

DISS. ETH No. 22227

***Lagrangian Perspective on
Dynamic and Microphysical Processes
in Orographically Forced Flows***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ANNETTE KATHARINA MILTENBERGER

MSc ETH in Atmos. Clim. Sci., ETH Zurich

born on 26.08.1987

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Heini Wernli, examiner

Dr. Hanna Joos, co-examiner

Dr. Axel Seifert, co-examiner

Dr. Idar Barstad, co-examiner

2014

ABSTRACT

Orographically forced flows strongly impact the global distribution of momentum and water vapour fluxes: flow across a mountain range may block the upstream flow, generate waves and vertical motions leading to condensation and rain formation. The influence of orography on the atmosphere therefore has important implications for ecosystems and human societies by producing strong horizontal precipitation gradients and by generating high-impact weather events such as downslope wind storms or flash floods. In addition to this impact related aspects, orographic flow has been considered as a prototype to enhance our understanding of precipitation formation in the atmosphere, as it provides a concise framework to investigate the coupling between atmospheric dynamics and cloud microphysical processes. Though this coupling is a very crucial component of weather and climate, it is still not well understood.

Numerous factors are known to have a profound influence on orographic precipitation including but not limited to upstream velocity, temperature, stability and moisture profile and the aerosol availability. In this thesis we explore concepts to formalise the description of these dependencies and to characterise the response of orographic precipitation to changes in different properties a priori, i.e., without performing a numerical model simulation.

In the second part of this thesis the dependencies of orographic precipitation on the upstream flow properties and the aerosol scenario are investigated in idealised two-dimensional simulations of stable flow past an isolated hill. All investigated factors are found to have profound impacts on orographic precipitation amounts and distribution, though influence of the cloud condensation nuclei number density diminishes with decreasing surface temperature. Tests with two different microphysical scheme suggest that the formulation of cloud microphysics has little impact on the qualitative behaviour of the orographic precipitation system, but can significantly alter the conversion pathways and the quantitative properties. In general the precipitation amount at a mountain is to first order controlled by the upstream moisture flux. However, different upstream flow properties are found to have significant impacts on the fraction of the moisture influx that is removed from the atmosphere. Thermodynamic properties and the dynamic flow response control the fraction of the moisture flux that condenses during the passage. The conversion of this condensate to surface precipitation is controlled by cloud microphysical processes, which depend strongly on the availability of condensation nuclei and vertical velocities. Accordingly the first component can be anticipated using existing concepts for the classification of the flow response, e.g., the Froude numbers. In contrast, the conversion of condensate to surface precipitation is not well characterised in a non-dimensional framework.

The third part of the thesis explores the use of characteristic timescale of pure warm- and pure ice-phase clouds to characterise the conversion efficiency. The characteristic timescales are explicitly quantified in box model simulations driven with a idealised updraft velocity time series and in two-dimensional numerical simulations based on air parcel trajectories. Based on this analysis, analytical descriptions of the timescales for single parcels are developed. For warm-phase clouds, the vertical coupling of parcels passing through the cloud due to sedimentational in- and outflux of hydrometeors from higher- and to lower-level parcels is investigated employing again box model simulations along air parcel trajectories. Based on the results, weighting factors for the timescale ratio of single air parcels are constructed, which allow us to construct a single characteristic non-dimensional number characteristic for the entire cloud. It is shown that a close relation between the bulk timescale ratio and the

precipitation efficiency exists.

The Lagrangian perspective chosen in the third part of this thesis can provide intriguing insights on the microphysical processes, because it allows to focus on the single conversion rates without regarding advective processes. As the construction of accurate parcel trajectories over complex terrain is a challenging task, in the first part of this thesis a new trajectory calculation tool is described, which allows to calculate trajectories at very high temporal resolution and provide the best currently available trajectories for high-resolution numerical weather prediction models. The advantages of a high temporal resolution of trajectory data are demonstrated in the appendix for three case-studies of Alpine foehn flow and for the modelling of a cirrus cloud observed by Lidar above a high-alpine research station.

In the final part of the thesis, the characteristic timescales of orographic precipitation are put in the context of previously developed conceptual models of orographic precipitation, namely the linear model of orographic precipitation. It is shown that the underlying principles of our timescale definition can be utilised in this context and allows us to include an explicit dependency on the aerosol availability in the linear model.

In summary this study explores the characterisation of the orographic precipitation system with non-dimensional numbers, which enhances our understanding of the fundamental interaction of dynamical and cloud microphysical processes. The results from this thesis may in future be employed for a new parameterisation of orographic precipitation in models with a coarse horizontal resolution, if the results can be extended to mixed-phase clouds. In addition the advantages of the Lagrangian perspective to address different features of orographic flow and precipitation formation is shown. The concepts proposed in this thesis provide a general framework to characterise precipitation systems and are not limited to the investigation of orographic precipitation.

ZUSAMMENFASSUNG

Die globale Verteilung der Impuls- und Feuchteflüsse ist stark beeinflusst durch die Modifikation der Strömung durch Gebirgszüge: Gebirgszüge erzwingen eine Um- oder Überströmung, Schwerewellen werden erzeugt und Kondensation und Niederschlagsbildung tritt durch die erzwungene Hebung der Luft auf. Die Interaktion der Orographie mit der Atmosphäre führt unter anderem zu starken horizontalen Niederschlagsgradienten und beeinflusst das Auftreten von Wettersituationen mit hohem sozio-ökonomischen Einfluss wie Starkniederschlagsereignisse mit schweren Überflutungen oder leeseitigen Starkwindereignissen. Beide Faktoren haben einen starken Einfluss auf die Ökosysteme und die menschliche Gesellschaft. Von einem rein atmosphären-wissenschaftlichen Standpunkt werden orographische Strömungsphänomene oft als ein Prototyp für die Niederschlagsbildung betrachtet, da sie das Studium der Interaktion zwischen dynamischen und wolkenmikrophysikalischen Prozessen in einem wohl definierten Rahmen ermöglichen. Diese Wechselwirkung spielt eine zentrale Rolle für Wetter und Klima, ist aber noch nicht gut verstanden.

Es sind zahlreiche Einflussfaktoren mit einem starken Einfluss auf die orographische Niederschlagsbildung bekannt. Diese beinhalten unter anderem die luvseitige Strömungsgeschwindigkeit, das luvseitige Temperatur-, Stabilitäts- und Feuchteprofil sowie die Aerosolkonzentration. In dieser Dissertationsschrift wird eine Formalisierung der Beschreibung dieser Abhängigkeiten untersucht sowie eine a-priori Charakterisierung der Sensitivität des Gebirgsniederschlags bezüglich veränderten luvseitigen Strömungseigenschaften, d.h. eine Vorhersage dieser ohne eine komplexe numerische Simulation.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird die Abhängigkeit des orographischen Niederschlags von den luvseitigen Strömungseigenschaften und der Aerosolkonzentration untersucht. Dafür werden idealisierte zwei-dimensionale Simulationen der Gebirgsüberströmung in einer stabil geschichteten Atmosphäre verwendet. Alle untersuchten Einflussfaktoren haben einen grossen Einfluss auf die Niederschlagsmenge und die Niederschlagsverteilung, auch wenn sich der Einfluss der Wolkenkeimkonzentration mit abnehmender Erdoberflächentemperatur reduziert. Tests mit zwei unterschiedlichen Mikrophysikparameterisierungen legen nahe, dass die Formulierung der Wolkenmikrophysik einen geringen Einfluss auf das qualitative Verhalten des Niederschlagssystems hat. Allerdings treten signifikante quantitative Änderungen einzelner Variablen auf und die mikrophysikalische Umwandlungswege unterscheiden sich zum Teil stark. In erster Ordnung ist die Niederschlagsmenge, die bei der Überströmung des Berges gebildet wird, durch den Feuchtefluss stromauf des Berges bestimmt. Die relative Beziehung zwischen den beiden Grössen ist jedoch stark von den atmosphärischen Eigenschaften der anströmenden Luft: Die thermodynamischen Eigenschaften und das Strömungsmuster, das sich bei der Überströmung ausbildet, kontrollieren den Anteil des Feuchteflusses, der kondensiert. Der Anteil des gebildeten Kondensates, der zu Niederschlag umgewandelt wird, wird dagegen von mikrophysikalischen Prozessen kontrolliert. Diese hängen stark von der Verfügbarkeit von Kondensationskeimen und den Vertikalgeschwindigkeiten ab. Die Kondensatbildung kann daher relativ gut mit bestehenden Konzepten zur Klassifikation des Strömungsmusters, z.B., den Froudezahlen, antizipiert werden. Dagegen fehlt bisher ein konzeptioneller Ansatz zur Charakterisierung der Umwandlung des Kondensates in Niederschlag.

Im dritten Teil der Arbeit wird untersucht, in wieweit sich charakteristische Zeitskalen der orographischen Niederschlagssystems zur Charakterisierung der Umwandlungseffizienz eignen. Die charakteristischen Zeitskalen können anhand von Luftpaketstrajektorien direkt quantifiziert werden. Es werden sowohl

Boxmodelsimulationen entlang idealisierter Vertikalwindzeitserien wie auch Trajektorien basierend auf zwei-dimensionalen numerischen Simulationen der Gebirgsüberströmung betrachtet. Basierend auf dieser Analyse werden analytische Formulierungen der Zeitskalen für einzelne Luftpakete entwickelt. Für Warmphasenwolken wird zudem der Einfluss der vertikalen Kopplung der Trajektorien durch die Sedimentationsflüsse der Hydrometeor in und aus dem jeweiligen Luftpaket untersucht. Es werden wiederum Boxmodelsimulationen entlang einzelner Trajektorien verwendet. Basierend auf dieser Analyse werden Gewichtungsfaktoren für das Zeitskalenverhältnis einzelner Luftpakete entwickelt, die die Formulierung einer einzigen charakteristischen Kennzahl für die gesamte orographische Wolke ermöglichen. Es wird gezeigt, dass eine enge Verknüpfung dieser Kennzahl mit der Niederschlagseffizienz der Wolke besteht.

Die Lagrangsche Perspektive, die im dritten Teil dieser Dissertationsschrift verwendet wird, erlaubt neue, erkenntnisreiche Einsichten in die mikrophysikalische Entwicklung, da explizit die mikrophysikalischen Prozessraten dargestellt werden und die advektiven Tendenzen nicht berücksichtigt werden müssen. Da die Berechnung präziser Trajektorien über komplexer Topographie eine grosse Herausforderung für bestehende Trajektorienmodelle darstellt, wird im ersten Teil der Arbeit eine neue Methode vorgestellt, die eine in der Zeit sehr hochaufgelöste Berechnung der Trajektorien ermöglicht. In Kombination mit einem hochauflösenden numerischen Wettervorhersagemodell erlaubt diese Methode momentan die genauesten Trajektorienrechnungen. Die Vorteile der hohen zeitlichen Auflösung werden im Anhang illustriert anhand der Analyse von drei Föhnwindereignissen über den Alpen und der Modellierung einer Zirruswolke, die von einer hochalpinen Forschungsstation aus mit einem Lidar beobachtet wurde.

Im letzten Teil der Arbeit werden die charakteristischen Zeitskalen der Gebirgsniederschlagsbildung in den Kontext bestehender konzeptioneller Modelle eingebettet. Der Fokus liegt dabei auf dem sogenannten linear Modell des Gebirgsniederschlags. Es wird gezeigt dass die Konzepte, die für die Definition der Zeitskalen verwendet werden, auch im Kontext des linearen Modells nützlich sind. Sie erlauben eine explizite Repräsentation des Effekts der Aerosolkonzentration im linearen Modell.

Zusammenfassend beschäftigt sich diese Dissertationsschrift mit der Charakterisierung des Gebirgsniederschlagssystems durch nicht dimensionsbehaftete Kenngrössen. Sie trägt dadurch zu einem besseren Verständnis der grundlegenden Wechselwirkung zwischen dynamischen und wolkenmikrophysikalischen Prozessen bei. Die Resultate dieser Studie könnten in weiterführenden Studien zur Entwicklung einer neuen Parameterisierung von Gebirgsniederschlag in numerischen Modellen mit geringer horizontaler Auflösung verwendet werden, wenn die hier präsentierten Resultate auf Mischphasenwolken ausgedehnt werden können. Zusätzlich wurden die Vorteile einer Lagrangschen Betrachtungsweise das Verständnis wolkenmikrophysikalischer Prozesse und ihre Kopplung an die Strömungsdynamik illustriert. Die hier vorgestellten Konzepte bieten einen generellen Rahmen für die Charakterisierung von Niederschlagssystemen an, der nicht auf die Interaktion mit komplexer Topographie beschränkt ist.