



## Doctoral Thesis

# Interannual-to-decadal variability of the stratosphere during the 20th century analyses with a chemistry-climate model

**Author(s):**

Fischer, Andreas Marc

**Publication Date:**

2008

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005678985> →

**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. 17922

**Interannual-to-Decadal Variability of the  
Stratosphere during the 20th Century:**  
Analyses with a Chemistry-Climate Model

A dissertation submitted to  
ETH Zurich

for the degree of  
**DOCTOR OF SCIENCES**

presented by

**Andreas Marc Fischer**

Dipl. Umwelt-Natw. ETH Zurich  
born on 22 October 1979  
citizen of Steinhausen (ZG) and Menznau (LU)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Stefan Brönnimann, examiner  
Dr. Eugene Rozanov, co-examiner

Zurich 2008

# Abstract

The stratosphere exhibits chemical and dynamical variability on different time-scales, ranging from day-to-day variability to interannual and decadal variability. Through propagation of planetary waves the stratosphere is tightly coupled to the troposphere. Variability originating from the troposphere can affect dynamics and composition in the stratosphere and vice versa. Interannual-to-decadal variability in the stratosphere has a number of common sources such as variations in solar irradiance, volcanic eruptions, El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the quasi-biennial oscillation (QBO).

This thesis is aiming at improving our still limited understanding of interannual-to-decadal variability in the stratosphere using a coupled chemistry-climate model (CCM). Previous modeling and observational studies have focused on the past few decades, which is often a too short time period for studying stratospheric low-frequency variability. It is also the time period when the stratosphere was strongly perturbed with concentrations of greenhouse gases and ozone depleting substances (ODS) and hence less suitable for analyzing natural variability. A better knowledge of natural variability is highly relevant with respect to assessments of current and future climate change as well as ozone recovery.

Nowadays, with the emergence of reconstructed upper-level fields, CCM simulations can be extended much further back. Here, I present results of two types of model simulations using the CCM SOCOL: the model was applied (A) in transient mode to simulate the whole twentieth century with nine ensemble members and (B) in time-slice mode to simulate the anomalous warm ENSO event from 1940-1942 and the anomalous cold event from 1975-1976 using twenty ensemble members.

First, an extensive validation has been performed comparing the output of the transient runs (A) to statistically reconstructed indices, historical re-evaluated total ozone series, ozonesondes as well as satellite and reanalysis datasets. The performance of the runs was also assessed in process-oriented view, looking at ozone trends and the relationship between upward propagating wave energy and polar temperature and ozone, respectively. Overall, it could be concluded that the model is in reasonable agreement with observational data, simulating realistically the main processes within the stratosphere.

Second, forced and internal variability of the subtropical jet, the polar vortex and the stratospheric wave driving were analyzed. It could be shown that the spread of ensemble variability is strongly dependent on the analyzed parameter and region. While the strength of the subtropical jet exhibits a small ensemble spread with interannual fluctuations being ENSO related and hence predictable, year-to-year variations in the strength of the polar vortex are dominated to a large degree by internal variability. A large ensemble spread is

also found for trend estimates of the wave driving, but statistical significance is mostly absent precluding reliable conclusions. The transient runs were further assessed by looking at frequency, seasonality, and intensity of major warmings (MWs). It could be shown that MWs evolve less frequent in the model compared to the reanalysis data, but in a climatological view, seasonality and intensity displayed large similarities with observational data.

A multiple linear regression model was applied to the ensemble mean simulation of the transient simulation (A) in order to extract the main drivers of stratospheric variability in the northern hemispheric winter. It was found that the QBO at 30 hPa and solar variability are both important contributors for zonal wind variability in the high-latitude stratosphere. Both processes lead to an acceleration of the polar vortex during its positive phases. Furthermore, the response to stratospheric aerosols - injected by volcanoes into the stratosphere - is characterized by an increased meridional temperature gradient and accelerated zonal winds at the high latitudes. On the contrary, warm ENSO events and low-frequency variability of sea surface temperatures in the North Atlantic tend to decelerate the zonal flow.

A main focus of this thesis was the role of ENSO on the high-latitude stratosphere. The time-slice runs (B) of SOCOL were compared to two other CCMs. The stratospheric boreal winter climate difference between warm and cold ENSO event revealed in all models an increased wave-mean flow interaction, accelerating the residual mean circulation and weakening the polar vortex. As a consequence ozone is transported from the equatorial stratosphere towards the Arctic stratosphere, where temperatures are anomalously warm. Comparing the response of the models to the response of reconstructed geopotential height and temperature fields, a good match was found over the tropics and the Pacific North American sector but less so over the North Atlantic European region with respect to the wave structure which could be an effect of the low horizontal grid resolution of all three models. A rather high ensemble spread is seen over mid- to high latitudes in two of the analyzed models, suggesting that a sufficiently large set of ensemble member simulations must be carried out, to detect and attribute ENSO signals in long-term transient simulations.

# Zusammenfassung

Die Chemie und Dynamik der Stratosphäre variieren auf verschiedenen Zeitskalen. Diese Variabilität spannt ein zeitliches Spektrum von täglichen, über interannuelle bis zu dekadalen Veränderungen auf. Durch planetare Wellenausbreitung ist die Stratosphäre eng mit der Troposphäre gekoppelt. Variabilität, ausgehend von der Troposphäre, kann die Dynamik und die chemische Zusammensetzung der Stratosphäre verändern. Umgekehrt gilt diese Beziehung ebenfalls. Interannuelle bis dekadale Variabilität in der Stratosphäre haben folgende gemeinsame Ursachen: die Variation der Sonnenstrahlung, vulkanische Eruptionen, El Niño-Southern Oszillation (ENSO) und die quasi-biennial (-zweijährige) Oszillation (QBO).

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, unser bis heute begrenztes Verständnis der interannuellen bis dekadalen Variabilität in der Stratosphäre zu verbessern. Dies wird mit Hilfe eines Klima-Chemie Modells (CCM) untersucht. Frühere Modell- und Beobachtungsstudien fokussierten die Analyse vorwiegend auf die drei bis fünf vergangenen Jahrzehnte. Diese Zeitperiode ist aber oft zu kurz, um niederfrequente stratosphärische Schwankungen zu untersuchen. Zudem haben die hohen Treibhausgaskonzentrationen und Ozon zerstörende Substanzen während den letzten paar Jahrzehnte die Stratosphäre stark beeinflusst, womit diese Zeitperiode weniger geeignet ist, um natürliche Variabilität zu analysieren. Ein tieferes Verständnis über die natürliche Variabilität ist entscheidend, um den Klimawandel und die Ozonentwicklung in Gegenwart und Zukunft besser beurteilen zu können.

Mit dem Aufkommen von rekonstruierten Höhenfeldern können CCMs heutzutage das Klima weiter zurück in die Vergangenheit simulieren. Hier präsentiere ich Resultate zweier Typen von Modellsimulationen mit dem CCM SOCOL: das Modell wurde benützt, um (A) das ganze 20. Jahrhundert mit neun transienten Modellläufen (Ensemble Members) zu simulieren und (B) um Zeitscheiben-Experimente eines aussergewöhnlich warmen (1940-1942) und eines kalten (1975-1976) ENSO Ereignisses mit 20 Ensemble Members durchzuführen.

Zuerst wurden die transienten Läufe (A) mit statistisch rekonstruierten Indices, re-evaluierten Total Ozon Reihen, Ozonsonden, sowie Satelliten- und Reanalyse-Daten validiert. Die prozess-orientierte Validierung beinhaltete die Analyse von Ozontrends und die Beziehung zwischen aufwärts propagierender Wellenenergie und polarem Ozon bzw. Temperatur. Im Grossen und Ganzen konnte gefolgert werden, dass das Modell in vernünftiger Weise mit den Beobachtungsdaten übereinstimmt und die Hauptprozesse der Stratosphäre realistisch wiedergibt.

Danach wurden extern und intern beeinflusste Variabilitäten des Subtropenjets, des Polarwirbels und der stratosphärischen Wellenaktivität analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Spannweite der verschiedenen Modellrealisationen stark von den analysierten Variablen und Regionen abhängt. Während die Stärke des Subtropenjets eine relativ kleine Ensemble-Spannweite aufweist, ist die Jahr-zu-Jahr Variabilität in der Stärke des Polarwirbels zu einem grossen Teil durch interne Variabilität dominiert. Interannuelle Fluktuationen in der Stärke des Subtropenjets werden durch ENSO ausgelöst und sind deshalb vorhersagbar. Eine grosse interne Variabilität wurde in Trendabschätzungen der Wellenaktivität gefunden. Jedoch fehlt hier oft statistische Signifikanz, was verlässliche Schlussfolgerungen verunmöglicht. Die transienten Läufe wurden weiter auf Häufigkeit, Saisonalität und Stärke von Haupt-Warmperioden über der Arktischen Stratosphäre (Englisch: major warmings, MWs) untersucht. Es konnte dabei gezeigt werden, dass MWs im Modell weniger häufig auftreten als in Reanalyse-Daten. Jedoch stimmen Saisonalität und Intensität der modellierten MWs in Klimatologien gut mit Beobachtungsdaten überein.

Ein multiples lineares Regressionsmodell wurde auf die gemittelte transiente Simulation (A) angewandt. Ziel dieser Analyse war es, die wichtigsten Einflussfaktoren auf die stratosphärische Variabilität im nordhemisphärischen Winter zu eruieren. Die QBO auf 30 hPa, die Variabilität der Sonne und ENSO sind die Haupteinflussfaktoren für die Variabilität von Zonalwind in den hohen Breiten. Die QBO und die Sonnenvariabilität führen in ihrer positiven Phase beide zu einer Beschleunigung der Zonalwinde in den hohen Breiten, während warme ENSO Ereignisse mit einer Abschwächung des Polarwirbels assoziiert sind. Stratosphärische Aerosole zeigen eine Verstärkung des meridionalen Temperaturgradienten und führen dadurch zu einer Intensivierung des Polarwirbels. Ähnlich wie ENSO tragen niederfrequente Schwankungen in der nordatlantischen Meeresoberflächentemperatur in ihrer positiven Phase zu einer Abschwächung des Polarwirbels bei.

Ein Hauptfokus dieser Arbeit war der Einfluss von ENSO auf die nördliche Stratosphäre. Die Zeitscheiben-Experimente (B) wurden mit entsprechenden Simulationen von zwei weiteren CCMs verglichen. Die Differenz vom warmen und kalten ENSO Zustand zeigt im stratosphärischen borealen Winterklima in allen Modellen erhöhte Interaktion von Wellen mit dem Zonalwind, was zu einer Beschleunigung der Residualzirkulation und zu einer Abschwächung des Polarwirbels beiträgt. Dadurch wird Ozon vermehrt von der tropischen Stratosphäre zu den nördlichen Breiten transportiert, wo die Temperatur anomal warm ist. Verglichen mit dem Signal in rekonstruierten Feldern der geopotentiellen Höhe und Temperatur zeigte sich über den Tropen und dem Pazifisch Nordamerikanischen Sektor eine gute Übereinstimmung, im Gegensatz zum Nordatlantischen Europäischen Sektor, wo die Wellenstruktur weniger gut reproduziert wurde. Dies könnte im Zusammenhang mit der eher groben horizontalen Gitterauflösung stehen. In zwei Modellen wurde eine relativ hohe Ensemble-Spannweite gefunden, was nahe legt, dass für transiente Simulationen eine grosse Anzahl von Modellrealisationen nötig ist, um ENSO Signale zu extrahieren.