

Modeling of orographic cirrus clouds

Doctoral Thesis

Author(s):

Joos, Hanna

Publication date:

2009

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005899548>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 18492

Modeling of orographic cirrus clouds

A dissertation submitted to the

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

HANNA JOOS

Dipl. Met., Hamburg University, Germany

born 11 December 1979

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. U. Lohmann, examiner

Dr. P. Spichtinger, co-examiner

Dr. M. Giorgetta, co-examiner

2009

Abstract

Cirrus clouds play a crucial role in modulating the earth radiation budget. They cover approximately 30% of the Earth and consist purely of ice crystals. On the one hand, ice crystals scatter the incoming solar radiation back to space leading to a cooling (albedo effect of clouds). On the other hand, they effectively trap the outgoing long wave radiation leading to a warming (greenhouse effect of clouds). Which effect dominates depends on the cloud's macrophysical and microphysical properties like vertical extension of the cloud, optical thickness, ice crystal shape, ice water content and ice crystal number concentration. For optically thick clouds, the scattering of incoming solar radiation dominates the trapping of long wave radiation leading to a cooling, whereas for optically thin clouds the opposite effect dominates. Until now it is believed that, on a global scale, cirrus clouds warm the present climate. However, an estimate of the net radiative effect of cirrus clouds based on general circulation models (GCM) is difficult because GCMs simulate a fourfold difference in high cloud amount. This is caused by the fact that complex interactions of dynamical and thermodynamical processes that lead to cirrus formation, are not properly taken into account. Furthermore it has been shown that there is a lack of cirrus clouds over mountainous regions in GCMs as the dynamical processes leading to the formation of orographic cirrus clouds are not taken into account. The aim of this work is therefore to improve the understanding of orographic cirrus clouds, their microphysical and optical properties and their representation in global circulation models in the present-day and future climate.

A cloud resolving model is used in order to determine the key parameters influencing the microphysical and optical properties of orographic cirrus clouds in the present and future climate. First, the capability of the model in realistically simulating orographic cirrus has been shown by comparing the simulated results to aircraft measurements of an orographic cirrus taken during the INCA-campaign. In order to investigate the influence of a warmer climate on the microphysical and optical properties, the model has been initialized with vertical temperature, moisture and wind profiles taken from an IPCC A1B scenario run representative for the present climate and for the period 2090-2099. Two regions representative for North and South America for the corresponding summer and winter months have been investigated. Furthermore the behavior of orographic clouds in a linear and non-linear flow regime are shown. The additional moisture in a warmer climate leads to a slight dampening of the propagation of gravity waves and the associated vertical velocities. Together with the higher temperatures, fewer ice crystals nucleate homogeneously. Assuming that the relative humidity does not change in a warmer climate, the specific humidity in the model is increased, leading to an increased ice water content of the clouds. The net effect of an increased ice water content and a decreased ice crystal number concentration is an enhanced optical depth. This behavior is a robust feature in our simulations that appears in the summer and winter months, North and South America and in the linear and non-linear flow regime.

In a next step, a parameterization of orographic cirrus clouds has been developed and implemented in the ECHAM5 GCM. With this new parameterization changes in orographic cirrus clouds in a future climate have been estimated.

To improve the simulation of orographically excited cirrus in ECHAM5, a coupling of gravity wave dynamics and cloud microphysics has been implemented. The maximum vertical velocity induced by gravity waves is calculated and used directly in the calculation of the ice crystal number concentration. As the ice crystal number concentration strongly depends on the vertical velocity, the addition of a gravity wave induced vertical velocity leads to higher ice crystal number concentrations in the upper troposphere. A comparison of the new parameterization with measurements shows a better agreement. However, the simulated vertical velocities and ice crystal number concentrations are slightly overestimated.

To investigate orographic cirrus clouds in a warmer climate, a newer model version of the ECHAM5 model has been used, in which the effective radius of ice crystals depends on the ice crystal number

concentration. Furthermore a reduced vertical velocity for the freezing parameterization based on box model simulations has been calculated, as the comparison of the simulated and measured values shows an overestimation of the simulated vertical velocity and ice crystal number concentration. The box model results were further used to develop a parameterization of an orographic cirrus cloud cover dependent on the horizontal wave length of the gravity waves. The influence of additional moisture on the propagation of gravity waves is investigated by using the dry and moist Brunt-Väisälä frequency, respectively, in the calculation of the gravity wave induced vertical velocity in two different simulations.

With these new parameterizations implemented, simulations of the present and future climate are performed. From the present to the future climate the vertical velocity increases, as a smaller Brunt-Väisälä frequency in the future climate leads to less flow blocking and higher effective mountain heights over most mountain ranges. The opposite effect can be seen over dry regions. The ice crystal number concentration decreases in the future climate despite the increased vertical velocities. Higher temperatures lead to a faster growth of ice crystals and the supersaturation is depleted faster such that no new crystals can nucleate. The ice water content increases as more water vapor is available in a warmer climate. The net effect of a decreased ice crystal number concentration and an increased ice water content is an increased optical depth in a future climate. This result agrees very well with the cloud resolving simulations. The effect of orographic cirrus clouds on the radiation budget is given by an increased short- and long wave cloud forcing whereas the latter dominates.

The results of the cloud resolving as well as the global simulations point into the direction that an increased optical depth of orographic cirrus clouds might be expected in a future climate. Furthermore the microphysical properties of cirrus clouds in ECHAM5 could be improved as compared to satellite measurements by taking more realistic dynamical processes for cirrus formation into account. This result emphasizes the important role of subgrid-scale dynamical processes for the correct representation of cirrus clouds in GCMs.

Zusammenfassung

Zirruswolken haben einen grossen Einfluss auf das Strahlungsbudget der Erde. Sie bedecken etwa 30% der Erde und bestehen ausschliesslich aus Eiskristallen. Einerseits streuen die Eiskristalle die einfallende Sonnenstrahlung zurück ins All, was zu einer Abkühlung führt und mit dem Albedo-Effekt der Wolken bezeichnet wird. Andererseits können sie durch Absorption und Rückstrahlung der von der Erde emittierten langwelligen Strahlung erwärmend wirken (Treibhauseffekt der Wolken). Welcher dieser beiden Effekte dominiert, hängt von den makro- und mikrophysikalischen Eigenschaften der Wolke ab. Dazu gehören beispielsweise die vertikale Ausdehnung der Wolke, die optische Dicke, die Form der Kristalle, der Eiswassergehalt oder die Eiskristallanzahl. Bei optisch dicken Zirren überwiegt der Albedo-Effekt der Wolken, während bei optisch dünnen Wolken der Treibhauseffekt dominiert. Auf einer globalen Skala überwiegt bei Zirren vermutlich der Treibhauseffekt. Solche Abschätzungen basierend auf Ergebnissen der Globalen Zirkulationsmodelle (GCM) sind jedoch schwierig, da diese bis heute nicht in der Lage sind, den Bedeckungsgrad der Zirren und deren mikrophysikalische und optische Eigenschaften richtig zu berechnen. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass GCMs über Gebirgen keine ausreichende Zirrusbewölkung simulieren, da die dynamischen Prozesse, die zur Bildung von orographischen Zirren führen, in den GCMs nicht enthalten sind. Deshalb ist das Ziel dieser Arbeit, unser Verständnis von orographischen Zirren, ihrer mikrophysikalischen und optischen Eigenschaften sowie deren Simulation in GCMs zu verbessern und den Einfluss eines wärmeren Klimas auf diese abzuschätzen.

Um die wichtigsten Parameter, die die mikrophysikalischen und optischen Eigenschaften von orographischen Zirren im heutigen sowie im zukünftigen Klima bestimmen, zu untersuchen, wurden Simulationen mit einem wolkenauflösenden Modell durchgeführt. Die Fähigkeit des Modells realistische orographische Zirren zu simulieren wurde getestet, indem die simulierten Ergebnisse mit Messungen einer orographischen Zirruswolke verglichen wurden, die im Rahmen der INCA-Kampagne durchgeführt wurden. Um den Einfluss eines wärmeren Klimas auf die mikrophysikalischen und optischen Eigenschaften zu untersuchen, wurde das Modell mit vertikalen Temperatur-, Feuchte- und Windprofilen aus einem IPCC A1B Szenariolauf initialisiert, die repräsentativ für das heutige sowie das zukünftige Klima (2090-2099) sind. Die Simulationen wurden für zwei Regionen, die Nord- und Südamerika repräsentieren, sowie für die jeweiligen Sommer- und Wintermonate durchgeführt. Zusätzlich wurden alle Simulationen für ein lineares und ein nicht lineares Strömungsregime durchgeführt. Die zusätzliche Feuchte in einem wärmeren Klima führt zu einer schwachen Dämpfung der Schwerewellen und den mit ihnen verbundenen Vertikalgeschwindigkeiten. Zusammen mit einer Zunahme der Temperatur, bilden sich weniger Eiskristalle durch homogenes Gefrieren. Unter der Annahme, dass die relative Feuchte in einem zukünftigen Klima konstant bleibt, nimmt die spezifische Feuchte im Modell zu, was zu einer Zunahme des Eiswassergehaltes der Wolken führt. Die Abnahme der Eiskristalle führt in Kombination mit der Zunahme des Eiswassergehaltes zu einer höheren optischen Dicke. Dieses Ergebnis zeigt sich in allen hier durchgeführten Simulationen.

In einem nächsten Schritt wurde eine Parametrisierung für orographische Zirren entwickelt und in das ECHAM5 GCM implementiert. Mit Hilfe dieser neuen Parametrisierung ist es möglich, den Einfluss eines wärmeren Klimas auf orographische Zirren auf einer globalen Skala abzuschätzen.

Um die Simulation von orographischen Zirren in ECHAM5 zu verbessern, wurde die Dynamik der Schwerewellen mit der Wolkenmikrophysik gekoppelt. Dazu wurde die maximale Vertikalgeschwindigkeit die in einer orographischen Schwerewelle auftritt berechnet, und direkt in der Berechnung der Eiskristallanzahl verwendet. Da die Eiskristallanzahl stark von der Vertikalgeschwindigkeit abhängt, führt dies zu einer beträchtlichen Zunahme der Eiskristallanzahl in der oberen Troposphäre. Der Vergleich dieser neuen Parameterisierung mit Messungen zeigt eine bessere Übereinstimmung. Allerdings sind sowohl die Vertikalgeschwindigkeiten als auch die Eiskristallanzahl leicht überschätzt.

Um den Einfluss eines zukünftigen Klimas auf orographische Zirren zu untersuchen, wurde eine neuere Modellversion von ECHAM5 verwendet, in der die Berechnung des Effektivradius der Eiskristalle von der Eiskristallanzahl abhängt. Zusätzlich wurde basierend auf Boxmodellsimulationen eine reduzierte Vertikalgeschwindigkeit berechnet, die in die Berechnung des homogenen Gefrierens eingeht, da der Vergleich von simulierten und gemessenen Werte eine leichte Überschätzung der simulierten Werte gezeigt hat. Die Simulationen des Boxmodells wurden weiterhin für die Entwicklung einer einfachen Parametrisierung für den Bedeckungsgrad für orographische Zirren verwendet. Dieser hängt von der horizontalen Wellenlänge der Schwerewelle ab. Der Einfluss einer höheren Feuchte in einem zukünftigen Klima wird untersucht, indem zwei unterschiedliche Simulationen durchgeführt werden, wobei in einer die trockene und in der anderen die feuchte Brunt-Väisälä Frequenz in der Berechnung der schwerewelleninduzierten Vertikalgeschwindigkeit verwendet wird.

Mit diesen neuen Parametrisierungen wurden Simulationen des heutigen und zukünftigen Klimas basierend auf dem IPCC A1B Szenario, durchgeführt. Die Vertikalgeschwindigkeit nimmt über den meisten Gebirgen im zukünftigen Klima zu. Verursacht wird dies durch eine Abnahme der Brunt-Väisälä Frequenz in einem zukünftigen Klima, was zu einer Verminderung des "flow-blocking" und somit zu einer erhöhten effektiven Berghöhe führt. Der gegenteilige Effekt zeigt sich über den sehr trockenen Regionen der Erde. Trotz der meist höheren Vertikalgeschwindigkeit in Zukunft, nimmt die Eiskristallanzahl ab, da höhere Temperaturen zu einem schnelleren Wachstum der Kristalle führen. Die Übersättigung wird schneller abgebaut, so dass keine neuen Kristalle mehr gebildet werden können. Der Eiswassergehalt nimmt in einem zukünftigen Klima zu, da mehr Wasserdampf vorhanden ist. Die Kombination dieser beiden Effekte führt zu einer Zunahme der optischen Dicke. Der Einfluss von orographischen Zirren auf den Strahlungshaushalt besteht in einem erhöhten kurzwelligen und langwelligen "cloud forcing", wobei das langwellige cloud forcing dominiert.

Die Ergebnisse der wolkenauflösenden sowie der globalen Simulationen deuten auf eine Zunahme der optischen Dicke in einem zukünftigen Klima hin. Ausserdem konnte die Simulation der mikrophysikalischen Eigenschaften von Zirren in ECHAM5 allein durch die Berechnung realistischerer dynamischer Prozesse sowie deren Kopplung an die Eismikrophysik, verbessert werden.