

Diss.ETH ex. B

Diss. ETH No. 11769

# Mesoscale variability and long-term trends of Alpine precipitation and their relation to the synoptic-scale flow

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

for the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by  
MARTIN LUDWIG WIDMANN  
Dipl. Phys. University of Freiburg i. Br.  
born on June 4, 1963  
citizen of Germany



Accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. C. Schär, ETH Zürich, CH, examiner  
Prof. Dr. H. C. Davies, ETH Zürich, CH, co-examiner  
Prof. Dr. H. von Storch, GKSS Research Center, Geesthacht, D, co-examiner

Zürich, 1996

## Abstract

Precipitation is increasingly coming to be recognized as one of the key variables in the event of climate change. Changes in the frequency, intensity and distribution of precipitation have potentially wide-reaching consequences for the frequency of natural disasters and for freshwater management.

The two major overarching questions in this context relate to the detection and prediction of natural or anthropogenic changes in the precipitation climate. This thesis is devoted to issues at the interface between these two questions, and it aims at identifying the precipitation changes that occurred in the Alpine region within this century, and towards developing and testing statistical techniques to estimate such changes from observed or simulated trends in the synoptic-scale atmospheric circulation. Such statistical methods can in principle be applied for the “downscaling” of large-scale information on climate change (as obtained from coupled general circulation models of the climate system) to regional information on the precipitation climate.

Precipitation in mountainous regions is strongly influenced by a variety of processes and interactions between the large-scale atmospheric circulation and the topography. This leads to a high spatial variability of primary precipitation events and long-term means, as well as to complex links between the temporal variability of the synoptic-scale atmospheric circulation and that of precipitation. In this thesis the mesoscale spatial variability of daily Alpine precipitation is analyzed with objective statistical methods. Particular consideration is given to the relation of daily precipitation patterns to the synoptic-scale flow. Furthermore, combinations of various statistical methods are used for a compact formulation of the spatial distribution of long-term precipitation trends and the investigation of their connection with changes in the synoptic-scale atmospheric circulation.

In the first part of this thesis, daily precipitation patterns over Switzerland are investigated by rotated and unrotated principal component analysis for the periods 1901-1990 (with 113 continuously operating rain gauge sites) and 1961-1990 (with 304 sites). The relationship between the leading empirical orthogonal functions (EOFs) and both the Schüepp weather classes and the annual cycle is discussed. Unrotated and rotated EOFs are also calculated for daily precipitation patterns in the whole Alpine region taken from a gridpoint data set with approximately 30 km resolution. This data set is currently developed at the Institute of Atmospheric Physics at ETH Zürich and comprises the period 1978-1991.

In a second part, EOFs are utilized to homogenize the Swiss precipitation series and to optimally transform the 113 series of the long-term record into a few variables. Several statistically significant linear trends are detected. This includes in particular a wintertime increase in precipitation by up to 30% per 100 years in the western

and northern parts of Switzerland. This trend is statistically significant at the 90% level. In most parts of south-eastern Switzerland winter precipitation increased as well but by a smaller rate and at slightly lower statistical significance levels. For the period 1961-1990 precipitation amounts increased in autumn, winter and spring in most subregions of Switzerland.

A statistical model is formulated in order to isolate the contributions to the observed precipitation trends that are related to changes in either the frequency, or the precipitation activity of the Schüepp weather classes. It is demonstrated that the observed precipitation trends cannot be interpreted based upon changing frequencies of weather classes (the observed changes would in fact lead to drier wintertime conditions), but are rather dominated by the tendency of most rain-producing weather types to produce more rain. Some physical mechanisms that could account for this unexpected result are also discussed.

Finally, daily precipitation in the whole Alpine region is related to the synoptic-scale flow by means of a linear relationship. To this end the statistical method "singular value decomposition" (SVD) is employed. It is found that the leading coupled patterns are synoptically interpretable, and that the method has some skill when used for a reconstruction of monthly precipitation means using for instance the daily sea level pressure fields as input information.

Of particular interest with respect to climate change studies is the ability of downscaling methods to capture temporal variability on the decadal time-scale. On this time-scale the performance of SVD is good. It is shown that the Alpine-wide precipitation trend pattern with respect to the winters 1978-1988 can to a good approximation be reproduced using daily sea level pressure and geopotential on the 500 hPa level as input information.

## Zusammenfassung

Niederschlag wird zunehmend als eine der Schlüsselvariablen bei klimatischen Veränderungen erkannt. Änderungen der Häufigkeit, Intensität und Verteilung von Niederschlägen können weitreichende Folgen für die Häufigkeit von Naturkatastrophen und für die Wasserwirtschaft haben.

Die beiden wichtigsten Problembereiche in diesem Zusammenhang sind die Erkennung und die Vorhersage natürlicher oder anthropogener Veränderungen des Niederschlagsklimas. Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit Fragen aus diesen Bereichen. Sie hat zum Ziel, Niederschlagsveränderungen, die in diesem Jahrhundert im Alpenraum aufgetreten sind, zu erkennen und statistische Verfahren zu entwickeln und zu testen, die solche Veränderungen aus beobachteten oder simulierten Veränderungen in der synoptisch-skaligen atmosphärischen Strömung abschätzen. Derartige statistische Methoden können im Prinzip für das "Downscaling" grossräumiger Information über Klimaveränderungen, wie sie von gekoppelten globalen Zirkulationsmodellen des Klimasystems geliefert werden, auf regionale Information über das Niederschlagsklima verwendet werden.

Niederschläge in Gebirgsgebieten werden durch eine Vielzahl von Prozessen und Wechselwirkungen zwischen der grossräumigen atmosphärischen Strömung und der Topographie geprägt. Dies führt zu einer grossen räumlichen Variabilität, sowohl von einzelnen Niederschlagsereignissen als auch von mittleren Niederschlägen über lange Zeiträume sowie zu komplexen Beziehungen zwischen der zeitlichen Variabilität der grossräumigen atmosphärischen Strömung und derjenigen der Niederschläge. In dieser Dissertation wird die mesoskalige räumliche Variabilität täglicher alpiner Niederschläge mit objektiven statistischen Methoden analysiert. Besondere Beachtung wird dabei der Beziehung täglicher Niederschlagsmuster zur synoptischen Situation geschenkt. Ausserdem werden Kombinationen verschiedener statistischer Methoden zur kompakten Formulierung der räumlichen Verteilung von Niederschlagstrends und zur Untersuchung ihrer Beziehung zu Veränderungen der synoptisch-skaligen Strömung verwendet.

Im ersten Teil dieser Dissertation werden tägliche Niederschlagsmuster in der Schweiz mit Hilfe von rotierter und unrotierter Hauptkomponentenanalyse untersucht. Dabei werden die Zeiträume 1901-1990 (mit 113 ununterbrochen arbeitenden Messstationen) und 1961-1990 (mit 304 Stationen) betrachtet. Die Beziehungen zwischen den führenden Empirischen Orthogonalfunktionen (EOFs) und den Schüeppchen Wetterklassen sowie dem Jahreszyklus werden besprochen. Unrotierte und rotierte EOFs werden auch für tägliche Niederschlagsmuster im gesamten Alpenraum berechnet. Diese stammen von einem Gitterpunktdatensatz, welcher derzeit am Institut für Atmosphärenphysik der ETH Zürich entwickelt wird und den Zeitraum 1978-1991 umfasst.

In einem zweiten Teil werden die EOFs verwendet, um Schweizer Niederschlagszeitreihen zu homogenisieren und um die 113 Zeitreihen optimal in einige wenige Variablen zu transformieren. Bei der Analyse dieser Variablen wurden mehrere statistisch signifikante Trends festgestellt. Diese beinhalten insbesondere eine Zunahme der Winterniederschläge um bis zu 30% in 100 Jahren in den westlichen und nördlichen Teilen der Schweiz. Dieser Trend ist auf dem 90% Niveau statistisch signifikant. In den meisten Teilen der Südostschweiz haben die Winterniederschläge ebenfalls zugenommen, allerdings um einen kleineren Betrag und auf etwas niedrigeren statistischen Signifikanzniveaus. Im Zeitraum 1961-1990 nahmen die Niederschläge in den Jahreszeiten Herbst, Winter und Frühjahr in den meisten Teilgebieten der Schweiz zu.

Um diejenigen Beiträge zu den beobachteten Niederschlagstrends zu isolieren, die entweder mit Veränderungen der Häufigkeit oder mit Veränderungen der Niederschlagsaktivität der Schüeppschen Wetterlagen zusammenhängen, wird ein statistisches Modell formuliert. Es wird gezeigt, dass die beobachteten Niederschlagstrends nicht aufgrund veränderter Häufigkeiten der Wetterklassen interpretiert werden können (die beobachteten Veränderungen würden vielmehr zu trockeneren Bedingungen im Winter führen), sondern von der Tendenz der meisten niederschlagsreichen Wetterlagen zu verstärkten Niederschlägen dominiert werden. Einige physikalische Mechanismen, die dieses unerwartete Resultat erklären könnten, werden besprochen.

Zum Schluss werden tägliche Niederschläge im gesamten Alpenraum mit Hilfe einer linearen Beziehung zur synoptisch-skaligen Strömung in Beziehung gesetzt. Hierzu wird die statistische Methode "Singulärwertzerlegung" (singular value decomposition, SVD) verwendet. Es zeigt sich, dass die führenden gekoppelten Muster synoptisch interpretierbar sind und die Methode einen gewissen Erfolg bei der Rekonstruktion von Monatsmitteln des Niederschlages hat, wobei z.B. tägliche Felder des Druckes auf Meereshöhe als Eingangsinformation dienen.

Von besonderem Interesse in Bezug auf Untersuchungen von Klimaveränderungen ist die Fähigkeit von Downscaling-Methoden, die zeitliche Variabilität auf einer ungefähr zehnjährigen Zeitskala zu erfassen. Auf dieser Zeitskala liefert die SVD gute Ergebnisse. Es wird gezeigt, dass unter Verwendung des täglichen Druckes auf Meereshöhe und des Geopotentials auf der 500 hPa Fläche, die Muster des Niederschlagstrends im Alpenraum bezüglich der Winter 1978-1988 in guter Näherung reproduziert werden können.