Zustand des Ozeans) die simulierten dekadischen Auswirkungen auf die Tambora-Eruption wesentlich bestimmen, indem sie die Stärke der Rückkopplungseffekte beeinflussen. Dies zeigt letztlich, dass die genaue Kenntnis der

klimatischen Ausgangsbedingungen und anderer externer Antriebe, die vor und um einen bestimmten Ausbruch herrschten, wesentlich für die genaue Simulation der jahrzehntelangen Klimaauswirkungen durch diese Eruptionen sind. Einfacher formuliert bedeutet dies, dass wegen der Unsicherheit bezüglich der Ausgangsbedingungen von keiner einzelnen Realisierung erwartet werden kann, mit den Rekonstruktionen übereinzustimmen.

Selbst bei starken Störungen ist diese Unsicherheit für Zeiten, in denen es noch keine instrumentellen Aufzeichnungen gab, besonders groß und stellt ein Hindernis dar für die Identifizierung von historischen Klimaänderungen, die auf Vulkanausbrüche zurückgehen. Natürlich haben die Ergebnisse von Dr. Zanchettin und seinen Kollegen auch Konsequenzen für die Vorhersagbarkeit von klimatischen Auswirkungen zukünftiger vulkanischer Ereignisse.

Die Arbeit der Gruppe befasste sich auch mit Regionen, in denen die dekadische Klimaauswirkung von Vulkanen weniger stark ist, wie zum Beispiel den pazifischen/nordamerikanischen Sektor (6). Diese regionalen Unsicherheiten zeigen, dass es noch viel über vulkangetriebene Klimavariabilität zu verstehen gibt, um die Simulationen des vergangenen Klimas zu verbessern. In diesem Zusammenhang erhofft man sich bedeutende Fortschritte durch die internationale Initiative VolMIP (**Model Intercomparison Project on the climate response to Volcanic forcing**), welche von Dr. Davide Zanchettin, Dr. Claudia Timmreck (MPI-M) und Dr. Myriam Khodri (IPSL, Paris) durchgeführt wird. VolMIP erarbeitet ein Protokoll für idealisierte Vulkanstörungsexperimente, die in verschiedene Klimamodelle eingebaut werden sollen. Durch die Betrachtung verschiedener Modelle mit dem gleichen vulkanischen Antrieb und unter gleichen Ausgangsbedingungen, können die verschiedenen Quellen von Unsicherheit in der simulierten Klimareaktion auf vulkanische Ausbrüche getrennt untersucht werden. Dabei werden Unterschiede in den Modelleigenschaften, dem angewandten Antrieb und den Anfangsbedingungen berücksichtigt.

Zusammenfassung

Bei einem identischen, vorgegebenen vulkanischen Antrieb, aber unterschiedlichen Hintergrundbedingungen (Anfangsbedingungen sowie Auftreten und Größenordnung von zusätzlichem Antrieb), können sich einzelne Realisationen innerhalb eines Ensembles von Simulationen deutlich im Ausmaß und der Kohärenz der Auswirkungen auf dekadischer Zeitskala unterscheiden.

Unsicherheiten in den Hintergrundbedingungen erschweren die Beurteilung von simulierten dekadischen Klimareaktionen auf starke vulkanische Ausbrüche in den Tropen. Möglicherweise erklärt dies einige Diskrepanzen zwischen Simulationen und Rekonstruktionen des Klimas der letzten tausend Jahre.

Eine verbesserte Vorhersagbarkeit der dekadischen Klimaentwicklung nach zukünftigen Vulkanereignissen hängt also nicht nur von der Fähigkeit der Modelle ab, die dynamischen Mechanismen genau zu reproduzieren, sondern bedarf auch einer adäquaten Beschreibung der Hintergrundbedingungen.

Mehr Information

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts MiKlip (Link - Mittelfristige Klimaprognose) widmet sich das MPI-M der dekadischen Klimavorhersage.

Im Fokus: <http://www.mpimet.mpg.de/communication/news/research-news-overview/decadal-climate-predictions.html>

Publikationen

IPCC Assessment Report 5, 2013: www.ipcc.ch

1 Zanchettin, D., Timmreck, C., Graf, H.-F., Rubino, A., Lorenz, S., Lohmann, K., Krüger, K., and J.H. Jungclaus, 2012: Bi-decadal variability excited in the coupled ocean-atmosphere system by strong tropical volcanic eruptions. *Clim. Dyn.*, 39, 419-444.

2 Zanchettin, D., O. Bothe, C. Timmreck, J. Bader, A. Beitsch, H.-F. Graf, D. Notz and J. H. Jungclaus (2014) Inter-hemispheric asymmetry in the sea-ice response to volcanic forcing simulated by MPI-ESM (COSMOS-Mill). *Earth Syst. Dynam.*, 5, 223–242, doi:10.5194/esd-5-223-2014

3 Zanchettin D., C. Timmreck, O. Bothe, S.J. Lorenz, G. Hegerl, H.-F. Graf, J. Luterbacher, and J.H. Jungclaus. Delayed winter warming: a robust decadal response to strong tropical volcanic eruptions? (2013a) *Geophys. Res. Lett.* 40, doi:10.1029/2012GL054403

4 Zanchettin, D., Rubino, A., Matei, D., Bothe, O., and J. H. Jungclaus, 2013b: Multidecadal-to-centennial SST variability in the MPI-ESM simulation ensemble for the last millennium. *Clim. Dyn.*, 40, 1301-1318.

5 Zanchettin, D., Bothe, O., Graf, H. F., Lorenz, S. J., Luterbacher, J., Timmreck, C., and J. H. Jungclaus, 2013c: Background conditions influence the decadal climate response to strong volcanic eruptions. *J. Geophys. Res. Atm.*, 118, 4090-4106.

6 Zanchettin, D., Bothe, O., Lehner, F., Ortega, P., Raible, C. C., and Swingedouw, D.: Reconciling reconstructed and simulated features of the winter Pacific/North American pattern in the early 19th century, *Clim. Past*, 11, 939-958, doi:10.5194/cp-11-939-2015, 2015.

Bothe, O., Jungclaus, J. H., Zanchettin, D., and E. Zorita, 2013: Climate of the last millennium: ensemble consistency of simulations and reconstructions. *Clim. Past*, 9, 1089–1110.

Kontakt

Dr. Davide Zanchettin

Jetzt: Universität Venedig

E-Mail: davide.zanchettin@unive.it



Dr. Johann Jungclaus
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 109
E-Mail: johann.jungclaus@mpimet.mpg.de

Dr. Claudia Timmreck
Max-Planck-Institut für Meteoroloie
Tel.: 040 41173 384
E-Mail: claudia.timmreck@mpimet.mpg.de