

Diss. ETH No. 17714

Challenges in Operational Numerical Weather Prediction at High Resolution in Complex Terrain

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ETH)
Zürich

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
MATTEO BUZZI
Dipl. Umw.-Natw. ETH
born on 22 May 1975
citizen of Porza (TI)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Atsumu Ohmura, examiner
PD Dr. M. W. Rotach, co-examiner
Prof. Dr. C. Schär, co-examiner
Prof. Dr. A. A. Holtslag, co-examiner

2008

Abstract

Numerical Weather Prediction (NWP) in complex terrain is a challenging task. The experience collected with the COSMO model - a limited area NWP non-hydrostatic model operated by MeteoSwiss in the Alpine region - indicates that several meteorological aspects mainly at local scale are still not well reproduced. The present study focuses on some challenging aspects of NWP at high resolution in complex terrain. This work explores the topographic effects on radiation, tests the performance of the turbulence scheme in a semi-idealized set-up using the single column version of COSMO at high vertical resolution, evaluates its ability to reproduce a realistic diurnal cycle and analyses the deficiencies of the COSMO 2 m temperature diagnostics in the alpine region.

Radiation is known as the primary forcing of the planetary boundary layer and its balance is significantly influenced by topography. Local slope aspect (slope orientation) and slope angle (slope inclination) considerably modify the amount and daily course of down-welling short wave radiation. Shading effects in case of horizon angles higher than sun elevation angles generate significant differences in sunrise and sunset times. In addition, reduced skyview has a significant impact as well, causing a complex spatial variability of the downward longwave and downward diffuse radiation components. In order to resolve more of the important details of the complex topography, NWP models are or will be operated in the near future at fine grid resolution close to 1 km. At this grid spacing, topographic effects become important also for weather modelling, because the impact of slope aspect, slope angle or slope inclination, skyview factor as well as shadowing effects significantly modify radiation fluxes at the Earth's surface.

A comprehensive and relatively simple parameterization scheme for topographic effects on radiation taken from the literature has been modified and implemented in the COSMO model. The approach is based on correction factors for surface radiation components. In Chapter 2 the impact of this parameterisation scheme at different horizontal resolutions (7 and 2.2 km) is investigated. The performance is evaluated using topography-adapted satellite data (global radiation) and ground based stations (longwave radiation). The radiation performance with the new radiation correction scheme is significantly improved both for direct solar radiation and for longwave radiation. Secondary benefits can also be observed in the near surface temperature.

A prerequisite for any validation and detailed investigation of model performance is a test of its components under idealised conditions. In Chapter 3 the performance of the COSMO-SC ("single column") turbulence scheme (a TKE scheme with a 1.5 order turbulence closure at the hierarchy level 2.5) is investigated in the framework of the first GABLS intercomparison case (GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study).

The model performs well as compared to the other participating models and to LES (Large Eddy Simulation). The modification of some model parameters combined with the high vertical resolution has permitted to discover and highlight an important stability aspect of the COSMO turbulence scheme. In a shear-driven stable boundary layer, the vertical diffusivities show spurious oscillations. This problematic model deficiency has been explored and possible solutions have been proposed. The unrealistic oscillations are eliminated by introducing a vertical filtering of the vertical wind gradient functions before evaluating the stability functions. The simulations

additionally show that the use of a too large minimum diffusion coefficient leads to the loss of important structures within the planetary boundary layer, such as the low level jet.

In Chapter 4 a small step in direction of more complexity was performed. A real diurnal cycle is simulated with the same one-dimensional modelling system of the previous chapter. The case is that chosen by the second GABLS intercomparison case, which is again a single column model intercomparison project in the framework of GEWEX. This case has been taken from the CASES-99 experiment and covers two full diurnal cycles.

The results highlight some important limitations of one-dimensional modelling (single column approach) in cases with a significant dynamical variability such as geostrophic wind changes in time and space, or horizontal advection. Additionally, the typical morning transition in the wind speed and in the friction velocity are not well captured by the model.

One of the standard verifications for the NWP performance is to compare model results with in-situ observations. For near-surface temperature and relative humidity (or dew point) observational data are usually available at 2 m above surface. Because the first atmospheric level in most of the NWP models such as COSMO is located higher, these variables have to be diagnosed from prognostic variables both at the surface and at the first atmospheric layer using interpolation formulas. Deficiencies in the diagnostics can strongly influence the evaluated quality of a model. Chapter 5 explores the typical problems of the 2 m diagnostics of temperature and dew point in the COSMO model in the Alpine region (complex terrain).

The COSMO diagnostics produces 2 m values which are too close to the surface value, leading, e.g., to an enhanced cold bias in stable conditions and a phase error of the maximum 2 m temperature. This deficiency is caused by the use of an unrealistic effective canopy height, which discriminates between exponential and logarithmic profile. The effective canopy height is determined from the total roughness length, that includes also an orographic part. A new formulation based on the characteristics of the Roughness Sublayer in combination with the introduction of the local roughness length is presented (considering only the surface coverage) and compared to the current diagnostics. The verification on the basis of some case studies indicates a significant improvement in the 2 m temperature and dew point diagnostics.

Zusammenfassung

Die numerische Wettervorhersage in komplexer Topographie ist eine herausfordernde Aufgabe. Die Erfahrungen mit dem COSMO Modell - ein nicht-hydrostatisches Modell für begrenzte Gebiete, das bei MeteoSchweiz für den alpinen Raum betrieben wird, zeigen, dass verschiedene meteorologische Aspekte vor allem auf der lokalen Skala noch nicht gut reproduziert werden. Diese Studie fokussiert auf einige spezielle Aspekte der numerischen Wettervorhersage mit hoher horizontaler Auflösung in komplexem Gelände. In dieser Arbeit werden die topographischen Effekte auf die Strahlung untersucht, die Leistung des Turbulenzschema in einem semi-idealisierten Fall mit der eindimensionalen Version von COSMO mit sehr hohen vertikalen Auflösung getestet und es wird die Fähigkeit des Modells evaluiert, den realen Tagesgang der planetaren Grenzschicht zu reproduzieren. Schliesslich werden die Mängeln der 2 m Temperaturdiagnose in der alpinen Region analysiert.

Die Strahlung ist als der wichtigste Antrieb der planetaren Grenzschicht bekannt und ihre Bilanz wird stark von der Topographie beeinflusst. Hangorientierung und Hangneigung modifizieren die Menge und den Tagesgang der kurzwelligen Strahlung sehr stark. Abschattungseffekte im Fall vom höheren Horizontwinkel als die Elevationswinkel der Sonne generieren bedeutsame Zeitdifferenzen in dem Sonnenaufgang und -untergang. Ausserdem hat eine reduzierte Sichtbarkeit des Himmels (skyview) auch einen bedeutsamen Einfluss, weil sie eine komplexe Variabilität der langwelligen und diffusen Strahlung nach unten verursacht. Um mehr Details der komplexen Topographie zu beschreiben, sind oder werden numerische Wettermodelle mit einer horizontalen Auflösung nahe 1 km betrieben. Bei dieser Gitterauflösung sind topographische Effekte wichtig, weil der Einfluss von Hangneigung, Hangexposition, Skyviewfaktor und Abschattung die Strahlungsflüsse an der Oberfläche deutlich modifizieren.

In dieser Arbeit wurde eine einfache und übersichtliche Parameterisierung aus der Literatur modifiziert und in COSMO implementiert, um topographische Effekte auf die Strahlung zu untersuchen. Die Methode basiert auf Korrekturfaktoren für die Strahlungskomponenten an der Oberfläche. Im Kapitel 2 werden die Auswirkungen dieser Parametrisierung bei verschiedenen horizontalen Auflösungen untersucht. Als Vergleich dienten topographieadaptierte Satellitendaten (Globalstrahlung) und Bodenstationen (langwellige Strahlung). Die Qualität der Strahlungsvorhersage ist mit dem neuen Korrekturschema sowohl für kurzwellige als auch für langwellige Strahlung deutlich verbessert worden. Die positiven Effekte können auch in der oberflächennahen Temperatur beobachtet werden.

Eine Vorbedingung für jede Validierung und Untersuchung der Qualität eines numerischen Wettermodells ist das Testen seiner Komponenten unter idealisierten Bedingungen. Im Kapitel 3 wird das COSMO-SC ("single column") Turbulenzschema (ein TKE Schema mit einer Schliessung der Ordnung 1.5 bzw. des Hierarchieniveaus 2.5) im Rahmen der ersten GABLS Vergleichsstudie (GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study) untersucht. Das Modell erreicht eine gute Leistung im Vergleich mit den anderen teilnehmenden Modellen und LES (Large Eddy Simulation). Die Modifikation von einigen Modellparametern, kombiniert mit einer hohen vertikalen Auflösung, hat zur Entdeckung eines wichtigen Stabilitätsaspekts des Turbulenzschemas geführt. In einer von der

Windscherung bestimmten Grenzschicht zeigen die vertikalen Diffusionskoeffizienten unerwartete Oszillationen. Dieser problematische Modellmangel wurde untersucht und verschiedene Lösungen vorgeschlagen. Die unrealistischen Oszillationen konnten durch das Filtern der Windgradienten vor der Evaluation der Stabilitätsfunktionen eliminiert werden. Ausserdem zeigen die Simulationen, dass die Wahl von einem zu hohen minimalen Diffusionskoeffizient zu einem Verlust von wichtigen Grenzschichtstrukturen, wie z.B. dem "low level jet", führen kann.

Im Kapitel 4 wurde ein kleiner Schritt in Richtung grössere Komplexität gemacht. Mit dem gleichen idealisierten ein-dimensionalen Modellsystem des vorhergehenden Kapitels wurde ein realer Tagesgang simuliert. Derjenige Fall ist der, welcher bei der zweiten GABLS Vergleichstudie im Rahmen von GEWEX ausgewählt wurde und stammt vom CASES-99 Experiment (zwei volle Tagesgänge).

Die Ergebnisse zeigen einige wichtige Limitierungen der eindimensionalen Modellierung in Fällen mit signifikanter dynamischer Variabilität in Form von räumlichen und zeitlichen Änderungen des geostrophischen Windes. Zusätzlich wurde eine mangelhafte Reproduktion des morgigen Überganges in Termen von Windgeschwindigkeit und Reibungsgeschwindigkeit festgestellt.

Die Verifikation von numerischen Wettervorhersagemodellen erfolgt üblicherweise anhand von Vergleichen der Modellresultaten mit lokalen Beobachtungen. Für oberflächennahen Grössen sind Beobachtungen meist auf 2 m verfügbar. Weil die erste atmosphärische Schicht in den meisten Wettervorhersagemodellen wie COSMO höher als 2 m positioniert ist, müssen diese Variablen aus anderen prognostischen Variablen an der Oberfläche und von der ersten atmosphärischen Schicht mit Hilfe von Interpolationsformeln diagnostiziert werden. Fehler in der Diagnose können die Qualitätsevaluation eines Modelles stark beeinflussen. Kapitel 5 untersucht die typischen Probleme der 2 m Temperatur- und Taupunkt Diagnose im COSMO Modell in der alpinen Region.

Die COSMO-Diagnose produziert Werte, die zu nahe an den Oberflächenwerten liegen, was z.B. zu einer verstärkten negativen Temperaturabweichung im Winter und einen Phasenfehler der Maximumtemperatur führt. Diese mangelhafte Leistung ergibt sich aus einer unrealistischen Bestand-Höhe, welche die Wahl zwischen exponentiellem und logarithmischem Interpolationsprofil bestimmt. Die effektive Bestandeshöhe wird in COSMO indirekt anhand der Rauigkeitslänge berechnet, welche wiederum aus einer lokalen plus einer orographischen Komponente zusammengesetzt ist. Ein neuer Ansatz, der auf der physikalischen Charakteristika des "Roughness Sublayer" basiert, und zusätzlich die lokale von der orographischen Rauigkeit trennt, wird vorgestellt und mit der aktuellen operationellen Diagnose verglichen. Die Verifikation anhand von einigen Fallstudien zeigt eine signifikante Verbesserung der 2 m Temperatur und 2 m Taupunkt mit dem neuen Verfahren.