

**The Influence of Subgrid-scale Surface Variations
on the Atmospheric Boundary Layer Flow
A Modelling Study**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
DANIEL EMIL BÜNZLI
Dipl. Phys. ETH
born May 12th 1962
citizen of Volketswil (ZH)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. A. Ohmura, examiner
Dr. H.P. Schmid, co-examiner
Dr. A.C.M. Beljaars (KNMI), co-examiner

Abstract

In atmospheric flow models the horizontal grid-spacing is often much larger than typical length scales of the surface variability. Moreover, the turbulent subgrid-scale surface fluxes contribute non-linearly to the mean aggregated fluxes at the grid-scale, since advection as well as the flow-surface interaction are non-linear processes. Therefore, to specify the lower boundary condition of such flow models correctly, the unresolved subgrid-scale contributions to the aggregated surface fluxes must be parameterised in terms of basic surface descriptors, thus taking into account the geometric nature of the subgrid-scale variability as well as the non-linearity of advection.

In the present study the influence of subgrid-scale surface variations on the grid-averaged surface fluxes of momentum, sensible heat and latent heat is investigated. For this purpose two different flow models are developed, a mixing length model for computing efficiency in extensive studies of roughness inhomogeneities in neutral conditions, and a non-hydrostatic k - ϵ -model for "full-physics" simulations. These models are applied to the flow within one grid-cell of a hypothetical mesoscale model (assuming periodic boundary conditions in flow direction to ensure stationarity), by taking the contribution to the aggregated surface fluxes from individual surface components into account with high spatial resolution. Since the response of the surface fluxes to symmetric surface transitions is *not* symmetric (due to the non-linearity of advection), the grid-averaged fluxes are enhanced depending on the magnitude and relative arrangement of the transitions.

In neutral conditions the surface is parameterised in terms of three basic descriptors, characterising the magnitude and spatial distribution of the roughness transitions. A numerical experiment is performed to determine the systematic dependence of the effective roughness length on these three parameters, and the resulting data are summarised in an empirical fit which reproduces the functional dependence over the whole parameter domain within a few percent. In non-neutral conditions the thermal surface properties are characterised by the surface resistance and the available energy flux, following the well known Penman-Monteith approach. Analogous to the effective roughness length in neutral conditions, the aggregated latent heat flux is evaluated for selected surface configurations, providing systematic dependencies of its advective enhancement on the basic surface descriptors for representative ranges of parameter values. In both cases it is demonstrated that the advective enhancement of the aggregated surface fluxes due to subgrid-scale variability is substantial; typically 10-20% for moderately varying terrain.

Zusammenfassung

Bei der numerischen Modellierung von atmosphärischen Strömungen ist die horizontale Maschenweite des Diskretisationsgitters oft sehr viel grösser als typische Längenskalen der Oberflächenvariabilität. Ausserdem können die lokalen turbulenten Bodenflüsse nicht einfach linear über die Fläche einer Gitterzelle gemittelt werden, da sowohl Advektion als auch Austauschprozesse zwischen Boden und Strömung nichtlineare Vorgänge sind. Um die untere Randbedingung von Strömungsmodellen richtig beschreiben zu können, müssen diese lokalen turbulenten Flüsse zu effektiven Bodenflüssen zusammengefasst werden in Form von Parameterisierungen, welche die geometrische Struktur der Oberflächenvariabilität und die Nichtlinearität von Advektion und Austauschprozessen berücksichtigen.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie sich Oberflächen-Inhomogenitäten mit kleiner horizontaler Längenskala auswirken auf die über die Fläche einer Gitterzelle gemittelten Bodenflüsse von Impuls, sensibler und latenter Wärme. Zu diesem Zweck werden zwei Strömungsmodelle entwickelt, ein sog. Mischungslängenmodell für umfangreiche Studien von Rauigkeitsveränderungen in neutralen Bedingungen und ein nicht-hydrostatisches k - ϵ -Modell, welches ausgewählte Verhältnisse simuliert mit grösserer physikalischer Vollständigkeit. Mit Hilfe dieser Modelle wird die bodennahe Strömung innerhalb einer einzelnen Gitterzelle eines fiktiven grösserskaligen Modells berechnet, d.h. die lokalen Bodenflüsse innerhalb dieser Zelle werden bestimmt mit hoher räumlicher Auflösung. Die Nichtlinearität der Advektion führt zu effektiven Flüssen, welche von den linear ermittelten Werten erheblich abweichen. Die Grösse dieser Abweichungen hängt nicht nur von der Grösse der Oberflächen-Inhomogenitäten ab, sondern auch von ihrer gegenseitigen räumlichen Anordnung.

In neutralen Verhältnissen basiert die Beschreibung der Rauigkeitsübergänge auf drei Oberflächenparametern. Die Abhängigkeit der effektiven Rauigkeitslänge von den entsprechenden Eigenschaften der Oberfläche wird durch systematische Variation der Werte dieser Parameter ermittelt. Die Resultate sind zusammengefasst in einer empirisch bestimmten Funktion, welche die modellierten Daten im gesamten Parameterbereich reproduziert mit einer maximalen Abweichung von wenigen Prozent. In nicht-neutralen Verhältnissen werden die thermischen Eigenschaften des Bodens nach dem bekannten Ansatz von Penman und Monteith parameterisiert, d.h. mit Hilfe des verfügbaren Energieflusses und mit dem Widerstandswert des Bodens gegenüber Durchlass von Feuchtigkeit. Die Bestimmung der Abhängigkeit der effektiven Wärmeflüsse von diesen beiden Oberflächenparametern erfolgt analog zum Vorgehen im neutralen Fall. In beiden Situationen ist der advective Beitrag zu den effektiven Bodenflüssen erheblich, nämlich 10-20% über Oberflächen mit mässiger Variabilität.