



Doctoral Thesis

Tropospheric transport of water vapour Lagrangian and Eulerian perspectives

Author(s):

Sodemann, Harald

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005215132> →

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. 16623

Tropospheric transport of water vapour: Lagrangian and Eulerian perspectives

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
HARALD SODEMANN
Dipl. Geoökologe (Univ. Bayreuth)
B. Sc. (Hons) (Univ. Cape Town)
born 16 December 1975, Esslingen am Neckar
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. C. Davies, examiner
Prof. Dr. H. Wernli, co-examiner
Dr. C. B. Schwierz, co-examiner
Dr. V. Masson-Delmotte, co-examiner

2006

Abstract

The hydrological cycle is a key element of the global climate system. Although the atmosphere contains only a small amount of the global water, it takes a crucial role in coupling the major reservoirs, namely inland and sea ice, the oceans, lakes, soils, and rivers via moisture transport and precipitation. Human societies depend on reliable water resources, and are adapted to the present-day hydrological cycle, in particular to the precipitation regime. Understanding the processes that govern moisture transport in the troposphere is therefore of fundamental importance in a changing climate. Identifying the evaporative source regions and transport paths of moisture for particular precipitation events holds the promise of inferring governing mechanisms.

The focus of this work is on enhancing the understanding of the atmospheric branch of the hydrological cycle on a global and regional scale. Adopting a Lagrangian and an Eulerian perspective, two new methods are developed for determining the source regions of precipitation. By means of the two methods, precipitation origin and transport are studied for two target areas at different temporal and spatial scales. The utilised data sources comprise ECMWF's analysis and ERA40 reanalysis data.

The Lagrangian method diagnoses the sources and transport paths of water vapour from 3-dimensional kinematic back-trajectories. The method considers the full transport history of an air parcel. By taking precipitation and subsequent uptakes *en route* into account, each sources' contribution to a diagnosed precipitation at the arrival location can be determined. A Lagrangian analysis of the large-scale moisture transport to Greenland, and its variability with the North Atlantic Oscillation (NAO) during selected winter months reveals the North Atlantic as Greenland's sole moisture source. North Atlantic source regions of moisture are found to vary strongly with the NAO. Moisture sources shift from the Denmark Strait and Norwegian Sea during NAO positive months to the south-eastern and western North Atlantic for NAO negative months. This finding is a new aspect of the influence that large-scale climate modes can impose on the hydrological regime in the target area.

Stable water isotopes in precipitation are employed for a tentative validation of the Lagrangian method. For this purpose, data from the ECHAM4 isotope general circulation model (GCM) and seasonal stable isotope data from a central Greenland ice core site are used. A

Rayleigh-type stable isotope fractionation model (MCIM) is applied to predict the isotopic composition of precipitation corresponding to the diagnosed moisture transport conditions, which allows one to compare the model results to observations. Modelled stable isotope ratios show a significant lack of depletion compared to ice core data. This is probably due to the tuning of the MCIM model to different moisture transport conditions. The variability of modelled stable isotope ratios with NAO is however similar to observations from ice-core data for three winter seasons. The variability with the NAO can be qualitatively explained by combined source and transport influences, which indicates the need for a multi-causal interpretation of stable isotope signals in ice cores. The high spatial resolution of the results may be helpful for determining ice-core sites on the Greenland plateau with pronounced NAO variability.

The Eulerian method consists of a water vapour tagging (WVT) implementation into CHRM, a well-verified regional climate model (RCM). Numerical consistency, initialisation and spin-up, and boundary treatment proved to be critical points of the WVT implementation and application. The method is used for determining the sources of precipitation during the Elbe flood (10–13 August 2002), the most severe flood in central Europe in recent decades. A 72 h simulation of the flood period highlighted the importance of the concurrent upper-level circulation for producing extreme precipitation. Identification of the role of the most influential evaporative moisture sources was limited by spin-up effects. However, different evaporative sources did contribute to the extreme precipitation in the most affected area; notably at distinct, subsequent periods of time.

A comparison of the Lagrangian and the Eulerian methods suggests that each approach has different scales and problem settings to which it should preferentially be applied. When problems on the regional scale are considered, or parametrised processes, in particular convection, are important, an Eulerian approach should give the better results. When large-scale transport and processes clearly dominate over parametrised processes, the Lagrangian diagnostic can reveal moisture origins without being limited by a specific RCM domain and spin-up. In this respect, the two methods could be applied jointly, and thereby provide a complementary Lagrangian and Eulerian picture.

With the Lagrangian and Eulerian methods developed in this work, new insight into the characteristics of and the processes related to the atmospheric branch of the hydrological cycle is now attainable.

Zusammenfassung

Der Wasserkreislauf ist ein Schlüsselement des globalen Klimasystems. Obwohl die Atmosphäre nur einen kleinen Anteil des verfügbaren Wassers enthält, ist sie, mittels Feuchtetransport und Niederschlag, von zentraler Bedeutung für den Austausch zwischen den grossen Wasserspeichern Ozean, Inland- und Meereseis, Seen, Böden und Flüssen. Die Menschheit ist abhängig von verlässlichen Wasserressourcen, und hat sich an den gegenwärtigen Wasserkreislauf und insbesondere die Niederschlagsverteilung angepasst. Angesichts eines sich ändernden Klimas ist daher ein Verständnis der regulierenden Prozesse des atmosphärischen Feuchtetransports unerlässlich. Eine Identifizierung der Verdunstungsquellregionen und Feuchtetransportwege für bestimmte Niederschlagsereignisse verspricht, die zugrundeliegenden Mechanismen zu erschliessen.

Diese Arbeit zielt auf ein erweitertes Verständnis des atmosphärischen Wasserkreislaufs auf globalem und regionalem Massstab ab. Dazu werden zwei Methoden zur Bestimmung der Quellregionen von Niederschlag entwickelt, eine aus Lagrange'scher, die andere aus Euler-scher Sichtweise. Niederschlagsherkunft und -transport werden mit Hilfe der beiden Methoden auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen untersucht. Als Datenquellen werden dabei die Analysen und ERA40 Reanalysen des EZMW herangezogen.

Die Lagrange'sche Methode diagnostiziert die Quellen und Transportwege von Wasserdampf aus 3-dimensionalen kinematischen Rückwärtstrajektorien, und berücksichtigt dabei die gesamte Transportgeschichte eines Luftpakets, um die Beiträge einzelner Quellregionen zum Niederschlag am Ankunftspunkt zu bestimmen. Bei der Untersuchung des grossräumigen Feuchtetransports nach Grönland und dessen Schwankungen in Abhängigkeit von der Nordatlantischen Oszillation (NAO) während ausgewählter Wintermonate stellt sich der Nordatlantik als für Grönland alleinig bedeutsame Feuchtequelle heraus. Die nordatlantischen Quellregionen variieren stark mit der NAO; mit dem Wechsel von der positiven zur negativen Phase der NAO verschieben sie sich von der Dänemarkstrasse und dem Norwegischen Meer in den südöstlichen und den westlichen Nordatlantik. Dieses Ergebnis stellt einen neuen Aspekt des Einflusses grossräumiger Klimamodi auf das hydrologische Regime im Untersuchungsgebiet dar.

Stabile Isotope des Wassers im Niederschlag werden für eine erste Validierung der Lagrange'schen Methode eingesetzt. Hierzu werden Simulationsdaten des ECHAM4 Isotopen-Klimamodells und saisonale Isotopendaten aus Eisbohrkernen in Zentral-Grönland verwendet. Die modellierten stabilen Isotopenverhältnisse des Wassers, berechnet mit dem Rayleigh-Fraktionierungsmodell MCIM entsprechend der diagnostizierten Transportbedingungen, ermöglicht einen Vergleich der Ergebnisse der Feuchtetransportdiagnostik mit Messdaten. Im Vergleich mit Eisbohrkernendaten von Zentral-Grönland für drei Winter zeigt sich, dass die Absolutwerte der modellierten stabilen Isotopenverhältnisse deutlich zu wenig abgereichert sind. Dies liegt wahrscheinlich zum Teil im internen Tuning des MCIM-Modells begründet. Die interannuelle Variabilität mit der NAO ist allerdings im Vergleich von Modell und Beobachtungen sehr ähnlich. Die hohe räumliche Auflösung des Grönland-Plateaus in den vorliegenden Ergebnissen kann für die Auswahl von Eisbohrkernen mit ausgeprägten NAO-Signaturen von Nutzen sein. Weiterhin kann die NAO-Variabilität der stabilen Isotopenverhältnisse qualitativ als ein kombinierter Einfluss der Quell- und Transportbedingungen erklärt werden. Dies zeigt die Notwendigkeit auf, diese Einflüsse bei der Interpretation von stabilen Isotopen aus Eisbohrkernen zu berücksichtigen.

Die Eulersche Methode besteht aus einer Implementierung von markiertem Wasserdampf (MWD) in das vielfach validierte regionale Klimamodell (RKM) CHRM. Bei der Implementierung von MWD erwiesen sich numerische Konsistenz, Initialisierung und Vorlaufzeit, sowie die Behandlung der Modellränder als kritische Bereiche. Die Methode wird angewandt, um die Niederschlagsquellregionen der Elbeflut (10.–13. August 2002), einer der schwersten europäischen Flutkatastrophen der letzten Jahrzehnte, zu bestimmen. Eine 72 h-Simulation der Flutperiode mit MWD stellt die Bedeutung der Strömung in der oberen Troposphäre zu dieser Zeit für das Auftreten der Extremniederschläge heraus. Die Identifizierung der einflussreichsten Verdunstungsregionen ist durch Vorlaufzeiteffekte eingeschränkt. Dennoch können die Beiträge unterschiedlicher Quellregionen zu dem Extremniederschlagsereignis während aufeinanderfolgender Zeitperioden nachgewiesen werden.

Ein Vergleich des Lagrange'schen und des Eulerschen Ansatzes lässt folgern, dass beide Methoden bevorzugt auf bestimmten Skalen und für bestimmte Fragestellungen eingesetzt werden sollten. Werden regionale Massstäbe betrachtet oder sind parametrisierte Prozesse, insbesondere Konvektion, von Bedeutung, so wird die Eulersche MWD Methode die besseren Ergebnisse liefern. Dominieren aber grossräumige Prozesse und Ferntransport, so sollte die Lagrange'sche Diagnostik in der Lage sein, Feuchteherkunft ohne Vorlaufeffekte oder Begrenzung auf ein Modellgebiet zu bestimmen. Bei gemeinsamer Anwendung der beiden Methoden könnte sich so ein Gesamtbild aus Lagrange'scher und Eulerscher Perspektive ergeben.

Mit den beiden in dieser Arbeit entwickelten Methoden sind nun neue Einsichten in die Eigenschaften und Prozesse des atmosphärischen Wasserkreislaufs in greifbare Nähe gerückt.