

Idealized studies of summertime moist convection over topography

A dissertation submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. Sc. ETH Zurich)

presented by

Hanieh Hassanzadeh

M.Sc., Sharif University of Technology, Tehran

born on 27.07.1982

citizen of Iran

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Christoph Schär, examiner

Dr. Jürg Schmidli, co-examiner

Prof. Dr. Georg Mayr, co-examiner

Abstract

The climatology of mid-latitude mountainous regions is often characterized by orographic precipitation, which typically provides ample water resources but also makes the respective regions susceptible to hazards such as thunderstorms and floods. In particular in the warm seasons, deep convection may cause severe and sudden flash flood events. To reduce the potential damages, accurate forecasting of these events is vital. However, due to the multi-scale nature of the underlying dynamics, and due the significant number of physical processes involved, many aspects of mountain precipitation remain poorly understood. Particularly in the summer season, when weakly stratified atmospheric conditions prevail, there is an intricate coupling between the atmospheric dynamics, moist convection, as well as land surface, boundary layer and microphysical processes. The resulting flows involve a strong diurnal cycle of high complexity. In the recent decade, kilometer-scale convection-resolving models (CRMs) are increasingly used as new tools in atmospheric and climate sciences. They allow representing atmospheric convection explicitly, rather than using parameterization schemes as in large-scale models. This thesis uses the COSMO model in a CRM set-up. It aims at an improved understanding of mid-latitude summertime moist convection and precipitation mechanisms over and in the vicinity of isolated mountains. To this end, an idealized framework is used, which has been developed and tested in a previous study to investigate diurnal convection in absence of topography.

In chapter 2, we focus on the diurnal cycle of summertime precipitation over and in the vicinity of a Gaussian-shaped mountain with a height of 1000 m and half-width of 20 km. The simulations are forced by diurnal radiation and are conducted over an extended time period to ensure that the diurnal equilibrium is reached, where deep convection is triggered every day, but with considerable day-to-day variations. Significant spatial and temporal variability in precipitation is found over the 20 day long analysis period. The variations result from different physical mechanisms associated with the triggering of deep convection in different parts of the domain. Over the mountain lee, mass convergence from thermal upslope flow and the background wind triggers intensive precipitation in the morning. A second triggering mechanism is observed along the leading edge of the primary cold-pool, downstream of the mountain. This cold pool spreads over the near vicinity and leaves a dry area behind that gets very little precipitation. In the afternoon, some precipitation is seen over the flat part of the domain owing to the deep convection resulting from the boundary layer growth. In the evening, the collisions of outflows from previous precipitation events also cause deep convection and precipitation. We investigate the impact of the mountain

height on the characteristic precipitation timing and the associated spatial patterns. It is found that for higher mountain, the precipitation onset is earlier and the hourly precipitation frequency is higher. The intensity increases with mountain height as long as the flow-over regime is dominant, and it decreases with the onset of the flow-around regime. After understanding the main precipitation mechanisms involved, we investigate the influence of the mountain on producing extreme precipitation events in different environmental conditions. In chapter 3 we consider the role of different soil moisture conditions and different atmospheric stratifications. Extreme events are defined in terms of precipitation percentiles. Among the simulations with different soil moisture, drier cases lead to higher sensible heating, stronger diurnal mountain circulations and ultimately to stronger lee precipitation. In essence, dry soils emphasize the impact of the diurnal mountain circulations. For the cases with different atmospheric stratification, two opposing effects are seen. For weakly stratified cases, the boundary layer becomes drier, leading to more efficient evaporation of falling precipitation, and thereby to stronger cold-pools. Hence, extreme precipitation events associated with cold-pool formation are enhanced. On the other hand, strongly stratified conditions lead to moister and warmer atmospheric boundary layers, thereby enhancing precipitation due to the other triggering mechanisms, e.g. lee convergence and boundary layer growth.

To summarize, the modeling framework used here provides insight into the influence of mountains on the summertime precipitation. The focus on idealized simulations helps to identify and interpret the different precipitation mechanisms, and their sensitivities with respect to the mountain geometry and to environmental conditions.

Zusammenfassung

Das Klima in den Berggebieten der mittleren Breiten ist weitgehend durch orographischen Niederschlag geprägt, der diese Regionen mit wichtigen Wasserressourcen versorgt, aber auch das Risiko für schwere Gewitter und Überschwemmungen erhöht. Besonders in der warmen Jahreszeit können starke Konvektionsereignisse zu massiven, flutartigen Überschwemmungen führen. Um die potentiellen Schäden solcher Ereignisse zu begrenzen, sind exakte Vorhersagen notwendig. Allerdings sind viele Aspekte, die zu Niederschlag in Berggebieten führen nur schlecht verstanden, was vor allem an der Vielzahl der involvierten physikalischen Prozesse und der skalenübergreifenden Dynamik liegt. Besonders im Sommer wenn die atmosphärische Schichtung relativ instabil ist, sind die Wechselwirkungen zwischen atmosphärischer Dynamik, feuchter Konvektion, Landoberfläche, Grenzschicht und den mikrophysikalischen Prozessen sehr kompliziert. Die resultierende atmosphärische Strömung zeigt einen starken und sehr komplexen Tagesgang. Im letzten Jahrzehnt wurden verstärkt neue konvektionsauflösende Modelle in den Atmosphären- und Klimawissenschaften eingesetzt. Diese Modelle erlauben es Konvektion in der Atmosphäre explizit zu simulieren, anstatt sie durch Parametrisierungen approximieren. In dieser Dissertation wird das COSMO Modell in einer solchen konvektionsauflösenden Konfiguration angewandt. Ziel der Arbeit ist es, das Verständnis über feuchte Sommerkonvektion in den mittleren Breiten und die damit verbundene Niederschlagsprozesse über in der Nähe von freistehenden Bergen zu verbessern. Zu diesem Zweck, führen wir idealisierte Simulationen von Tagesgang der Konvektion durch.

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit fokussieren wir uns auf den Tagesgang von Sommerniederschlag in der Umgebung eines einzelnen idealisierten Berges mit einer Höhe von 1000 Metern und einer Breite von 20 Kilometern. Die Simulationen werden mit realen Strahlungsdaten angetrieben und für eine Simulationsdauer von 35 Tagen. Nach einigen Tagen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen ein und der tägliche Verlauf ändert sich kaum mehr. Dieses Gleichgewicht zeichnet sich dadurch aus, dass jeden Tag hochreichende Konvektion ausgelöst wird, aber dennoch zufällige Unterschiede von Tag zu Tag ersichtlich sind. Das Niederschlagsfeld zeigt beträchtliche räumliche und zeitliche Variabilität, welche dadurch verursacht wird, dass an unterschiedlichen Orten in der Domäne verschiedene physikalische Prozesse hochreichende Konvektion auslösen. Über der Leeseite des Berges führen thermische Aufwinde und die Hintergrundströmung zu Massenkonvergenz, welche den Niederschlag am Morgen verstärkt. Ein anderer Mechanismus, kann über dem Rand des primären, vom Gewitter induzierten, Kaltluftstroms stromabwärts des Berges

beobachtet werden. Ein Kaltluftsee breitet sich in der näheren Umgebung aus und lässt trockene Gebiete zurück, über denen wenig Niederschlag fällt. Am Nachmittag wächst die Grenzschicht und löst über dem flachen Teil des Gebiets hochreichende Konvektion aus, welche wiederum zu etwas Niederschlag führt. Am Abend führt die Kollision von Abwärts Strömungen, ausgelöst durch vorangegangene Niederschlagsereignisse, zu erneuter hochreichender Konvektion mit Niederschlag. Weiter untersuchen wir den Einfluss der Höhe des Berges auf den Zeitpunkt und die damit verbundene räumliche Verteilung des Niederschlags. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Höhe des Berges der Niederschlag früher am Tag beginnt und die stündliche Niederschlagsfrequenz höher ist. Die Niederschlagsintensität nimmt mit der Höhe des Berges zu, solange die Strömung über den Berg führt. Wechselt das Regime und die Strömung fließt um den Berg herum, nimmt der Niederschlag mit der Höhe des Berges ab.

Nachdem wir uns die generellen Mechanismen, welche zu Niederschlag führen, näher angeschaut haben, untersuchen wir in Kapitel 3 den Einfluss eines Berges auf extreme Niederschlagsereignisse in Abhängigkeit von der Umgebung; insbesondere die Rolle der Bodenfeuchte und der Stabilität der Atmosphäre. Dabei werden Extreme Ereignisse anhand von Perzentilen definiert. In den Simulationen mit unterschiedlicher Bodenfeuchte führen trockene Böden zu einem grösseren sensiblen Wärmefluss, einem stärkeren Tagesgang der Zirkulation und letztendlich zu mehr Niederschlag im Lee des Berges. Im Wesentlichen verstärken trockene Böden die thermischen Zirkulationen. Für die Simulationen mit unterschiedlicher Stabilität der Atmosphäre konnten zwei gegensätzliche Effekte beobachtet werden. Im Falle einer geringen Statifizierung wird die Grenzschicht trockener, was zu einer effizienteren Verdunstung von fallendem Niederschlag und zu stärkeren Kaltluftseen führt. Extremer Niederschlag, welcher mit diesen Kaltluftseen verbunden ist, wird also verstärkt. Zum anderen führt eine starke Statifizierung zu einer wärmeren und feuchteren Grenzschicht, was wiederum Konvergenz im Lee sowie das Wachstum der Grenzschicht begünstigt und so auch wieder zu verstärktem Niederschlag führt.

Das verwendete Modell und experimentelle Design ermöglichen es den Einfluss von Orographie auf den Sommerniederschlag in Berggebieten zu studieren. Mit Hilfe der idealisierten Simulationen konnten unterschiedliche Mechanismen identifiziert und interpretiert werden sowie ihre Sensitivität in Bezug auf die Geometrie des Berges und der Umweltbedingungen untersucht werden.