



Doctoral Thesis

Climate change and runoff statistics in the Rhine basin a process study with a coupled climate-runoff model

Author(s):

Kleinn, Jan

Publication Date:

2002

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004484995> →

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. 14663

Climate Change and Runoff Statistics in the Rhine Basin: A Process Study with a Coupled Climate - Runoff Model

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

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCE

presented by
JAN KLEINN
Dipl. Natw. ETH
born August 1, 1973
German and Austrian citizen

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Christoph Schär, examiner
Dr. Bruno Schädler, co-examiner
Dr. Christoph Frei, co-examiner
Dr. Joachim Gurtz, co-examiner

May 2002

Abstract

The consequences of extreme runoff and extreme water levels are within the most important natural hazards induced by weather. The question about the impact of global climate change on the runoff characteristics, especially on the frequency of floods, is of utmost importance. To assess the influence of a warmer climate upon the hydrologic cycle, the pertinent processes are studied using a regional climate model and a distributed hydrologic model. To this end, a model interface is developed to couple the two models in a one-way mode.

The coupled modelling system consists of two model components: the regional climate model CHRM and the distributed hydrologic model WaSiM. CHRM is driven by ECMWF reanalysis and is run in a nested mode in 56 km and 14 km horizontal grid spacing (CHRM56 and CHRM14). WaSiM is operated at a horizontal grid spacing of 1 km for the Rhine basin down to Cologne, a basin of about 145'000 km². Such a large basin was chosen to have the spatial variability well represented by the regional climate model within the basin. The hydrologic model uses a time step of 1 hour and is driven by the output of CHRM56 and CHRM14 with an appropriate model interface. The model interface accomplishes the scale transition for the driving fields of the hydrologic model: downscaling of precipitation and temperature, bias corrections for precipitation and winterly surface air temperature, and bilinear interpolation of wind, relative humidity, and radiation. Five winters (1989/90 - 1993/94), each from November until January, are considered in the analysis.

The precipitation fields simulated by CHRM14 show good correspondance with observed precipitation fields with regard to the mesoscale distribution of precipitation, the interannual variability, and the frequency distribution of precipitation. Critical points in the CHRM simulations relate to the finescale distribution of precipitation over complex topography (precipitation falls too far upstream), the distribution of precipitation with altitude (precipitation is overestimated at high altitude), and the surface air temperature in the Alps (CHRM shows a winterly negative bias).

Despite the aforementioned limitations, the model chain of CHRM56 and WaSiM is able to reproduce the annual cycle of mean monthly discharge within the Rhine basin. The shift from a nival regime in the Alpine basins to a pluvial regime in the foreland basins and at the lower gauges of the Rhine basin is also reproduced in the simulations with

notable accuracy. Analysis of daily runoff in the simulations driven by CHRM56 and CHRM14 reveals good agreement with observed runoff in the foreland basins and for the lower gauges of the Rhine basin. In the Alpine basins though, runoff simulations are more challenging. Possible reasons for this are the neglecting of soil freezing, anthropogenic activities (hydropower production), and lake retention and regulation in the hydrologic simulations.

Sensitivity experiments of a warmer climate are based on an idealized surrogate climate change scenario which stipulates a uniform increase in temperature by 2 Kelvin and an increase in atmospheric specific humidity by 15% (resulting from unchanged relative humidity) in the forcing fields for the regional climate model. It has to be pointed out that this approach does not provide a full climate change scenario but merely a sensitivity study of two relevant effects, namely repartitioning of solid to liquid precipitation and intensification of the hydrologic cycle. In addition to these sensitivities, climate change would also imply changes in synoptic climatology that are not considered in this study.

The sensitivity experiments of a warmer climate were performed with the whole model chain. The warm CHRM simulations show an increase in precipitation throughout Europe, an increase in the amount of liquid precipitation at the expense of snow, and a strong increase in the frequency of heavy precipitation events. The rainday frequency shows little changes.

A six-year continuous warm runoff simulation driven by CHRM56 shows an increase in winterly and a decrease in summerly discharge. In the Alpine catchments, this leads to a shift in the annual runoff regime. For the downstream gauges, where winterly discharge is already the largest in the observations and in the control simulations, the annual discharge cycle is intensified.

Analysis of daily runoff events in winter reveals an increase in the frequency of low runoff events (less than 2 mm/day) in the Aare basin, whereas the frequency of low runoff events up to about 1 mm/day hardly changes in the foreland basins. The frequency of high runoff events exceeding 3 mm/day and more increases by at least 20% in all of the catchments. At the gauge of Cologne, the frequency of runoff events exceeding 2 mm/day increases by about 20%.

Overall, the coupled climate-runoff modelling has proven to be a promising tool for studying the hydrologic cycle. Simulations of a warmer winter climate show increases in total precipitation, liquid precipitation, intense precipitation events, and intense runoff events.

Zusammenfassung

Die Folgen extremer Abflussmengen und Flusswasserstände gehören in Mitteleuropa zu den bedeutendsten und am häufigsten auftretenden, durch Wetter und Klima bedingten Naturkatastrophen. Die Frage nach den Auswirkungen der globalen Klimaänderung auf das Abflussverhalten und die Häufigkeit extremer Wasserstände ist daher von hohem Interesse. Um den Einfluss eines wärmeren Klimas auf den Wasserkreislauf abzuschätzen, werden die Prozesse des Wasserkreislaufs mit einem regionalen Klimamodell und einem flächendifferenzierten hydrologischen Modell untersucht. Dazu wurde eine Schnittstelle entwickelt, um die beiden Modelle in einem Einweg-Verfahren zu koppeln.

Das gekoppelte Modell-System besteht aus zwei Komponenten: dem regionalen Klimamodell CHRM und dem flächendifferenzierten hydrologischen Modell WaSiM. Das CHRM wird in einem genesteten Modus mit Auflösungen von 56 km und 14 km angewendet (CHRM56 und CHRM14). Der Antrieb erfolgt über die Reanalyse des ECMWF. WaSiM wird mit einer horizontalen Auflösung von 1 km für das gesamte Rheineinzugsgebiet bis Köln - ein Einzugsgebiet von etwa 145'000 km² - betrieben. Die Grösse des Einzugsgebietes wurde derart ausgewählt, dass die räumliche Variabilität innerhalb des Einzugsgebietes von dem regionalen Klimamodell gut wiedergegeben wird. WaSiM benutzt einen Zeitschritt von 1 Stunde und wird von den Ergebnissen von CHRM56 und CHRM14 angetrieben. Die Kopplung der Modelle erfolgt über ein Regionalisierungsmodul, welches die Felder des CHRM (Niederschlag, Temperatur, Wind, relative Feuchte und Strahlung) auf die Auflösung von WaSiM skaliert und für den Niederschlag und die winterliche Temperatur eine Bias-Korrektur durchführt. Die Simulationen umfassen 5 Winter (1989/90 - 1993/94), jeweils von November bis Januar.

Die Niederschlagsfelder des CHRM14 stimmen mit beobachteten Niederschlagsfeldern gut überein, besonders bezüglich der mesoskaligen Niederschlagsverteilung, der interannuellen Variabilität und der Häufigkeitsverteilung. Kritische Punkte bei den Simulationen des CHRM sind die feinskalige Verteilung des Niederschlags über komplexer Topographie (die Niederschlagsfelder sind stromaufwärts verschoben), die Höhenverteilung des Niederschlags (Überschätzung des Niederschlags in grosser Höhe) und die Temperatur in den Alpen (CHRM zeigt einen winterlichen negativen Bias).

Trotz der erwähnten Einschränkungen wird der jährliche Zyklus monatlicher Abflüsse von der Modell-Kette aus CHRM56, CHRM14 und WaSiM gut wiedergegeben. Auch der

Übergang von einem nivalen Abflussregime in den Alpen zu einem pluvialen Abflussregime in den tiefer gelegenen Einzugsgebieten wird in den Simulationen mit bemerkenswerter Genauigkeit wiedergegeben. Auswertungen der täglichen Abflüsse in den von CHRM56 und von CHRM14 angetriebenen Simulationen zeigen gute Übereinstimmung mit den beobachteten Abflüssen für die Einzugsgebiete des Vorlandes. In den alpinen Einzugsgebieten wird die Simulation des Abflusses aus mehreren Gründen erschwert, unter anderem da in der hydrologischen Simulation Seeretention, Bodengefrieren und anthropogene Einflüsse wie z.B. Seeregulierung und Wasserkraftwerke nicht berücksichtigt werden.

Für das Szenario eines wärmeren Klimas werden die Antriebsfelder für das regionale Klimamodell um ein uniformes Temperaturinkrement von 2 Kelvin modifiziert und die relative Feuchte konstant gehalten, womit sich die atmosphärische Feuchte um 15% erhöht. Solch eine Modell-Strategie stellt kein vollständiges Klimaszenario dar, sondern dient lediglich der Untersuchung von relevanten und nichtlinearen Effekten im Wasserkreislauf. Zusätzlich sind bei einer Klimaänderung auch Änderungen in der synoptischen Klimatologie zu erwarten, die in dieser Studie nicht berücksichtigt werden.

Die Simulationen eines wärmeren Klimas wurden mit der ganzen Modell-Kette durchgeführt. Die warmen CHRM-Simulationen zeigen eine Zunahme des mittleren Niederschlags, eine Zunahme des flüssigen Niederschlags bei Reduktion des Schneeanteils und eine Zunahme von Starkniederschlagsereignissen. Die Anzahl der Niederschlagstage ändert sich nur geringfügig.

Die 6-jährige, von CHRM56 angetriebene Abflusssimulation zeigt eine Zunahme der winterlichen Abflüsse und eine Abnahme der sommerlichen Abflüsse. In den alpinen Einzugsgebieten führt dies zu einer Verschiebung des jährlichen Abflussregimes. An den unteren Pegeln des Rheins dagegen, wo in der Kontrollsimulation die winterlichen Abflüsse schon die stärksten sind, verstärkt sich die Amplitude des Abflussregimes.

Die Auswertung der täglichen simulierten Abflüsse zeigt im Einzugsgebiet der Aare eine Zunahme von kleinen Abflussereignissen (weniger als 2 mm/Tag). In den anderen Einzugsgebieten sind kaum Änderungen in niedrigen Abflüssen von bis zu 1 mm/Tag festzustellen. Die Häufigkeit starker Abflussereignisse von mehr als 3 mm/Tag nimmt in allen Einzugsgebieten um mindestens 20% zu. Für das untersuchte Gesamteinzugsgebiet bis zum Pegel Köln beträgt die Zunahme in der Häufigkeit von Abflussereignissen von mehr als 2 mm/Tag etwa 20%.

Insgesamt ist die gekoppelte Klima-Abfluss-Modellierung ein vielversprechendes Instrument, um den Wasserkreislauf zu studieren. Winter-Simulationen eines wärmeren Klimas zeigen eine Zunahme des mittleren Niederschlags, des flüssigen Niederschlags, der Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen und von starken Abflussereignissen.