

Aerosol-Cloud-Precipitation Interactions in Moist Orographic Flows

A dissertation submitted to the

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

ANDREAS MÜHLBAUER

Mag. rer. nat., University Innsbruck, Austria

born 26 June 1980

citizen of Austria and Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ulrike Lohmann, examiner
Prof. Dr. Christoph Schär, co-examiner
Prof. Dr. Ken Carslaw, co-examiner

2008

Abstract

Aerosols serve as a source of cloud condensation nuclei (CCN) as well as ice nuclei (IN) and influence microphysical properties of clouds. Results from statistical analyses of rain gauge data in the US, Israel and China suggest that increases in the aerosol number concentrations retard the precipitation formation by cloud drop coalescence in warm-phase orographic clouds leading to a suppression of orographic precipitation. In mixed-phase orographic clouds observational studies indicate that an increase in the aerosol load inhibits the precipitation development by riming leading to less snowfall. It is hypothesized that aerosol-cloud interactions reduce the amount of orographic precipitation on the upslope side of the mountain and enhance the precipitation on the downslope side when the number of aerosols is increased. The net effect may lead to a shift of the precipitation distribution towards the leeward side of mountain ranges thereby affecting the hydrological cycle in mountainous regions.

In this thesis aerosol-cloud interactions in warm-phase and mixed-phase clouds are investigated with numerical simulations. Model simulations of moist orographic flow over topography are conducted to understand the potential influence of anthropogenic and natural aerosols on the precipitation formation in mountainous terrain and on the orographic precipitation distribution. The simulations are performed with the mesoscale nonhydrostatic limited-area weather prediction model COSMO and a horizontal grid spacing of 2 km. In order to treat aerosol-cloud interactions realistically an aerosol microphysics scheme is implemented in COSMO and is coupled to a sophisticated two-moment bulk-microphysics parameterization. In this framework novel parameterizations of cloud droplet nucleation and heterogeneous ice nucleation are introduced to account for aerosol size distributions and chemical compositions. For the microphysical initialization of model simulations observations from a field campaign are employed. Different aerosol size distribution and aerosol compositions are used to represent the range of typical conditions in central Switzerland.

In warm-phase orographic clouds it is found that an increase in the aerosol number concentrations leads to a downstream shift of the orographic precipitation distribution and to an increase in the spillover factor (i.e. the leeward precipitation fraction). A reduction of warm-phase orographic precipitation is observed on the upslope side of the mountain. The downslope precipitation enhancement critically depends on the width of the mountain and on the flow dynamics. In the case of orographic precipitation induced by stably stratified unblocked flow conditions, the loss in upslope precipitation is not compensated by leeward precipitation enhancement. In contrast, flow blocking may lead to leeward precipitation enhancement and eventually to a compensation of the upslope precipitation loss. However, the loss in upslope precipitation also depends on the geometry of the mountain, such as the half-width, and is most severe for narrow mountains where the orographic spillover factor is high. The simulations indicate that latent heat effects induced by aerosol-cloud-precipitation interactions may considerably affect the orographic flow dynamics and consequently feed back on the orographic precipitation development.

In mixed-phase orographic clouds dust aerosols serve as efficient ice nuclei in the contact mode and lead to an early initiation of the ice-phase. As a consequence, the riming rates in the cloud are increased leading to an increased precipitation efficiency and to an enhancement of orographic precipitation. The simulations suggest that for anthropogenic aerosols the mixing state of the aerosols plays a crucial role since coating and mixing may deactivate potential ice nuclei in the contact mode. If parts of the aerosol spectrum are considered as externally mixed black carbon, riming in orographic clouds is increased and orographic precipitation is greatly enhanced. In contrast, if the aerosol spectrum is considered as internally mixed the riming rates are decreased leading to a decrease in orographic precipitation.

Zusammenfassung

Aerosole dienen als Kondensationskeime und Eiskeime und können damit mikrophysikalische Eigenschaften von Wolken beeinflussen. Statistische Auswertungen von Niederschlagsdaten in den USA, Israel und China deuten darauf hin, daß eine Zunahme in den Aerosolanzahlkonzentrationen zu einer Verzögerung des Tropfenwachstum durch Kollision und Koaleszenz führt. Diese Verzögerung führt möglicherweise zu einer Abnahme des orographischen Niederschlags. Beobachtungen in Mischphasenwolken deuten darauf hin, daß analog zur Warmphase mehr Aerosole zu geringeren Bereifungseffizienzen führen und damit zu weniger Schnee. Man vermutet, daß die Aerosol-Wolken-Wechselwirkung zu einer Abnahme des orographische Niederschlag auf der Luv-Seite von Bergen führt und zu einer Zunahme auf der Lee-Seite. Der Nettoeffekt wäre eine Verschiebung der orographischen Niederschlagsverteilung in Richtung Lee mit möglichen Konsequenzen für den hydrologischen Zyklus im alpinen Gelände.

Ziel dieser Arbeit ist es die Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen in Warm- und Mischphasenwolken mit Hilfe von numerischen Modellsimulationen zu untersuchen und mögliche Auswirkungen von anthropogenen sowie natürlichen Aerosolen auf den orographischen Niederschlag abzuschätzen. Um den Effekt von Aerosolen auf den orographischen Niederschlag und dessen Verteilung auszuwerten, werden Simulationen feuchter Bergüberströmungen durchgeführt. Für die Simulationen wird das mesoskalige, nicht-hydrostatische Wettervorhersagemodell COSMO mit einer Auflösung von 2 km verwendet. Um die Aerosol-Wolken Wechselwirkungen möglichst realistisch zu simulieren wird eine Aerosol-Mikrophysik in das COSMO eingebaut und an eine zweimomenten Wolken-Mikrophysik gekoppelt. Weiters werden in diesem Rahmen neuartige Parameterisierungen für die Wolkentropfennukleation und die heterogenen Eiskernbildung eingeführt um sowohl Grössenverteilungen als auch chemische Zusammensetzungen von Aerosole zu berücksichtigen. Die Modellsimulationen werden mit Beobachtungsdaten von einer Feldkampagne initialisiert. Verschiedene Grössenverteilungen und Zusammensetzungen von Aerosolen werden verwendet um typische und repräsentative Bedingungen für die Schweiz nachzustellen.

Die Simulationen zeigen, daß im Falle des warmen orographischen Niederschlags eine Zunahme von Aerosolen zu einer Zunahme des Niederschlagstransports nach Lee führt und daher zu einer Verschiebung des Niederschlags in Richtung Lee. Dieser Lee-Transport ist mit einer Abnahme des Niederschlags auf der Luvseite verbunden. Die Zunahme des Leeniederschlags hängt allerdings stark von der Breite des Berges ab und von den Eigenschaften der orographischen Stömung. Im Falle von unblockierten Gebirgsströmungen kommt es insgesamt zu einer Abnahme des Gesamtniederschlags, da die Abnahme des Niederschlags auf der Luvseite nicht durch eine Zunahme auf der Leeseite kompensiert wird. Im Gegensatz dazu führt das Blockieren der Strömung zu Niederschlagsverstärkung in Lee und somit zu einem Ausgleich des Niederschlagsdefizit. Das luvseitige Niederschlagsdefizit hängt jedoch von der Breite des Berges ab und ist grösser für schmale Gebirge. Die Simulationen zeigen auch, daß Aerosol-Wolken-Niederschlagswechselwirkungen durch das Freisetzen von latenter Wärme auch die Dynamik der Bergüberströmung beeinflussen, welche wiederum den orographischen Niederschlag verändern.

Im Falle von Mischphasenwolken zeigt sich, daß Mineralstaub effizient als Eiskeim im Kontaktmodus wirkt und zu einer frühen Initiierung der Eisphase in orographischen Wolken führt. Dies wiederum führt zu einer Erhöhung der Befreiungsraten, zu einer Erhöhung der Niederschlagseffizienz und zu einer Verstärkung des orographischen Niederschlags. Die Simulationen zeigen auch, daß für anthropogene Aerosole der Mischungszustand eine große Rolle spielt, da Prozesse wie Beschichtung und Mischung von Aerosolen deren Potenzial als effizienter Eiskeim verringert. Nimmt man an, daß ein Teil des Aerosolspektrums extern gemischt ist, führt dies zu höheren Befreiungsraten und einer Zunahme des orographischen Niederschlags. Im Gegensatz dazu führt ein intern gemischtes Aerosolspektrum zu einer Verringerung der Niederschlagseffizienz und zu einer Abnahme des orographischen Niederschlags.