

Diss. ETH No. 16449

The Impact of Cirrus Clouds on Radiation and Vertical Transport in the Tropics

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
THIERRY CORTI
Dipl. Umwelt-Natw. ETH
born 4 November 1977
citizen of Urtenen-Schönbühl BE

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Thomas Peter, examiner
Dr. Beiping Luo, co-examiner
Prof. Dr. Qiang Fu, co-examiner

2006

Abstract

Observations have shown that cirrus clouds occur frequently in the tropical upper troposphere. They influence the Earth's radiative budget and are involved in the vertical transport and dehydration of air masses. The present thesis focuses on the interaction between cirrus clouds and radiation and its consequences for the energy balance of the tropical upper troposphere and stratosphere as well as for the vertical transport of air.

Our knowledge on the **occurrence and properties of cirrus clouds** in the tropics is far from comprehensive. A complicating factor is that tropical cirrus clouds occur with tremendous vertical structure, adopting a high variability in geometrical and optical thicknesses. In this thesis, a detailed **evaluation of a space borne lidar experiment (LITE)** is presented. Combined with further cloud observations, a data set is established building a solid base for radiative transfer calculations including clouds. Required profiles of temperature, ozone and water vapor are obtained from balloon borne measurements.

Based on these data sets, radiative transfer calculations are performed to quantify the radiative energy balance and **vertical mass transport in the equatorial upper troposphere and lower stratosphere**. The resulting mean heating rate profiles show that clouds significantly affect the radiative balance of the tropical upper troposphere and lower stratosphere. The heating rate profiles are used to calculate mean vertical mass fluxes, which suggest that only a small part of the air ascending through the tropical cold point tropopause can reach the middle stratosphere. Above 19 km, the vertical motion is consistent with the concept of a mean meridional (Brewer-Dobson) circulation driven by an extratropical suction pump, whereas lower down, other processes must also be responsible for the upwelling.

The exact mechanisms leading to **troposphere-to-stratosphere transport (TST)** are still unknown. Previously proposed mechanisms have been found either to be too slow or to be insufficient in mass flux to act as a major supply

for the Brewer-Dobson circulation. The present thesis evaluates whether the lofting of air via cloud-radiation interaction might offer an alternative path for TST, responsible for a significant fraction of the observed air mass transport. It is shown here for the first time that a combination of deep convection and subsequent radiatively driven upwelling in cirrus clouds and in cloud free air can explain the supply of air for the Brewer-Dobson circulation. Thus, upwelling associated with cirrus clouds offers a mechanism for the missing second stage, which links deep convection as first stage to the Brewer-Dobson circulation as third stage of TST.

Furthermore, this thesis is the first work giving a detailed radiative and dynamical account of a phenomenon called “**cirrus cloud lofting**”. This mechanism allows enhanced upwelling in cirrus clouds through cloud-radiation interaction. It is examined in detail with the help of a numerical model for optically thin and subvisual cirrus clouds. It is found that cirrus cloud lofting is a plausible mechanism for the maintenance of tropical thin cirrus clouds and generally has a positive effect on the lifetime of subvisual cirrus clouds. Moreover, air is efficiently transported upward due to cloud-radiation interaction.

In addition, the thesis comprises a note discussing the major factors determining the effect of cirrus clouds on the radiative balance at the top of the atmosphere. The main aim is to facilitate the understanding of the **cirrus cloud radiative forcing**.

Another note treats several aspects of **tropical upwelling** ranging from the global scale to the scale of individual air parcels. Results from this thesis are thereby placed within a broader context to encourage further investigations.

Zusammenfassung

Beobachtung in den Tropen haben gezeigt, dass Zirren häufig in der oberen Troposphäre auftreten. Sie beeinflussen dabei den Strahlungshaushalt der Erde und sind am vertikalen Transport von Luftmassen beteiligt. Die vorliegende Doktorarbeit konzentriert sich hauptsächlich auf die Wechselwirkung zwischen Zirren und Strahlung und deren Folgen für die Energiebilanz der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre in den Tropen, sowie für den vertikalen Transport von Luftmassen.

Unsere Kenntnis über **Auftreten und Eigenschaften von Zirren** in den Tropen ist bei weitem nicht vollständig. Ein erschwerender Umstand ist dabei, dass tropische Zirren eine hohe Variabilität in geometrischer und optischer Dicke aufweisen. In dieser Arbeit wird eine detaillierte **Auswertung eines an Bord einer Raumfähre durchgeführten Lidar-Experimentes (LITE)** präsentiert. Kombiniert mit weiteren Wolkenbeobachtungen wird ein Datensatz erstellt, der die Basis für Strahlungsrechnungen mit Wolken bildet. Die notwendigen Ozon-, Wasserdampf- und Temperaturprofile werden Ballonmessungen entnommen.

Mit Hilfe dieser Datensätze werden Strahlungsrechnungen durchgeführt, um die Strahlungsbilanz und den **vertikalen Massentransport in der äquatorialen oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre** zu quantifizieren. Die resultierenden mittleren Heizratenprofile zeigen, dass Wolken die Strahlungsbilanz der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre wesentlich beeinflussen. Die Heizratenprofile werden zur Berechnung von vertikalen Massenflüssen eingesetzt. Diese zeigen, dass nur ein kleiner Teil der Luft, die durch die Tropopause aufsteigt, die mittlere Stratosphäre erreichen kann. Oberhalb von 19 km ist der vertikale Fluss in Einklang mit dem Konzept einer meridional gemittelten (Brewer-Dobson) Zirkulation, angetrieben durch in der extratropischen Stratosphäre brechende Wellen. Weiter unten hingegen müssen andere Prozesse für das Aufsteigen der Luft mitverantwortlich sein.

Die genauen **Mechanismen des Troposphären-zu-Stratosphären Transports (TST)** sind noch immer unbekannt. Früher vorgeschlagene Mechanismen haben sich entweder als zu langsam erwiesen oder als ungenügend in Bezug auf ihre Massenflüsse, um eine bedeutende Versorgung der Brewer-Dobson Zirkulation darzustellen. Die vorliegende Arbeit beurteilt, ob das Aufsteigen von Luft durch die Wechselwirkung von Zirren und Strahlung einen alternativen Weg für TST darstellen könnte. Es wird zum ersten Mal gezeigt, dass eine Kombination von tiefer Konvektion und anschließendem Aufsteigen in Zirren und in wolkenfreier Luft die Versorgung der Brewer-Dobson Zirkulation erklären kann. Aufsteigen in Zirren bietet sich daher als die bisher fehlende zweite Stufe im TST an, die die tiefe Konvektion als erste Stufe mit der Brewer-Dobson Zirkulation als dritte Stufe des TST verbindet.

Der dem Aufsteigen in Zirren zugrunde liegende Mechanismus, das **Wolkenheben**, wird mit einem numerischen Modell für optisch dünne und nicht wahrnehmbare Zirren zum ersten Mal detailliert untersucht. Es wird festgestellt, dass Wolkenheben ein glaubhafter Mechanismus für das Fortbestehen dünner tropischer Zirren darstellt und meist einen positiven Einfluss auf die Lebensdauer nicht wahrnehmbarer Zirren hat. Darüber hinaus wird Luft durch die Interaktion zwischen Wolken und Strahlung effizient nach oben transportiert.

Ausserdem beinhaltet die Doktorarbeit auch ein Kapitel, das die wesentlichen Faktoren bespricht, die den Einfluss der Zirren auf die Strahlungsbilanz an der Atmosphärenoberkante bestimmen. Das Ziel ist dabei, den **Strahlungseffekt von Zirren** möglichst verständlich zu machen.

Ein weiteres Kapitel behandelt eine Reihe von Aspekten des **tropischen Aufsteigen von Luftmassen** von der globalen Skala bis zur Skala einzelner Luftpakete. Resultate dieser Arbeit können dadurch vor einem breiteren Hintergrund gesehen werden, was den Weg für weitere Untersuchungen ebnet.