

# Multiscale aspects of cloud-resolving simulations of moist summer convection over complex terrain

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Langhans, Wolfgang

**Publication date:**

2012

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007328970>

**Rights / license:**

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

Diss. ETH No. 20363

# Multiscale aspects of cloud-resolving simulations of moist summer convection over complex terrain

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
WOLFGANG LANGHANS  
Mag. rer. nat., University of Innsbruck  
born November 27, 1983  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Christoph Schär, examiner  
Dr. Jürg Schmidli, co-examiner  
Dr. Evelyne Richard, co-examiner

2012

# Abstract

The diversity of atmospheric scales involved in the initiation of deep convective thunderstorms demands a sophisticated modeling approach. A newly emerging tool are kilometer-scale cloud-resolving models (CRMs) which provide a useful framework to explicitly simulate deep convection. CRMs also resolve complex topographic structures and are thus particularly useful to forecasts of orographic convection. The underlying concept can nevertheless be questioned for several reasons: First, the truncation of the continuous energy cascade at scales of  $\mathcal{O}(1 \text{ km})$  implies a serious challenge, as the up-scale and down-scale fluxes of energy across the spectrum are affected by the representation of turbulence as well as (implicit and explicit) numerical diffusion. Second, resolution constraints and requirements for numerical discretizations of CRMs are not yet well established. Third, the convergence of kilometer-scale simulations, which normally involve decreasing characteristic horizontal scales of simulated convective cells with increasing resolution, has not been established so far, not even in a bulk sense. In this thesis the framework of cloud-resolving modeling is surveyed and conceptual characteristics of the approach are studied with particular reference to the aforementioned questions.

In a first part, the simulated diurnal evolution of thermally-driven flows, of cloud formation, and of convective precipitation is validated against a large set of observations. Good agreement with observations is found for CRMs using grid-spacings of  $\simeq 1$  and  $2 \text{ km}$  and the resolution-sensitivity is found to be small. In contrast, a convection-parameterizing model with a resolution of  $\simeq 7 \text{ km}$  is plagued by a considerable phase shift in the generated diurnal cycle of cloud cover and precipitation.

Numerical aspects of CRMs are addressed in a second part. In combination with an analytical linear model, the influence of explicit numerical diffusion on convective growth and surface precipitation is studied for various formulations of the scale-selective filter. It is found that particularly the numerical diffusion of buoyancy and horizontal momentum on near-surface model levels prevents an amplification of convective instabilities near the grid-scale and thereby reduces precipitation significantly. A further implication is a reduced impact of the convective instabilities on the mesoscale dynamics. These findings underline the demand for adequate (e.g.,

monotonic) numerical discretizations in CRMs.

A third part is devoted to the convergence of CRMs. Numerical convergence of a modeling system with fixed energy-containing scales is distinguished from physical convergence. The latter relates to a system for which Reynolds numbers increase with finer numerical resolution. The results show that numerical convergence is reflected in the bulk properties related to a large ensemble of convective cells. The bulk heating and moistening of a large control volume and the vertical transport of heat and moisture converge systematically toward the highest resolution run ( $\Delta x = 550$  m). Despite some sensitivities related to the turbulence closure, physical convergence is found for bulk heating and moistening rates, as well as for more complex quantities such as surface precipitation. The sensitivity to horizontal resolution is generally small in these simulations, indicating that the large-scale feedbacks of the investigated system are not governed by the eddy-resolving scales.

In summary, results presented in this thesis strongly strengthen the validity of the cloud-resolving approach and encourage its application for numerical weather prediction and climate projection applications. The findings nevertheless demonstrate an overlap of scales of convective instabilities with the grid-scale and thus underline the high demand made on the model formulation and the applied numerical discretizations.

# Zusammenfassung

Die Vielfalt an Grössenordnungen atmosphärischer Bewegungen, welche in die Auslösung von tiefer gewitterartiger Konvektion verwickelt sind, erfordert einen adäquaten Modellieransatz. Ein neuerdings aufkommender Ansatz sind kilometerskalige wolkenauflösende Modelle, welche ein nützliches System für explizite Simulationen tiefer Konvektion darstellen. Diese Modelle sind besonders geeignet für Vorhersagen von orographischer Konvektion, da auch komplexe topographische Strukturen aufgelöst werden. Aus verschiedenen Gründen kann das zugrunde liegende Konzept dennoch in Frage gestellt werden: Erstens, die Unterbrechung der kontinuierlichen Energiekaskade bei räumlichen Grössenordnungen von  $\mathcal{O}(1 \text{ km})$  stellt eine erhebliche Herausforderung dar, da spektrale Energieflüsse zu kleineren und grösseren Skalen von der Darstellung der Turbulenz sowie von (impliziter und expliziter) numerischer Diffusion beeinflusst werden. Zweitens, Einschränkungen aufgrund der Auflösung und Anforderungen an numerische Diskretisierungen von wolkenauflösenden Modellen sind noch nicht zur Genüge bekannt und etabliert. Drittens, der Nachweis der Konvergenz kilometerskaliger Simulationen, für welche eine zunehmende Auflösung gewöhnlich mit einer Abnahme der charakteristischen Breite konvektiver Zellen einhergeht, wurde noch nicht erbracht, noch nicht einmal in Bezug auf integrale Eigenschaften. In dieser Doktorarbeit wird mit Bezug auf die oben erwähnten Fragestellungen das Konzept der wolkenauflösenden Modelle genau geprüft.

In einem ersten Teil wird die tageszeitliche Entwicklung der thermischen Strömungen, der Wolkenbildung, und des konvektiven Niederschlags an Hand von umfangreichen Beobachtungen validiert. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen und wolkenauflösenden Modellen mit einer Maschenweite von  $\simeq 1$  und  $2 \text{ km}$ . Die Sensitivität gegenüber der Maschenweite erweist sich als gering. Im Gegensatz dazu verschlechtert die Verwendung einer Konvektionsparameterisierung bei einer Maschenweite von  $\simeq 7 \text{ km}$  die Abbildung des Tagesgangs der Bewölkung und des Niederschlags beträchtlich.

Numerische Aspekte von wolkenauflösenden Modellen werden in einem zweiten Teil behandelt. Der Einfluss von expliziter numerischer Diffusion auf das konvektive Wachstum und auf den Niederschlag wird unter Einbezug eines analytischen linea-

ren Modells für verschiedene Formulierungen des skalenselektiven Filters studiert. Es zeigt sich, dass insbesondere numerische Diffusion von Temperaturfluktuationen und von horizontalem Impuls, angewandt auf bodennahe Modellflächen, ein Anwachsen konvektiver Instabilitäten nahe der Gitterskala verhindert und dadurch den Niederschlag signifikant verringert. Dies bewirkt zudem einen verringerten Einfluss der konvektiven Instabilitäten auf die mesoskalige Dynamik. Diese Resultate verdeutlichen das Bedürfnis nach geeigneten (z.B. monotonen) numerischen Diskretisierungsverfahren für wolkenauflösende Anwendungen.

Ein dritter Teil widmet sich der Konvergenz von wolkenauflösenden Modellen. Dabei wird numerische Konvergenz eines Modellsystems mit unveränderlichen räumlichen Skalen der energiehaltigen Bewegungen von physikalischer Konvergenz unterschieden. Letztere bezieht sich auf ein System in welchem Reynoldszahlen mit feinerer numerischer Auflösung zunehmen. Die Ergebnisse beweisen die numerische Konvergenz integraler Grössen welche mit einem umfangreichen Ensemble konvektiver Zellen in Zusammenhang stehen. Das integrale Erwärmen und Anfeuchten eines grossen Kontrollvolumens sowie der vertikale Wärme- und Feuchtetransport konvergieren systematisch zur Simulation mit der höchsten Auflösung ( $\Delta x = 550$  m). Trotz mancher Sensitivitäten bezüglich der Turbulenzparameterisierung spiegeln die Ergebnisse auch physikalische Konvergenz in den integralen Heiz- und Feuchtendenzen sowie in komplexeren Grössen wie Niederschlag wider. Die Sensitivität gegenüber der horizontalen Auflösung ist allgemein klein, was darauf hindeutet, dass der Einfluss auf die grossskalige Strömung nicht von den viel kleineren Skalen einzelner konvektiver Turbulenzen bestimmt wird.

Es kann zusammengefasst werden, dass die Resultate dieser Doktorarbeit die Gültigkeit des Konzepts der wolkenauflösenden Modelle stark bekräftigen und zu deren Anwendung in numerischer Wettervorhersage und für Klimaprojektionen ermutigt. Nichtsdestotrotz betont die aufgezeigte Überschneidung der Skalen einzelner konvektiver Instabilitäten mit der Skala der numerischen Maschenweite die hohen Anforderungen an Modellformulierungen und an numerische Diskretisierungsverfahren.