

### 3.5. Einfluss von Vulkanausbrüchen auf Klimaschwankungen

#### 3.5.1. Einleitung

Explosive Vulkanausbrüche setzen gewaltige Mengen von Gasen und Partikeln frei, die hoch hinauf in die Atmosphäre, bis in die Stratosphäre, gelangen. Ein Beispiel ist in Fig. 47 gezeigt: der Ausbruch des Vulkans Pinatubo auf den Philippinen 1991. Angesichts solcher Bilder liegt es nahe zu fragen, inwiefern Vulkanausbrüche zu Klimaschwankungen beitragen. Das ist denn auch ein altes Forschungsthema. Bereits im 18. Jahrhundert hat Benjamin Franklin auf die atmosphärischen Folgen des Ausbruchs des Vulkans Laki auf Island (1783) aufmerksam gemacht. Der erste grosse, wissenschaftlich untersuchte Vulkanausbruch war Krakatau auf Indonesien, 1883. Eine Erklärung der Mechanismen war allerdings erst hundert Jahre später möglich, im Zeitalter der Satellitendaten. Vor allem der Ausbruch des Pinatubo - der grösste Vulkanausbruch des 20. Jahrhunderts - der sich vor den Sensoren zahlreicher Satelliten abspielte, ermöglichte das direkte Studium einiger Vorgänge. In Kombination mit Modellsimulationen konnten wichtigste Mechanismen, wenn auch nicht restlos, geklärt werden.

In diesem Kapitel soll der Einfluss von Vulkanausbrüchen auf Klimaschwankungen dargelegt werden. Am Schluss des Kapitels wird auch noch kurz auf den Einfluss troposphärischer Aerosole (anthropogene oder natürliche) eingegangen.



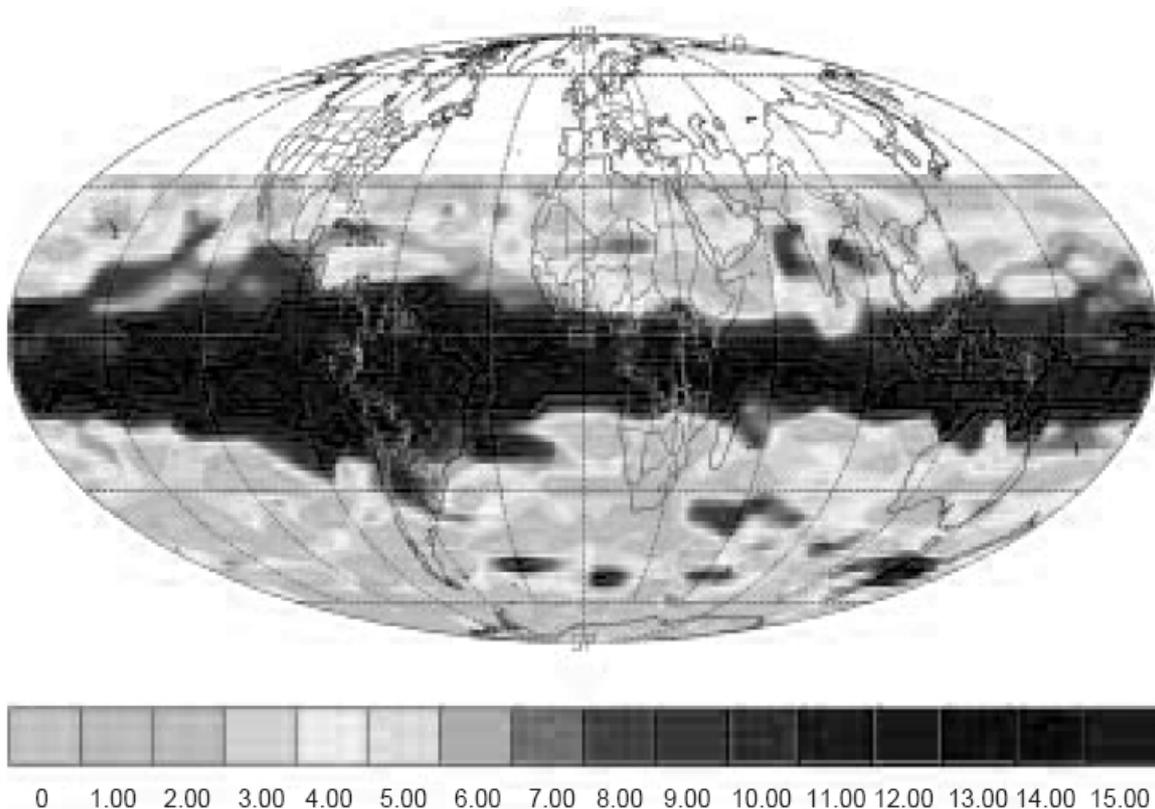
**Fig. 47:** Ausbruch des Pinatubo, 1991 (Foto: USGS).

### 3.5.2. Vulkanische Partikel und Gase in der Atmosphäre

Explosive Vulkanausbrüche emittieren Feststoffe und Gase in die Atmosphäre. Gut sichtbar ist die vulkanische Asche (nicht eigentlich Asche, sondern vulkanisches Glas), daneben emittieren Vulkane auch grosse Mengen an Wasserdampf und Spurengasen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{CO}_2$ , etc.). Partikel und Gase können in die Troposphäre oder in die Stratosphäre emittiert werden. Asche hat in der Troposphäre eine sehr kurze Verweildauer und wird innert Tagen bis Wochen sedimentiert oder ausgewaschen. In der Stratosphäre hat vulkanische Asche eine längere Verweildauer, im Bereich von Monaten. Das ist allerdings immer noch kurz für klimatische Effekte.

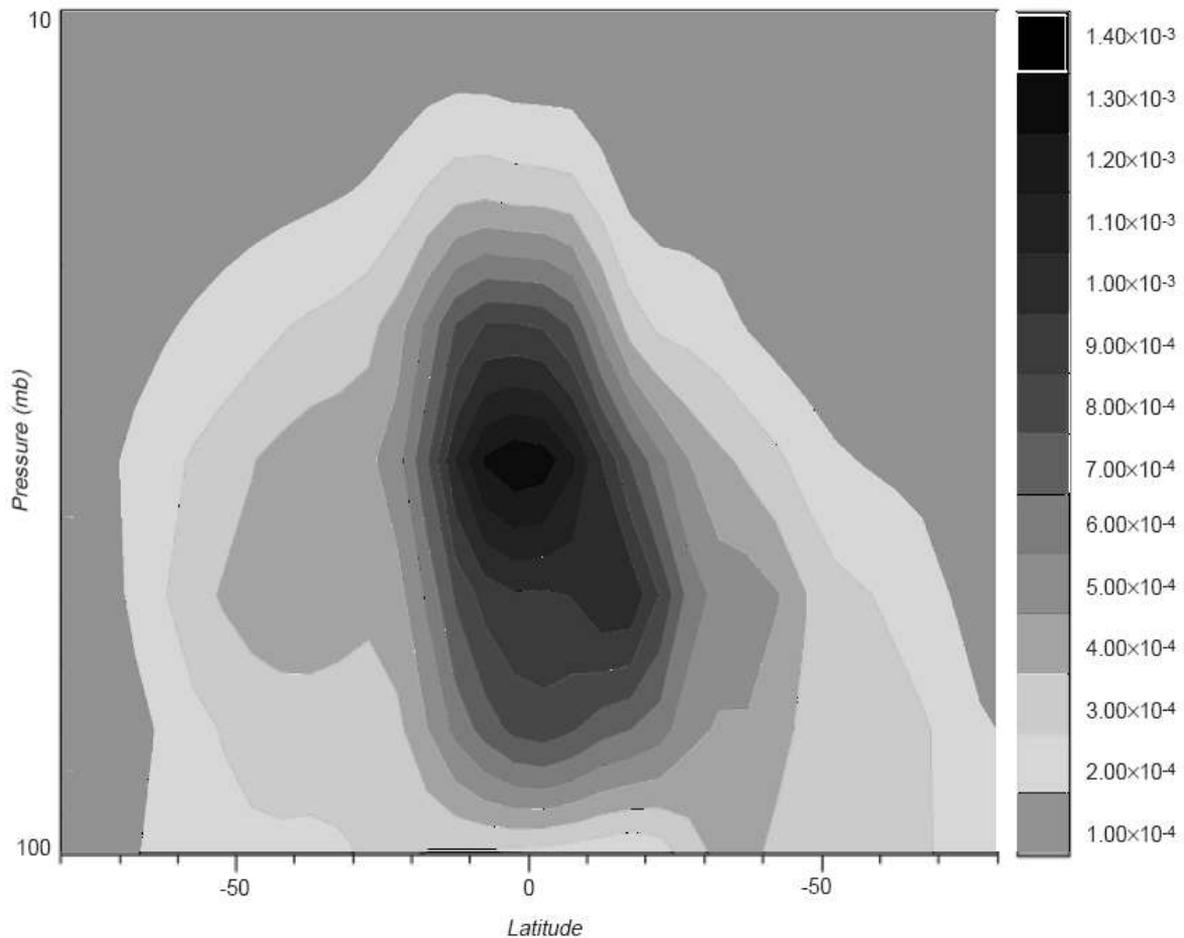
Man geht heute davon aus, dass der Einfluss von Vulkanausbrüchen auf das Klima vor allem vom Gas  $\text{SO}_2$  ausgeht. Figur 48 zeigt die  $\text{SO}_2$  Wolke in der Stratosphäre nach dem Ausbruch des Pinatubo, 1991. Das Gas breitet sich rasch in der tropischen Stratosphäre in zonaler Richtung aus, während der meridionale Transport viel langsamer ist. Interessant ist, dass die  $\text{SO}_2$ -Wolke nicht nur auf einer Seite des Äquators liegt, sondern mehr oder weniger symmetrisch um den Äquator.

$\text{SO}_2$  hat in der Stratosphäre eine chemische Lebensdauer von wenigen Monaten und wird zu Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) umgewandelt, welches kondensiert und Sulfataerosole bildet. Sulfataerosole wiederum haben in der Troposphäre eine Verweildauer von Wochen, sie können also nur dann klimatisch von Bedeutung sein, wenn die Zufuhr von  $\text{SO}_2$  über längere Zeit anhält. In der Stratosphäre haben Sulfataerosole dagegen eine viel längere Verweildauer, im Bereich von 1-3 Jahren. Sie beeinflussen die Atmosphäre also während einer viel längeren Zeit.



**Fig. 48:**  $\text{SO}_2$ -Wolke in der Stratosphäre drei Monate nach dem Pinatubo-Ausbruch, mit dem Microwave Limb Sounder gemessen (Read et al. 1993).

Figur 49 zeigt die Extinktion durch stratosphärische Aerosole fünf Monate nach dem Pinatubo-Ausbruch. Die Hauptwirkung der Aerosole war um diese Zeit beschränkt auf die tropische untere Stratosphäre, mit nur kleinem Einfluss nördlich und südlich von  $40^\circ$  N respektive  $40^\circ$  S. Später weitete sich der Einfluss immer stärker meridional aus. Zwei Jahre nach dem Ausbruch war die Aerosolkonzentration in der Stratosphäre immer noch erhöht, aber weniger deutlich und mit weniger räumlicher Struktur.



**Fig. 49:** Aerosolextinktion in der Stratosphäre nach dem Pinatubo-Ausbruch (zonal gemittelt), am 8.-11. November 1991 (Graininger et al., 1993).

### 3.5.3. Wirkung auf die Atmosphäre

Wie wirken die vulkanischen Gase und Aerosole auf die Atmosphäre am Beispiel eines tropischen Ausbruchs? Figur 50 zeigt die verschiedenen Wirkungen schematisch. Im Prinzip absorbieren Aerosole kurzwellige Sonnenstrahlung wie auch langwellige Infrarotstrahlung. Die Absorption kurzwelliger Strahlung führt dort, wo sich die Aerosole aufhalten und die Sonne scheint, zu einer Temperaturzunahme, unterhalb der Aerosolschicht zu einer Abnahme der kurzwelligen Strahlung. Aerosole streuen auch mehr Licht. Dies führt zu einer erhöhten Rückstreuung in den Weltraum und zu einer Zunahme der diffusen Strahlung einhergehend mit einer Abnahme der direkten Strahlung. Sonnenuntergänge sehen wegen der verstärkten Streuung nach Vulkanausbrüchen besonders spektakulär aus. Sulfataerosole absorbieren die Infrarotstrahlung von der Erde und emittieren diese Strahlung zum Teil wieder zurück zur Erde (langwellige Gegenstrahlung). Dieser Effekt ist nicht von der Sonnenstrahlung abhängig.

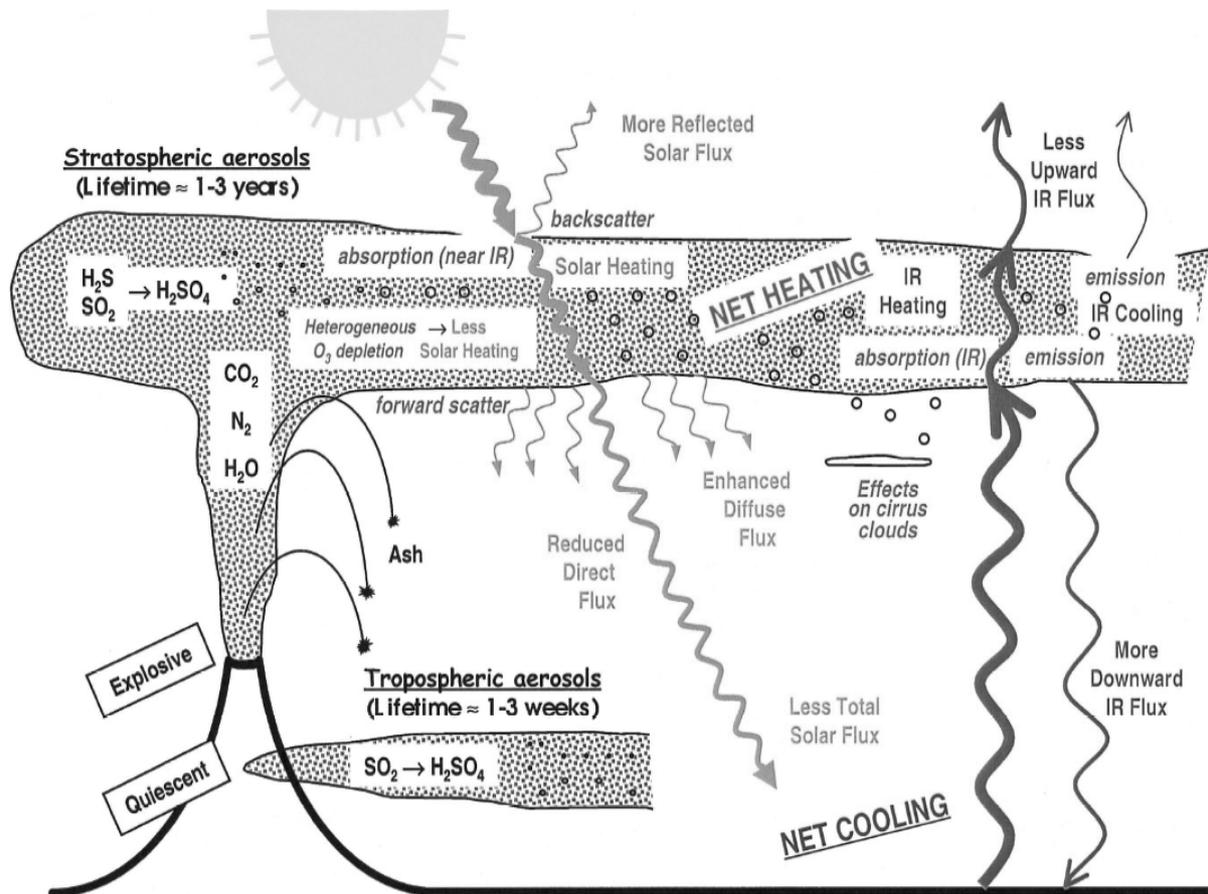


Fig. 50: Einfluss von Vulkanausbrüchen auf die Energiebilanz, schematisch (Robock, 2000).

Der Netto-Effekt dieser verschiedenen Strahlungsprozesse ist eine Erwärmung der Stratosphäre, die vor allem in den Tropen ausgeprägt ist (mehr Aerosole, mehr Sonnenstrahlung, höhere Bodentemperaturen). Gleichzeitig kühlt sich in den Tropen die Erdoberfläche ab, da die kurzwellige Strahlungsbilanz negativ ist. In den Aussertropen, vor allem in der Arktis ist der direkte Effekt gering: die Aerosolkonzentrationen sind normalerweise geringer, und es hat weniger Sonnenstrahlung (vor allem natürlich in der Polarnacht). Diese räumlich unterschiedlichen Vorgänge führen zu starken Gradienten in der Stratosphäre, sehr ausgeprägt in der Winterhemisphäre. Dies ist in Figur 51 schematisch dargestellt. Wegen der Polarnacht wirken sich Strahlungsprozesse in der Arktis nicht aus, dagegen erwärmt sich die tropische und subtropische Stratosphäre. Der entstehende Temperaturgradient führt zu einem stärkeren Polarwirbel. Der stärkere Polarwirbel wiederum verändert die Wellenpropagation von der Troposphäre (vgl. Kapitel 3.3), was sich zurück auf die Troposphäre auswirken kann. Das entstehende Muster ähnelt der Nordatlantischen Oszillation: Vulkanausbrüche führen tendenziell zu einem höheren NAO Index.

Die Temperaturanomalien nach dem Pinatubo-Ausbruch im Nordwinter sind in Fig. 52 gezeigt. Über den Landmassen, vor allem Europa und Kanada, führte Pinatubo zu einer Erwärmung der Wintertemperatur. Dieses Muster ist im Einklang mit der Signatur der Nordatlantischen oder Arktischen Oszillation im Temperaturfeld (vgl. Kapitel 3.2.). In den Subtropen und Tropen dominiert dagegen der abkühlende Effekt. Im Sommer dominiert auch in Europa der abkühlende Effekt, wohl als Folge der negativen kurzwelligen Strahlungsbilanz.

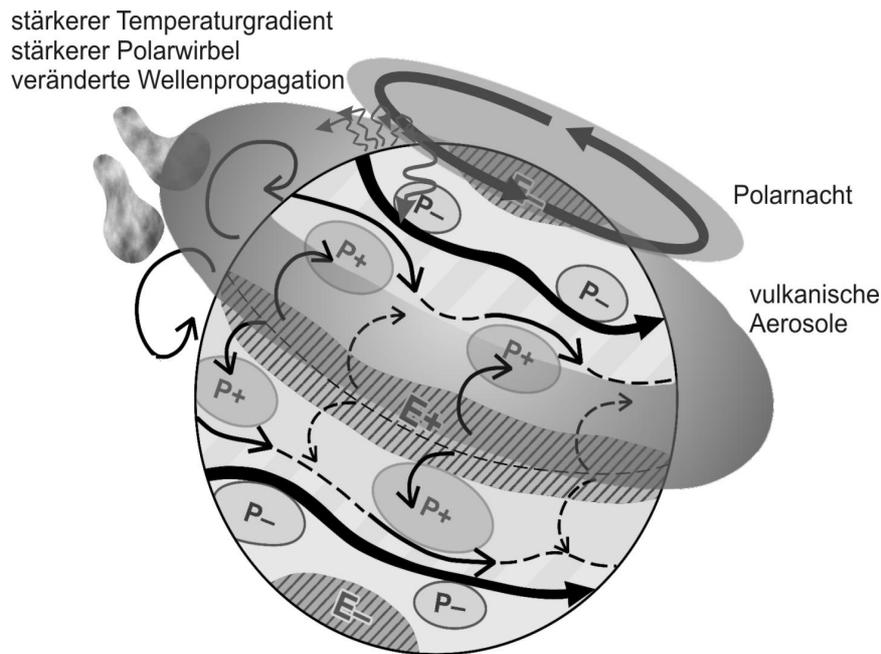


Fig. 51: Wirkung von vulkanischen Aerosolen in der Stratosphäre (nach Wanner et al., 2000, verändert).

Dieser Effekt erscheint auch, wenn die Temperaturen über das relative breite Band von 30° N bis 70° N gemittelt werden (Fig. 53). Nach den grösseren Vulkanausbrüchen des 20. Jahrhunderts, vor allem nach Pinatubo, zeigt sich eine Abkühlung der Sommertemperatur und eine Zunahme der Wintertemperatur.

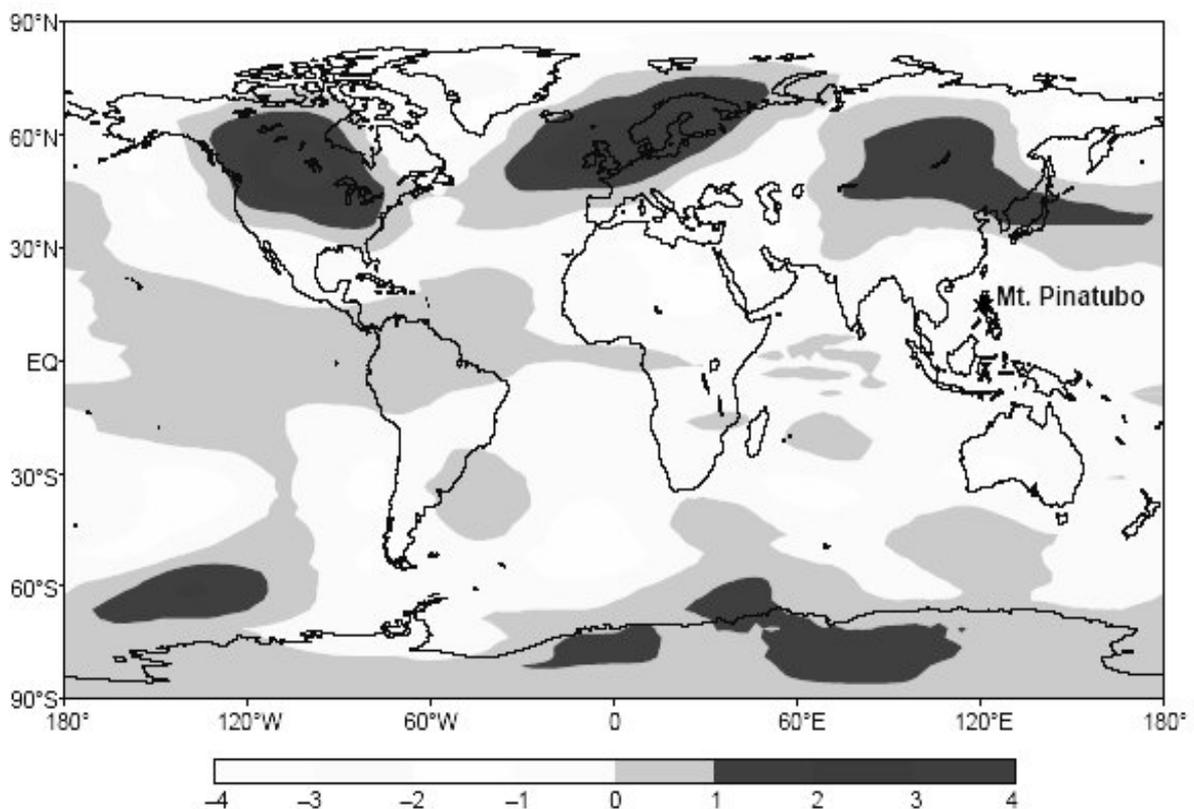


Fig. 52: Temperaturanomalien im Dezember 1991 bis Februar 1992, bezüglich der Periode 1984-1990, nach dem Pinatuboausbruch 1991 (Robock, 2000).

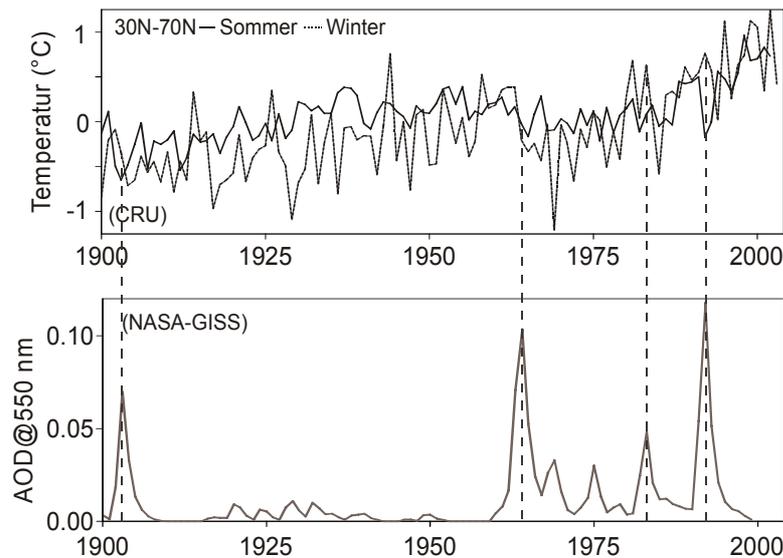


Fig. 53: Temperaturen der Nordhemisphäre, 30-70 °N und Aerosol Optical Depth bei 550 nm für das 20. Jhd.

Der Einfluss von Vulkanausbrüchen auf die Stärke des Polarwirbels und damit die Nordatlantische Oszillation schient nicht der einzige dynamische Effekt zu sein. Eine Analyse von Vulkanausbrüchen der letzten 500 Jahre und Rekonstruktionen von El Niño Ereignissen zeigen, dass starke tropische Vulkanausbrüche offenbar El Niño-Ereignisse auslösen können. So folgten auch auf die letzten beiden grossen Ausbrüche – El Chichon und Pinatubo – El Niños. Der vorgeschlagene Mechanismus ist derjenige des „Thermostats“ (vgl. Abschnitt 3.4.5.1): Die Abkühlung in den Tropen betrifft den Westpazifik stärker als den Ostpazifik, dessen Temperatur durch die Thermokline bestimmt wird. Damit verringert sich der Temperaturgradient, was El Niño-Bedingungen begünstigt.

Die folgende Tabelle (aus Robock, 2000) gibt einen Überblick über die Effekte grosse Vulkanausbrüche auf Wetter und Klima.

TABLE 3. Effects of Large Explosive Volcanic Eruptions on Weather and Climate

<i>Effect</i>	<i>Mechanism</i>	<i>Begins</i>	<i>Duration</i>
Reduction of diurnal cycle	blockage of shortwave and emission of longwave radiation	immediately	1–4 days
Reduced tropical precipitation	blockage of shortwave radiation, reduced evaporation	1–3 months	3–6 months
Summer cooling of NH tropics and subtropics	blockage of shortwave radiation	1–3 months	1–2 years
Stratospheric warming	stratospheric absorption of shortwave and longwave radiation	1–3 months	1–2 years
Winter warming of NH continents	stratospheric absorption of shortwave and longwave radiation, dynamics	$\frac{1}{2}$ year	one or two winters
Global cooling	blockage of shortwave radiation	immediately	1–3 years
Global cooling from multiple eruptions	blockage of shortwave radiation	immediately	10–100 years
Ozone depletion, enhanced UV	dilution, heterogeneous chemistry on aerosols	1 day	1–2 years

### 3.5.4. Masse für den vulkanischen Einfluss verschiedener Vulkanausbrüche

Der Einfluss von Vulkanausbrüchen auf Atmosphäre und Klima ist nicht immer gleich und hängt von verschiedenen Faktoren ab. Ausbrüche in den Tropen sind einflussreicher als solche in den Aussertropen, zum einen weil Aerosole hier den grössten Effekt haben, zum ande-

ren, weil sie hier eine längere Verweildauer haben. Aerosole von tropischen Ausbrüchen können sich global verteilen; wenn der Vulkan nahe beim Äquator liegt sogar in beide Hemisphären. Dagegen werden Aerosole von Vulkanausbrüchen in mittleren und hohen Breiten nicht in die Tropen transportiert und haben entsprechend eine geringere Wirkung.

Wichtig ist auch die Auswurfhöhe des Vulkans. Vulkanausbrüche bei welchen ein grosser Teil der Gase bis in die Stratosphäre gelangt, haben einen stärkeren Effekt. Effusive Ausbrüche haben einen viel kleineren Einfluss als explosive (ausser wenn der effusive Ausbruch über längere Zeit anhält), und von den explosiven haben solche, welche eher in lateraler Richtung erfolgen (z. B. Mt. St. Helens) eine kleinere Wirkung. Sehr wichtig ist vor allem aber die Zusammensetzung des Magmas. Letztlich ist es die Schwefelmenge in der Stratosphäre, welche die entscheidende Rolle spielt. Vulkanausbrüche aus schwefelreichen Magmen haben deshalb einen viel grösseren Effekt, das gilt insbesondere für Vulkane entlang von Subduktionszonen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Stärke von Vulkanausbrüchen und ihren Einfluss auf das Klima zu messen. Ein direktes Mass der optischen Eigenschaften ist die stratosphärische Aerosol Optical Depth (AOD, optische Tiefe) welche meist für 550 nm (im grünen Bereich, d.h. dem Maximum des Sonnenspektrums) angegeben wird, aber Wellenlängenabhängig ist. Auch wichtig ist das Verhältnis von Streuung und Absorption (single scattering albedo). Historische Datenreihe zu stratosphärischen Aerosolen beruhen zurück bis 1978 auf Satellitenmessungen, zurück bis 1883 auf bodengestützten Strahlungs- und Extinktionsmessungen, und für die Zeit davor auf geschätzten Volumina der Ausbrüche.

Ein oft verwendeter Index für vulkanische Einflüsse auf das Klima ist der Dust Veil Index (DVI). Er soll ebenfalls ein Mass sein für die atmosphärischen Aerosole und berücksichtigt auch Strahlungsmessungen ab 1883, zusätzlich aber auch Temperaturmessungen, beobachtete optische Phänomene, historische Berichte und Volumenschätzungen.

Im Unterschied zu den oben genannten Indices ist der Volcanic Explosivity Index (VEI) nicht abhängig von atmosphärischen Messungen oder Beobachtungen sondern ist allein vulkanologisch begründet. Der Index geht von 1 bis 8, Ereignisse mit VEI = 3 haben eine „mögliche“, solche mit VEI = 4 eine „sichere“ Einwirkung auf die Stratosphäre. Ein von atmosphärischen Daten unabhängiger Index ist für Klimastudien von grosser Wichtigkeit. Allerdings ist beim VEI die Zusammensetzung (Schwefelgehalt) nicht berücksichtigt.

Ein letzter Index ist der Ice Core Volcano Index IVI, welcher auf dem Säuregehalt oder Sulfatgehalt verschiedener Eisbohrkernen beruht. Dies ist der einzige der Indizes, der nur auf Messungen und nicht zusätzlich auf Schätzungen beruht. Allerdings gibt er Vulkanausbrüchen in hohen Breiten ein zu grosses Gewicht.

### 3.5.5. Troposphärische Aerosole

Vulkanische Gase können auch in der Troposphäre Aerosole bilden, welche die Strahlungsbilanz beeinflussen, aber eine kurze Verweilzeit haben. Bei lang anhaltender Zufuhr, zum Beispiel beim acht Monate dauernden Ausbruch des Vulkans Laki auf Island 1783/84, können solche Aerosole einen Einfluss haben. Zahlreiche zeitgenössische Beobachtungen wie auch Eisbohrkerne weisen auf eine grosse Menge an Sulfataerosolen in der Troposphäre hin. Der klimatische Effekt blieb aber vermutlich regional. Obwohl die Klimabeeinflussung durch den Menschen in dieser Vorlesung nicht behandelt wird, soll zum Schluss des Kapitels auch generell die Rolle troposphärischer Aerosole kurz angesprochen werden, das sie möglicherweise auch bei grossräumigen Klimaschwankungen eine Rolle spielen könnten. Die Vorlesungen von Ulrike Lohmann bieten dazu aber wesentlich mehr.

Troposphärische Aerosole haben auch andere Quellen als vulkanische. Weitere natürliche Quellen sind mineralischer Staub und biogene Partikel (Pflanzenteile wie Pollen oder Sporen oder aus biogenen Kohlenwasserstoffen entstandene organische Aerosole). Meersalz ist nur in den untersten Metern der Atmosphäre wichtig. Die bedeutendsten Aerosolquellen sind allerdings anthropogenen Ursprungs und stammen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe oder dem Verbrennen von Biomasse.

Die verschiedenen Aerosoltypen (Meersalz, mineralischer Staub, Russ, organische Aerosole) haben jeweils unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften und daher auch eine unterschiedliche Wirkung auf das Klima. Gemeinsam ist ihnen, dass die Verweildauer aller troposphärischer Aerosole kurz ist. Daher ist der klimatische Einfluss nur regional: über den Kontinenten (vor allem den industriellen Regionen), in tropischen und subtropischen Gebieten mit verbreiteter Biomassenverbrennung und in der Nähe von Wüsten.

Troposphärische Aerosole wirken in mehrfacher Weise auf die Strahlungsbilanz. Der direkte Effekt ist die Absorption durch das Aerosol selbst, welche wiederum stark von der Art des Aerosols abhängt. Russpartikel tragen zu einer Erwärmung bei, die meisten anderen Aerosole führen zu einer Abkühlung. Der indirekte Effekt entsteht durch die Rolle der Aerosole in der Wolkenbildung, wobei zwischen einem ersten und zweiten indirekten Effekt unterschieden wird. Der erste indirekte Effekt gründet auf der Beobachtung, dass in Luft mit mehr Kondensationskeimen Wolken mit kleineren Tröpfchen entstehen. Wolken mit kleineren Tröpfchen sind „heller“ als normale Wolken und reflektieren mehr Licht. Die Aerosole haben dadurch eine abkühlende Wirkung. Der zweite indirekte Effekt ist eine Folge des ersten: In Wolken mit vielen kleinen Tropfen dauert es länger, bis sich Niederschlag bilden kann. Die Wolken haben also eine längere Lebensdauer reflektieren Licht über eine längere Zeit und haben damit eine zweite abkühlende Wirkung. Gleichzeitig erwartet man daraus aber auch, dass sich die Niederschlagsmengen über dem betroffenen Gebiet vermindern. Allerdings ist diese Frage noch recht umstritten.

Für Klimaschwankungen (nicht Klimaänderungen) spielen troposphärische Aerosole unter speziellen Umständen wie im Fall des Laki-Ausbruchs sicher eine Rolle. Denkbar wäre allenfalls auch ein natürlicher Einfluss grossflächiger Waldbrände. Am wichtigsten ist aber wohl die mögliche Auswirkung auf die Niederschlagsbildung. So zeigen Klimamodelle als Folge der Zufuhr von Aerosolen einen Niederschlagsrückgang in der Sahelzone. Falls dies zutrifft, könnten Aerosole sogar eine sehr wichtige Rolle für grossräumige Klimaschwankungen spielen.