ETH zürich

ETH Library

Representation of aerosol and cloud microphysics in a regional climate model

Implementation, evaluation and long-term simulations

Doctoral Thesis

Author(s):
Zubler, Elias

Publication date:
2011

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-006500310

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. 19480

Representation of aerosol and cloud microphysics in a regional climate model — Implementation, evaluation and long-term simulations

A dissertation submitted to
ETH ZÜRICH

for the degree of
Dr. sc. ETH Zürich

presented by
ELIAS MARKUS ZUBLER
Dipl. Umwelt-Natw. ETH
born 30. November 1981
citizen of Zofingen - Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. C. Schär, examiner
Prof. Dr. U. Lohmann, co-examiner
Dr. D. Lüthi, co-examiner
Dr. P. Stier, co-examiner

2011

Abstract

It is well-established that aerosol particles influence the radiative balance of the Earth through scattering and absorption of solar radiation (direct and semi-direct aerosol effect). They also alter the microphysical properties of clouds and precipitation and thus affect the hydrologic cycle by acting as cloud condensation and ice nuclei (indirect aerosol effects). Therefore, aerosols interact with the atmosphere at various temporal and spatial scales.

In order to improve our understanding of the enormous complexity of the aerosol distribution as well as their interactions with radiation, clouds and precipitation on the regional to local scale, it is crucial to apply regional climate models with sophisticated aerosol treatment. Therefore, a new regional aerosol-climate modeling framework is presented, evaluated and applied for different scientific problems. The new framework is based on the regional climate model COSMO-CLM. It is equipped with a sulfur cycle scheme, a bulk aerosol microphysics module and a two-moment cloud scheme to predict the number and mass concentrations of sulfate, black carbon, particulate organic matter, sea salt, dust and five hydrometeor classes. The new model accounts for direct, semi-direct and indirect aerosol effects.

An evaluation of aerosol optical properties and cloud parameters shows that the new modeling framework performs reasonably well in comparison with state-of-the-art observational data sets. However, the improved aerosol optical depth (AOD) has important consequences for the model performance regarding near surface temperatures and precipitation. The reduction of AOD between the new framework and the climatology used in the standard version [*Tanré et al.* 1984] of COSMO-CLM leads to an increase in net surface solar radiation of 10–20% in the Mediterranean region, which causes 0.5–0.8° higher 2m-temperatures in the annual mean in an area that is already biased high in the model. A comparison of three more recent aerosol climatologies with the out-dated climatology of *Tanré et al.* [1984] illustrates that the usage of an out-dated aerosol climatology masks biases due to other model deficiencies.

In reanalysis-driven simulations over the period 1958–2001 with transient aerosol emissions, the new model is used to simulate dimming/brightening in Europe. It is found that despite an increase of 10 W m^{-2} in Mid-European clear-sky fluxes during the brightening period that is in line with observations, the increase in all-sky downward solar radiation at

the surface due to changes in aerosol emissions is hardly significant in comparison with the model's internal variability. This is due to an enhanced cloud forcing as a consequence of reduced short-wave absorption and other effects. The modeled trends in all-sky radiation are dominated by the changes in cloud fraction. Observations also suggest that clouds are important for the shaping of dimming/brightening in Europe. Nevertheless, their role is likely somewhat overestimated by the models.

Finally, a semi-idealized 2-dimensional setup with COSMO-CLM is used to estimate the indirect aerosol effect on mixed-phase orographic precipitation in the Alps. 270 simulations with large variability in the initial conditions for temperature, humidity and wind speed enables a statistical approach for the quantification of precipitation suppression or enhancement induced by changing aerosol conditions. The study shows that 50% of the warm rain is suppressed on average between the polluted and the clean cases, whereas frozen precipitation is neither reduced nor enhanced on average, indicating that the stronger the influence of ice-phase processes and thus cloud glaciation, the weaker the precipitation suppression in the polluted cases.

Zusammenfassung

Es ist anerkannt, dass Aerosolpartikel die Strahlungsbilanz der Erde beeinflussen, da sie Solarstrahlung reflektieren und absorbieren (direkter und semi-direkter Aerosoleffekt). Zudem können sie den Wasserkreislauf verändern, weil sie sowohl als Wolkenkondensationskeime wie auch als Eiskeime dienen und damit die mikrophysikalischen Eigenschaften von Wolken und Niederschlag bestimmen (indirekte Aerosoleffekte). Somit interagieren Aerosole auf verschiedenen zeitlichen aber auch räumlichen Skalen mit der Atmosphäre.

Es ist notwendig, Aerosole aufgrund ihrer komplexen Vielfalt und Verbreitung aber auch aufgrund ihrer zahlreichen Wechselwirkungen mit Strahlung, Wolken, und Niederschlag, in regionalen Klimamodellen zu berücksichtigen. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit ein neues regionales Aerosol-Klimamodell vorgestellt, gegen Beobachtungsdaten evaluiert und auf verschiedene wissenschaftliche Fragestellungen hin angewendet. Als Basis dient das oft verwendete Modell COSMO-CLM. Es wurde ausgestattet mit einem numerischen Schema zur Berechnung des Schwefelkreislaufs, einem Aerosolmikrophysik-Modul und einem Zweimomentenschema zur Berechnung der Wolkenmikrophysik und Niederschlagsbildung. Damit lassen sich nun Anzahl- und Massenkonzentrationen von Sulfat, Russ, organischen Kohlenstoffpartikeln, Meersalz und Mineralstaub, sowie fünf Hydrometeorklassen berechnen. Das neue Modell berücksichtigt zudem direkte, semi-direkte und indirekte Aerosoleffekte.

Die Evaluation der optischen Eigenschaften von Aerosolen und Wolken zeigt gute Übereinstimmung zwischen dem neuen Modell und aktuellen Messdatensätzen. Allerdings hat die Verbesserung der optischen Dicke der Aerosole gegenüber der Standardversion basierend auf *Tanré et al.* [1984] Konsequenzen für die Qualität des Modells bezüglich der Simulation von Temperatur und Niederschlag. Die Reduktion der optischen Dicke führt zu einer Zunahme der Solarstrahlung am Boden um 10–20% im Mittelmeerraum, wodurch die 2m-Temperatur in dieser bereits zu warm simulierten Region um weitere 0.5–0.8° zunimmt. Ein Vergleich von drei neuen Aerosolklimatologien mit derjenigen von *Tanré et al.* [1984] zeigt, dass mit der bisher verwendeten Aerosolklimatologie andere bestehende Modellfehler überdeckt wurden.

In reanalysegetriebenen Simulationen über den Zeitraum von 1958 bis 2001 mit zeitlich variablen Aerosolemissionen zeigt das Modell eine Zunahme der Strahlung bei wolken-

freiem Himmel von 10 W m^{-2} in Mitteleuropa, in Übereinstimmung mit Beobachtungen. Diese Aufhellung ist allerdings kaum sichtbar in der Strahlung unter Berücksichtigung sowohl wolkenfreien wie bedeckten Himmels. Die interne Variabilität des Modells ist zu gross, als dass diese Änderung in der Strahlung signifikant wäre. Der Grund für den geringen Effekt von Aerosolen auf die Gesamtstrahlung ist eine Zunahme der Wolkenbedeckung während der Aufhellungsphase, ausgelöst durch die Abnahme der Absorption von kurzwelliger Strahlung und anderen Effekten. Die simulierten Strahlungstrends sind also dominiert durch Veränderungen der Wolkenbedeckung. Auch Messdaten deuten daraufhin, dass Wolken eine wichtige Rolle für die Strahlungstendenzen darstellen, allerdings scheinen die Modelle diese Rolle etwas zu überschätzen.

Schliesslich wurde das Modell in einem semi-idealisierten Aufbau dazu verwendet, den indirekten Aerosoleffekt auf orographischen Niederschlag im Alpenraum zu untersuchen. Hierfür wurden 270 Simulationen mit verschiedenen Anfangsbedingungen der Temperatur, Feuchte und Wind durchgeführt, um in einem statistischen Ansatz die aerosolbedingte Niederschlagsunterdrückung oder -verstärkung zu quantifizieren. Es zeigt sich eine Verminderung des Regens zwischen verschmutzter und sauberer Aerosolkonfiguration von 50% im Mittel. Dem gegenüber findet sich keine Niederschlagsänderung im Mittel bei Graupel und Schnee. Das deutet darauf hin, dass ein gewisser Einfluss der Eisphase in orographischen Wolken zum Gefrieren der Wolken und damit in mehreren Fällen sogar zu einer Niederschlagserhöhung führen kann.