

## Vulkane und Klima

Der aktuelle Ausbruch des subglazialen Eyjafjalla-Vulkans in Island hat nicht nur Fragen zur Flugsicherheit aufgeworfen, es wurden auch Erwartungen über eventuelle Auswirkungen auf das Klima diskutiert. Die Bogen der Erwartungen ist dabei weit gespannt und reicht von einem kühlen nächsten Sommer in Europa bis zu einer generellen Verminderung der globalen Erwärmung.

Da der aktuelle Ausbruch noch im Gang ist, und auch die für die Klimawirksamkeit wichtigen Parameter noch nicht aufgearbeitet vorliegen, wird hier vorerst auf die generellen Mechanismen eingegangen und der vulkanische Klimaantrieb (engl. forcing) zusammen mit den wichtigsten anderen natürlichen und menschlich verursachten (anthropogenen) Klimaantrieben besprochen.

Die Klimawirksamkeit eines Vulkanausbruchs besteht aus mehreren Effekten:

- 1) Einige der gasförmigen Materialien des Ausbruchs ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , ...) vermindern die langwellige (LW) Wärmeausstrahlung und erwärmen somit die Luftschichten unterhalb
- 2) Einige feste oder flüssige Materialien (Aerosole) von denen einige erst als Folgeprodukte in der Atmosphäre entstehen (z.B. Sulfat-Aerosole aus  $\text{SO}_2$  und Wasser) vermindern die einfallende kurzwellige (KW) Sonnenstrahlung und kühlen die Luftschichten unterhalb
- 3) Im Allgemeinen überwiegt die abkühlende KW-Wirkung der Aerosole im globalen Maßstab die erwärmende der Treibhausgase. Im Fall des best untersuchten jüngsten explosiven Vulkanausbruchs des Pinatubo, 1991 waren das global  $+1.5 \text{ W/m}^2$  LW-Erwärmungs-Effekt und  $-4.0 \text{ W/m}^2$  KW-Abkühlungseffekt.
- 4) Es gibt noch verschiedene andere Auswirkungen, die zum Beispiel die globale Zirkulation beeinflussen. In dieser Hinsicht wirken sich tropische Vulkane anders aus als solche in polnäheren Regionen. Allen gemeinsam jedoch ist das Vorherrschen der globalen Abkühlung über die Rückstreuung der kurzwelligen Sonneneinstrahlung.
- 5) Damit es zu einer erkennbaren, mittel- bis langfristigen Klimawirksamkeit kommen kann, müssen die Auswurfmaterialien und die Folgeprodukte lange in der Atmosphäre bleiben.
- 6) Das ist nicht der Fall, wenn der Ausbruch unterhalb der atmosphärischen Sperrschicht der Tropopause bleibt. Im Fall des aktuellen Ausbruchs in Island war das zum größten Teil der Fall, die Tropopause lag zwischen 9.000 und 10.000m und der Ausbruch reichte nur kurz zu Beginn bis zu 11.000m und verblieb später durchwegs unterhalb der Tropopause.
- 7) Troposphärische Aerosole (=unterhalb der Tropopause) bleiben nur 1-3 Wochen in der Atmosphäre
- 8) Stratosphärische Aerosole (oberhalb der Sperrschicht der Tropopause) bleiben 1-3 Jahre in der Atmosphäre

## Vergleich mit anderen Klimaantrieben

Vulkane wirken nicht allein auf das Klima. Es gibt eine Reihe von anderen Klimaantrieben, die auf das Klimasystem einwirken. Deshalb ist die einfache Zuordnung einer einzigen Ursache (etwa eines Vulkanausbruchs) zu einer globalen Auswirkung (etwa global  $2^\circ\text{C}$  kühlerer Sommer in den nächsten beiden Jahren durch den Ausbruch des Eyjafjalla) nicht möglich.

Wenn es um regionale Auswirkungen geht (etwa die nächsten beiden Sommer in Wien) wird das vernetzte Ursache-Wirkungs-Gefüge noch komplizierter. Innerhalb des

Klimasystems kann es zu Umstellungen der Windsysteme kommen, die Kontinente können anders als die Ozeane reagieren, die Tropen anders als die mittleren oder höheren Breiten...

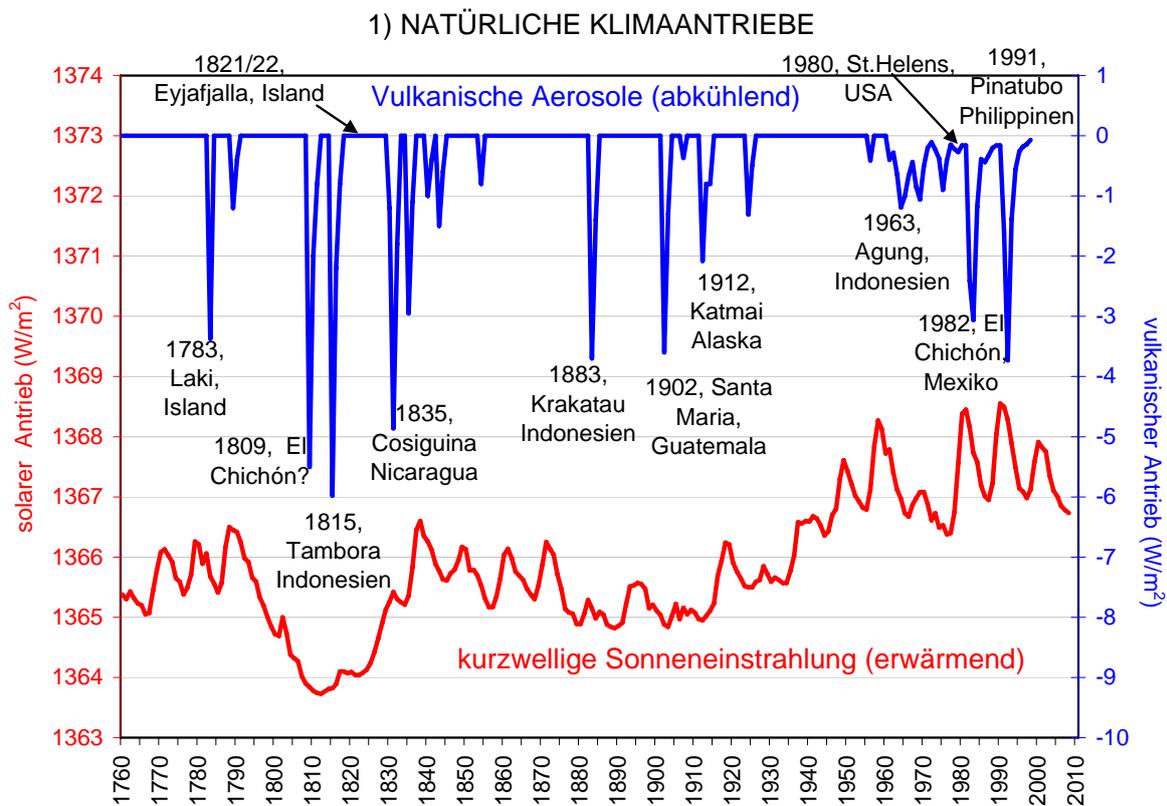
## Sonnenaktivität und vulkanische Aerosole

**Diagramm 1** zeigt den Verlauf der beiden wichtigsten **natürlichen Klimaantriebe**, beide bereits in Energieeinheiten ( $\text{W/m}^2$ ) umgerechnet, die sie dem Erdklima liefern bzw. entziehen.

Die rote Kurve steht für den kurzwelligen Energieinput von der Sonne. Wir erkennen den 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus. Wir erkennen aber auch einen längerfristigen Verlauf von geringerer Sonnenaktivität im frühen 19. Jahrhundert zu höherer in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, die jedoch in jüngster Zeit wieder leicht zurückgeht.

Die blaue Kurve der explosiven Vulkanausbrüche schlägt jeweils nach unten aus, nähert sich jedoch nach wenigen Jahren wieder dem Normalzustand. Besonders wirksam sind beide natürlichen Klimaantriebe, wenn sie, wie etwa in den 1810er Jahren in dieselbe Richtung zeigen.

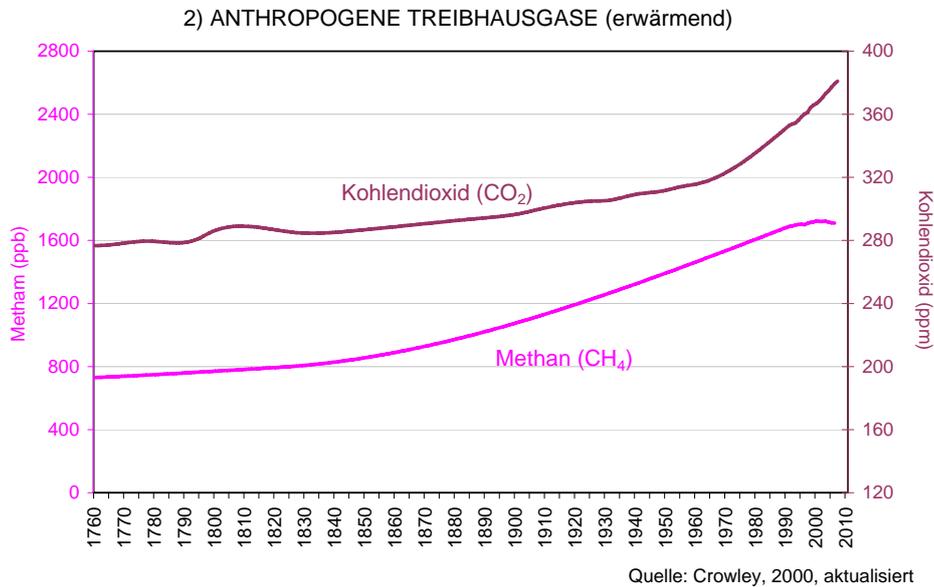
Vorweg fällt auf, dass sowohl der jetzt oft zitierte letzte Ausbruch des Eyjafjalla in Island in den Jahren 1821 und 1822 als auch der spektakuläre Ausbruch des Mount St. Helens im US Bundesstaat Washington auf dieser Skala der potentiellen Klimawirksamkeit nicht bis kaum vorhanden sind.



Quellen. Crowley, 2000, Lean et al, 2000, Solanki et al, 2005, Wagner, 2009, pers. Mitt.

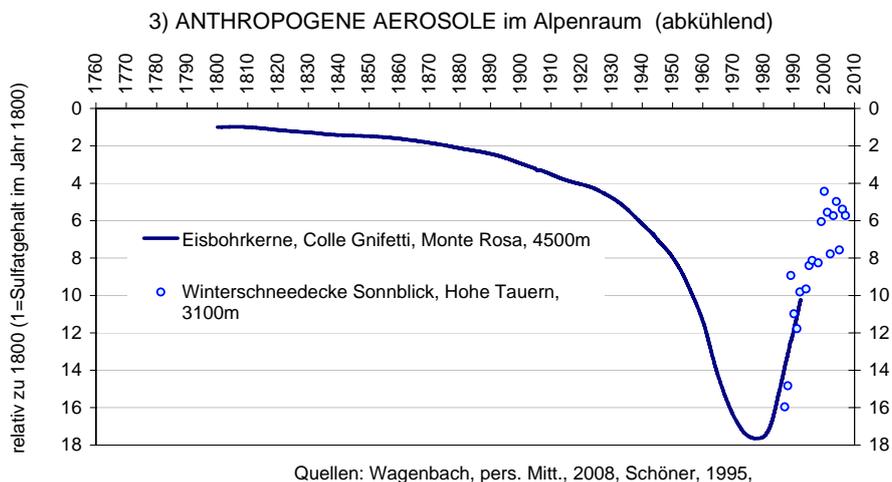
## Treibhausgase

**Diagramm 2** enthält die beiden wichtigsten **anthropogenen** (von uns verursachten **Treibhausgase**, die beide **erwärmend** wirken. Beide zeigen verstärkten Anstieg, das CO<sub>2</sub> speziell in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, CH<sub>4</sub> bereits seit dem späten 19. Jahrhundert. Sie liefern beide langfristige Klimaantriebe, jedoch kaum dekadische (wie die Sonne) oder noch kürzere Variationen wie die Vulkane.



## Anthropogene Aerosole

**Diagramm 3** zeigt einen **anthropogenen abkühlenden Klimaantrieb**, der über denselben Mechanismus funktioniert, wie der vulkanische. In den Jahren der starken und zunächst auf Umweltschäden kaum Rücksicht nehmenden Wirtschaftsentwicklung nach dem 2. Weltkrieg stieg der Gehalt der Atmosphäre an Aerosolen sprunghaft an. Seit etwa 1980 erreichten die Bemühungen zur Reinhaltung der Luft, zusammen mit dem Zusammenbruch der Schwerindustrie im früheren Ostblock, eine Trendumkehr. Das war günstig für die Gesundheit der Menschen und der Wälder Europas, es reduzierte jedoch einen anthropogenen Klimaantrieb, der in den Jahrzehnten von 1950 bis 1980 den erwärmenden Effekt der Treibhausgase „maskierte“. Die anthropogenen Aerosole wurden nur in die Troposphäre emittiert, durch den dauernden Nachschub wurde jedoch ein nachhaltiger Effekt erzielt, der jedoch nach erfolgreicher Reduktion der Schadstoffquellen auch schnell wieder zurückging.



## **Gemeinsame Beurteilung der Klimaantriebe der letzten 250 Jahre**

Generell liegt seit den 1890er Jahren global und auch regional ein anthropogener und sich stetig verstärkender **Langfristtrend zur Erwärmung** vor, der durch die **zunehmenden Treibhausgase verursacht** wird. Dieser war zunächst schwach, verstärkte sich jedoch im Verlauf des 20. Jahrhunderts.

Sehr ähnlich, jedoch **mit stärkeren dekadischen Variationen** verlief der **natürliche Klimaantrieb der Sonne**.

Die Schwankungen und Trends der **solaren Aktivität war der Hauptantrieb der Klimaentwicklung im 18. und 19. Jahrhundert**, erst im 20. Jahrhundert lieferten die anthropogenen Antriebe zunächst schwache Zusatzeffekte, seit Mitte des 20. Jahrhunderts herrschen sie vor.

Die **Vulkane lieferten kräftige kurzfristige Abkühlungsimpulse**, deren stärkste die beiden 1809 und 1815 waren.

Der **anthropogene Zusatzeffekt durch die troposphärischen Aerosole** mit dem Maximum um 1980 wirkte etwa 30 Jahre hindurch **abkühlend** und versteckte so zunächst den bereits wirksamen Treibhauseffekt. Dieser kam erst nach 1980 voll zur Geltung.

Besonders stark wirkten die natürlichen Klimaantriebe Sonne und Vulkanismus in den 1810er Jahren, die insgesamt global sehr kühl waren, und in den Alpen und auch anderswo den Anstoß zu massiven Gletschervorstößen gaben. Vulkanausbrüche, wie etwa der des Laki in Island im Jahr 1783 fielen in eine Zeit mit stärkerer Sonnenaktivität und wirkten sich daher weniger stark aus, als die Ausbrüche des frühen 19. Jahrhunderts.

Treibhausgase und Sonne zusammen bewirkten den ersten Teil der starken Erwärmung des 20. Jahrhunderts. Das Stagnieren der solaren Aktivität und der Abschirmung durch die anthropogenen Aerosole in den 1960er und 1970er Jahren unterbrachen die globale Erwärmung zunächst. Erst ab ca. 1980 kam der Treibhauseffekt zu voller Geltung und ist nun der wirksamste Klimaantrieb.

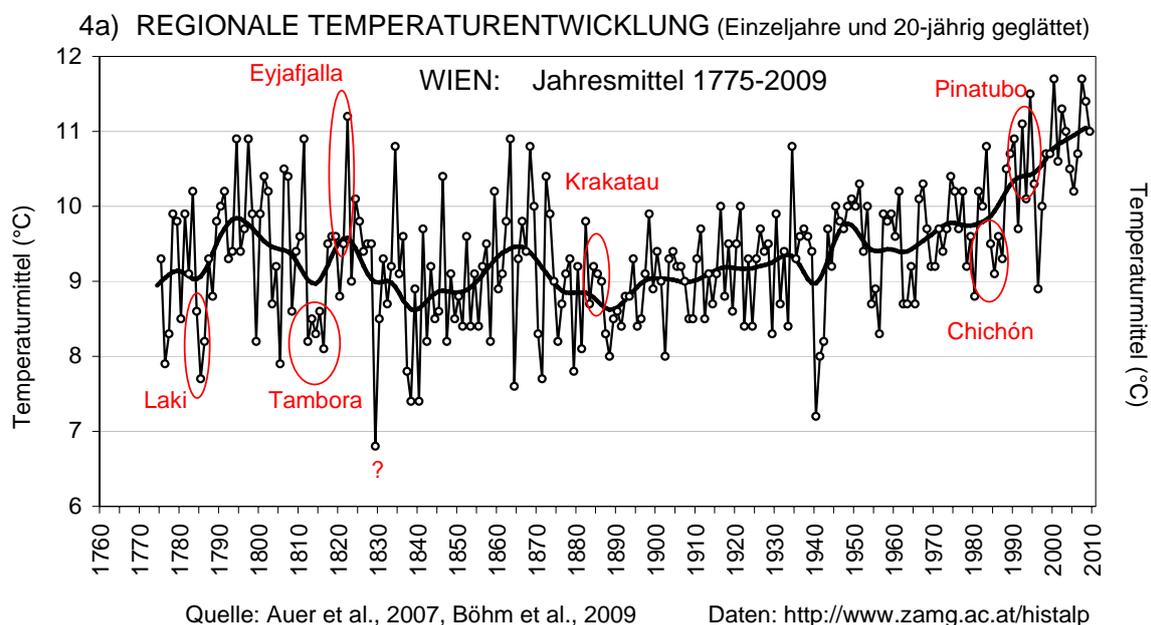
Ob das aktuell diskutierte Stagnieren der globalen Erwärmung auf die nun wieder leicht rückläufige Sonneaktivität zurückgeführt werden kann, auf interne Energieumschichtungen im Klimasystem (Ozeanströmungen) oder ob es sich später als statistische Chimäre erweisen wird (derzeit ist die Trendwende noch nicht signifikant), ist noch unklar – Vulkanausbrüche sind jedenfalls nicht daran beteiligt.

## Regionale Klimaentwicklung am Beispiel der Wiener Temperaturkurve

Infolge der großräumig sehr ähnlichen Temperaturtrends in Mitteleuropa kommt der hier gezeigten Wiener Temperaturreihe nicht nur lokale sondern auch regionale Bedeutung zu. Alle anderen rund 30 Langzeitreihen in der Region, die bis in die erste Hälfte des 19. und in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts zurückreichen, zeigen einen ganz ähnlichen Temperaurverlauf. Die Abbildungen 4a, b und c zeigen die Wiener Temperaturkurve 1777-2009

Man erkennt die zu erwartende Ähnlichkeit auch der **regionalen Temperaturkurve** (4a) mit der des solaren Klimaantriebes. Das betrifft sowohl den Langzeittrend als auch die meisten dekadischen Schwankungen, wie die besonders kalten Zeitabschnitte im frühen und späten 19. Jahrhundert. Auch die Unterbrechung der Erwärmung in den 1960ern und 1970ern ist begleitet von einem Rückgang der Sonnenintensität – hier allerdings wirkten auch die anthropogenen Aerosole abkühlend. Der volle Durchbruch der Treibhausgase manifestiert sich in der starken Erwärmung von 1980 bis 2000.

Kurzfristige Abkühlungen in den Jahren nach Vulkanausbrüchen sind zu sehen in den Fällen des Laki, des Tambora und des Chichón. Keinen Effekt in der regionalen Temperaturentwicklung erkennt man in den Fällen des Krakatau und des Pinatubo. Dem ein Jahr lang dauernden letzten Ausbruch des isländischen Eyjafjalla folgte in Wien das wärmste Jahr der ersten 219 Jahre der Wiener Messreihe. Dieses wurde erst wieder durch ein „Post-Pinatubo Jahr“ (1994) mitten in der aktuellen Treibhausgasperiode (Abb.3) und auch nahe dem absoluten Maximum der Sonnenaktivität (Abb.1) der gesamten 250 Jahre seit 1760 übertroffen.



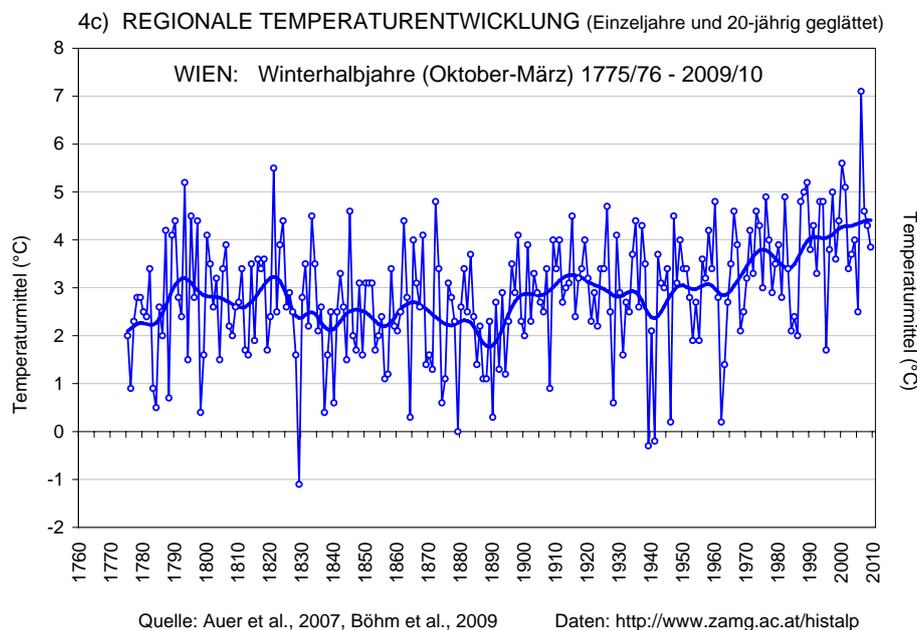
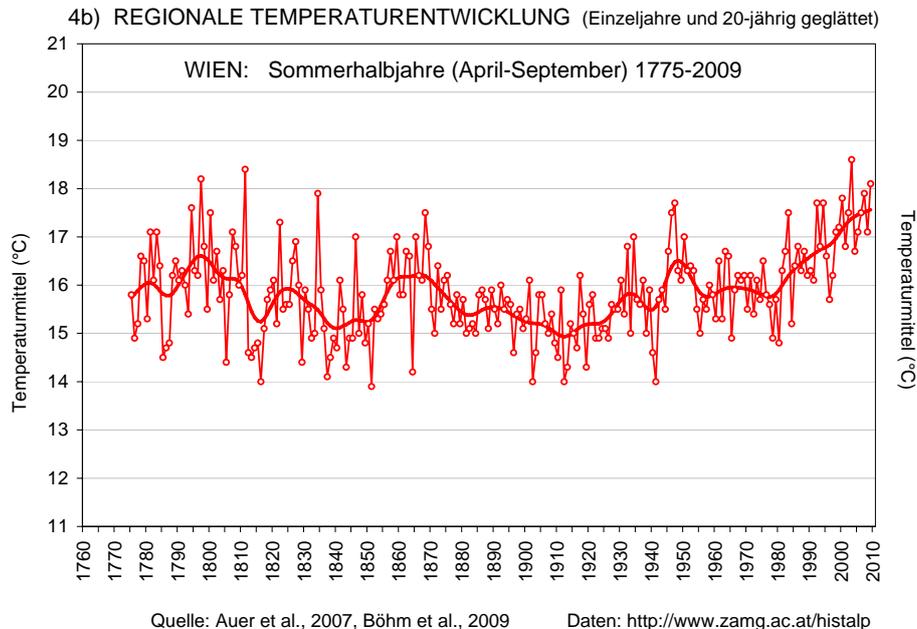
Auch die **saisonalen Temperaturkurven** (4b und 4c) lassen keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Vulkantätigkeit erkennen:

Die beiden ersten Laki-Sommer (1783 und 1884) waren überdurchschnittlich warm, die drei folgenden (1785-87) sprunghaft kälter. Die beiden Laki-Winter (1783/84 und 1784/85) waren sehr kalt.

Die vulkanisch und solar auf Kälte eingestellten 1810er Jahre (Tambora, 1815 und wahrscheinlich el Chichón, 1809) zeigen eine Serie von sehr kalten Sommern (1812-1817), der zweite Sommer (1811) nach dem extremen Ausbruch von 1809 allerdings war der

zeitwärmste der gesamten Zeitreihe, der erst wieder durch den viel zitierten von 2003 knapp übertroffen worden ist. Die Winter der 1810er Jahre waren durchwegs im Normalbereich. Wie schon bei den Jahresmitteln zeigten weder der Krakatau noch der Pinatubo jahrszeitliche klimatische Abnormitäten der erwarteten Art.

Dem Ausbruch des Chichón hingegen folgten sowohl kühle Sommer als auch kalte Winter, beides allerdings vor dem Hintergrund des generell höheren Temperaturniveaus der 1980er Jahre im Vergleich zu denen des frühen 19. Jahrhunderts.



Kontakt ZAMG:

Klimadaten Mitteleuropa frei erhältlich unter:

Paläoklimadaten frei erhältlich unter:

[reinhard.boehm@zamg.ac.at](mailto:reinhard.boehm@zamg.ac.at)

<http://www.zamg.ac.at/histalp>

<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/data.html>

Verwendete und weiterführende Literatur:

- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones PD, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Mercalli L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westermeier G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E, 2007. HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology* **27**: 17-46
- Böhm R, Auer I, Schöner W, Ganekind M, Gruber C, Jurkovic A, Orlik A, Ungersböck M, 2009. Eine neue Website mit instrumentellen Qualitäts-Klimadaten für den Großraum Alpen zurück bis 1760. *Wiener Mitteilungen* **216**: 7-20
- Böhm, 2010. Heiße Luft nach Kopenhagen. 2. erweiterte Auflage, vabene, Wien-Klosterneuburg. 280 Seiten
- Crowley, T.J., 2000, Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years, *Science* **289**: 270-277
- Lean J, 2000. Evolution of the Sun's Spectral Irradiance since the Maunder Minimum. *Geophysical Research Letters* **27**: 2425-2428
- Ruddiman WF, 2008. Earth's Climate – Past and Future. Freeman & Company, New York, 465 Seiten
- Schöner W., 1995. Schadstoffdepositionen in einer hochalpinen winterlichen Schneedecke am Beispiel von Wurtenkees und Goldbergkees (Hohe Tauern). *Dissertation, Universität Salzburg*, 130 Seiten plus Karten- und Tabellenanhänge
- Solanki SK, Usoskin IG, Kromer B, Schüssler M, Beer J, 2004. Unusual activity of the sun during recent decades compared to the previous 11.000 years. *Nature* **431**: 1084-1087