



Doctoral Thesis

Continental-Scale Convection-Resolving Climate Simulations on Heterogeneous Supercomputers

Author(s):

Leutwyler, David

Publication Date:

2016

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010877641> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 23825

Continental-Scale Convection-Resolving Climate Simulations on Heterogeneous Supercomputers

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

presented by

David Leutwyler

MSc ETH, ETH Zurich

born May 31, 1986

citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Christoph Schär, examiner
Dr. Oliver Fuhrer, co-examiner
Dr. Daniel Lüthi, co-examiner
Prof. Dr. Bjorn Stevens, co-examiner

2016

Abstract

With global climate change, the hydrological cycle of Planet Earth will likely undergo dramatic changes. The increase in atmospheric water vapor - due to global warming - is expected to lead to globally increasing precipitation amounts and, as basic physical principles suggest, to increases in precipitation extremes with potentially serious implications. Understanding and describing the involved processes, estimating potential future changes, and assessing the underlying uncertainties has proven to be difficult and complex. In this effort, numerical models are useful tools. However, in state-of-the-art climate models, the representation of clouds and moist convection remains a major challenge - in particular the representation of the scale interactions between large-scale synoptic weather systems at scales of many 1000 km, and small-scale turbulent and convective processes, acting at scales around and below 1 km. For instance, difficulties arise from representing the scales between $O(10\text{ km})$ and $O(100\text{ km})$ where individual convective cells organize into meso-scale weather systems. Currently global and regional climate models typically operate at grid spacings on the order of 10-300 km, and thus many of these processes and their interactions are not explicitly represented.

Refining the grid spacing to the kilometer-scale allows explicitly resolving deep convection. However, performing multi-year simulations at this "convection-resolving" resolution is computationally still extremely demanding, and thus climate simulations at kilometer-scale resolutions have so far largely been limited to sub-continental computational domains, and/or to very small integration periods. In recent years, developments in the supercomputing domain have lead to compute node designs that mix multi-core CPUs and accelerators, such as graphics processing units (GPUs). These new supercomputer architectures possess properties beneficial for weather and climate models. However to fully make use of these innovations, the model codes have to be adapted and in some cases largely be rewritten. In this study a new version of the COSMO weather and climate model (Consortium for Small-Scale Modeling) is used, which is capable of using GPU accelerators. This thesis has contributed to the development of this model, has established its climate version, is validating its results, and is assessing its computational performance. Altogether the thesis is demonstrating the high potential of these new hardware platforms and codes for climate simulations.

In chapter 2, a set of week to season-long simulations are conducted, using the new COSMO version. They include intermediate-resolution simulations, with a grid spacing of 12 km, on a mesh with $355 \times 355 \times 60$ grid points, and nested convection-resolving simulations with a grid spacing of 2.2 km, employing $1536 \times 1536 \times 60$ grid points. A case study, including winter storm Kyrill, shows that a convection-resolving simulation displays a high level of agreement with a corresponding intermediate-resolution simulation, which employs a parameterization scheme for deep convection. However, the agreement is limited to the synoptic and meso-alpha-scale development. Substantial differences are found in the representation of meso-scale atmospheric circulations and for their interactions with the synoptic-scale flow. In particular it displays narrow cold frontal rainbands embedded into the cold front of the Kyrill storm, and a more realistic representation of small-scale vortices over the ocean. A three-month long

climate simulation of the summer 2006 further corroborates the applicability of the approach for the summer season. The conclusions confirm previous results found on smaller computational domains, such as a more credible representation of the diurnal cycle of precipitation and a tendency to produce more intensive hourly precipitation events. Also in summer, complex meso-scale circulations, such as propagating cold pools in complex terrain, can be found. Finally a set of performance benchmarks with the new COSMO version is presented. A speedup of a factor 3.6 is found, considering the execution on the same number of multi-core CPUs. Achieving a similar time to solution on multi-core hardware would entail increasing the number of CPUs by a factor 5. These performance benchmarks show that the new version allows expanding the size of the computational domains by an order of magnitude and hence to explore convection-resolving simulations on computational domains spanning continents.

In chapter 3, the same set-up is used to assess the performance of a 10-year-long continental-scale convection-resolving climate simulation. The simulation covers the period 1999-2008 and is driven by an intermediate-resolution simulation with parameterized convection, which in turn is driven by ERA-Interim reanalysis. The explicit representation of deep convection is illustrated with an analysis of the statistical distribution of up- and downdrafts. In seasons with frequent deep convection, the distribution displays a pronounced asymmetry between updrafts and downdrafts and a strong increase of their amplitude. Furthermore, the geographical distribution of the annual cycle of deep convection aligns well with those of a lightning data set. Validation of the simulation, using a wide range of observational precipitation data sets, shows substantial added value for the 2.2 km simulation in terms of the diurnal cycles of precipitation, considering amount, wet-hour frequency, and the all-hour 99th percentile. However, it also reveals substantial differences between regions with and without strong orographic forcing.

In summary the results of this thesis demonstrate, that by exploiting the capabilities of new supercomputer architectures, including GPUs, continental-scale convection-resolving climate simulations become feasible for climate research applications. The simulations illustrate substantial improvements in the representation of deep convection and precipitation, as the result of using a model formulation much closer to physical first principles.

Zusammenfassung

Der globale Klimawandel wird den hydrologischen Kreislauf des Planeten Erde dramatisch verändern. In Folge der Erwärmung, wird der atmosphärische Wasserdampf zunehmen was zu einem Anstieg der Niederschläge auf globaler Skala führt. Basierend auf physikalischen Prinzipien ist davon auszugehen, dass sich auch die Extreme verstärken werden, was potentiell erhebliche Auswirkungen nach sich zieht. Die involvierten Prozesse sind komplex und es stellt für die Wissenschaft eine Herausforderung dar, sie genau zu verstehen und zu beschreiben. Genauso schwierig ist es, die zugrundeliegenden Unsicherheiten zu quantifizieren und potentielle zukünftige Veränderungen abzuschätzen. Für diese Fragen sind numerische Modelle nützliche Werkzeuge. In den besten Klimamodellen ist die Darstellung von Wolken und feuchter Konvektion jedoch immer noch eine Herausforderung. Speziell gilt dies für das Zusammenspiel zwischen grossskaligen, synoptischen Wettersystemen, die sich auf Skalen von tausenden Kilometern abspielen, und kleinskaligen, turbulenten und konvektiven Prozessen, die auf der Kilometerskala und darunter wirken. So gibt es zum Beispiel Schwierigkeiten, die Skalen zwischen 10 und 100 km darzustellen. Diese sind entscheidend, da sich dort individuelle konvektive Zellen zu mesoskaligen Wettersystemen organisieren. Die heutigen globalen und regionalen Klimamodelle verwenden Rechengitter-Maschenweiten zwischen 10 und 300 km und können deshalb diese Prozesse und Interaktionen nicht explizit darstellen.

Das Verfeinern der Maschenweite erlaubt es tiefreichende Konvektion explizit aufzulösen. Jedoch ist das Erstellen mehrjähriger Simulationen mit "konvektionsauflösender" Maschenweite auch mit den heutigen Superrechnern immer noch anspruchsvoll. Kilometerskalige Simulationen waren daher bisher meistens auf subkontinentale Rechengebiete oder sehr kurze Perioden beschränkt. In den letzten Jahren wurden Rechenknoten für Superrechner (Nodes) entwickelt, auf denen Mehrkernprozessoren (CPUs) und Grafikkarten (GPUs) gemischt werden. Diese neuen Superrechner besitzen Leistungseigenschaften, die sich für Wetter und Klimamodellen eignen. Um diese Innovationen ausnützen zu können, müssen jedoch die Quelltexte der Modelle angepasst und teilweise neu geschrieben werden. In dieser Studie wird eine neue Version des COSMO Wetter- und Klimamodells verwendet, die diese neue Art Superrechner ausnützen kann. Die vorliegende Arbeit hat einige Code-Module zu dieser neuen Version beigetragen. Es wurde aber auch eine Version speziell für Klimaanwendungen entwickelt, Simulationen validiert sowie die Rechenleistung untersucht und eingeordnet.

In Kapitel zwei wird eine Reihe von wochenlangen bis saisonalen Simulationen beschrieben. Diese bestehen aus einer grob aufgelösten Simulation mit einer Maschenweite von 12 km und einem Maschengitter, das $355 \times 355 \times 60$ Gitterpunkte enthält. Darin eingebettet ist eine konvektionsauflösende Simulation mit einer Maschenweite von 2.2 km und $1536 \times 1536 \times 60$ Gitterpunkten. Eine Fallstudie, die unter anderem den Wintersturm Kyrill enthält, zeigt dass die konvektionsauflösende Simulation mit einer grob aufgelösten Simulation, die tiefreichende Konvektion parametrisiert, gut übereinstimmt. Allerdings beschränkt sich die Übereinstimmung auf die Entwicklung der synoptischen und der meso-alpha Skala. In der Darstellung von mesoskaligen Zirkulationen hingegen, finden sich substanzielle Unterschiede.

Insbesondere zeigt die 2.2 km Simulation schmale Regenbänder, die in die Kaltfront des Kyrrill Sturms eingebettet sind, sowie eine realistischere Darstellung eines kleinskaligen Wirbels über dem Ozean. Eine dreimonatige Klimasimulation des Sommers 2006 bestätigt, dass der konvektionsauflösende Ansatz auch für die Sommersaison erfolgreich angewendet werden kann. Die Schlussfolgerungen für diese Jahreszeit bestätigen Resultate von Simulationen, die auf kleineren Gebieten gefunden wurden. Etwa eine glaubhaftere Darstellung des Niederschlags-tagesgangs und eine Tendenz hin zu intensiveren stündlichen Niederschlägen. Zudem können in dieser Saison mesoskalige Zirkulationen, wie propagierende Kallufttropfen (cold pools), gefunden werden. Zum Schluss werden Rechenzeit-Leistungstests der neuen COSMO Version präsentiert. Wird das Modell auf GPUs ausgeführt, läuft es bis zu einem Faktor 3.6 schneller als auf der gleichen Anzahl von Mehrkern-CPU's. Um die gleiche Lösungsdauer (time to solution) auf CPU's zu erreichen, müsste dementsprechend deren Anzahl um den Faktor 5 erhöht werden. Diese Rechenzeit-Leistungstests zeigen, dass mit der neuen COSMO-Version, das Rechengebiet um eine Größenordnung vergrößert und somit konvektionsauflösende Simulationen auf kontinentaler Skala untersucht werden können.

In Kapitel drei wird der gleiche Ansatz benutzt um die Güte einer zehnjährigen, konvektionsauflösenden, kontinentalskaligen Simulation zu beurteilen. Die Simulation deckt die Zeitperiode 1999-2008 ab und wird von einer gröber aufgelösten Simulation angetrieben. Diese wird wiederum von ERA-Interim Re-Analyse angetrieben. Die explizite Repräsentation von tiefreichender Konvektion wird mit einer Analyse der statistischen Verteilung von Auf- und Abwinden illustriert. Auf saisonaler Skala zeigt die räumliche Verteilung eine ausgeprägte Asymmetrie zwischen Auf- und Abwinden sowie eine Verstärkung von deren Amplituden. Des weiteren stimmt die geographische Verteilung des Jahresgangs von tiefreichender Konvektion mit einem Blitzdatensatz gut überein. Die Validation mit Beobachtungsdatensätzen zeigt substanzielle Verbesserungen der 2.2 km Simulation. Insbesondere für den Tagesgang der Niederschlagsmenge, der Niederschlagsfrequenz und des 99ten Perzentils aller stündlichen Niederschlagsmengen. Sie zeigt aber auch substanzielle Unterschiede zwischen Regionen mit und ohne starken orographischen Einfluss.

Zusammenfassend zeigen die Resultate dieser Dissertation, dass der Einsatz neuer Superrechnerarchitekturen genutzt werden kann, um kontinentalskalige, konvektionsauflösende Simulationen für Forschungszwecke verfügbar zu machen. Die Simulationen selber zeigen substanzielle Verbesserungen in der Darstellung von tiefreichender Konvektion und Niederschlag. Dies ist das Resultat einer Modellformulierung, die den physikalischen Grundprinzipien deutlich näher ist.