

Diss. ETH No. 17817

Towards operational probabilistic runoff forecasts

Assessment of uncertainties within a coupled hydrometeorological modelling system

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
SIMON JAUN
Dipl. Natw. ETH
born 10. April 1976
citizen of Meiringen - Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. C. Schär, examiner
Prof. Dr. R. Weingartner, co-examiner
Prof. Dr. B. Ahrens, co-examiner
Doz. Dr. J. Gurtz, co-examiner

2008

Zusammenfassung

Die Schweiz und ihre Nachbarstaaten waren in den vergangenen Jahren mehrmals von Starkniederschlagsereignissen und den darauf folgenden Hochwassern betroffen, die zu grossen materiellen Schäden führten und teilweise Todesopfer forderten. Die Erfahrung zeigt, dass zutreffende Warnungen mit genügend Vorlaufzeit die Folgen von Überschwemmungen beträchtlich reduzieren können.

Die beschränkte Laufzeit des Wassers in kleinen bis mittleren hydrologischen Einzugsgebieten im alpinen und voralpinen Raum erlaubt keine längeren Vorhersagezeiträume für Abflussvorhersagen, die primär auf meteorologischen Beobachtungen beruhen. Dies ermöglicht erst die Nutzung von Wettervorhersagemodellen, die mit der hydrologischen Anwendung gekoppelt sind. Nichtsdestotrotz werden meteorologische Beobachtungen für die Initialisierung der hydrologischen Vorhersagen benötigt.

Hydrologische Modelle zeigen eine hohe Sensitivität bezüglich Fehlern in atmosphärischen Antriebsdaten, unabhängig davon, ob diese von Beobachtungen oder von Vorhersagen stammen. Dies gilt im Speziellen für die Niederschlagsdaten. Die vorliegende Dissertation hat die Untersuchung von Unsicherheiten innerhalb eines gekoppelten hydro-meteorologischen Modellsystems zum Ziel. Zu diesem Zweck wurde die folgende Modellkette implementiert: Das operationelle atmosphärische Ensemblevorhersagesystem (EPS) des ECMWF erzeugt die meteorologischen Ensembles auf der globalen Skala, die vom regionalen atmosphärischen EPS (COSMO-LEPS) dynamisch auf eine höhere Auflösung skaliert werden. Die resultierenden hochaufgelösten meteorologischen Ensembles dienen schliesslich als Antrieb für das hydrologische Modell PREVAH. Das hauptsächlich betrachtete Einzugsgebiet des Rheins ($34'550 \text{ km}^2$) erstreckt sich bis zum Pegel Rheinfelden und ist in 23 Teileinzugsgebiete unterteilt. Die hydrologischen Simulationen werden auf einem 500 m Gitter mit stündlichen Zeitschritten durchgeführt.

Um korrekte Anfangsbedingungen für die nachfolgenden Vorhersagen zu erreichen, werden hydrologische Modelle in einem Assimilationsmodus betrieben, der auf beobachtetem meteorologischem Input beruht. Beobachtete Niederschlagsdaten werden üblicherweise als fehlerlos betrachtet. Dies gilt für die Anwendung in hydrologischen Modellen wie auch für die Verwendung als Referenz bei der Evaluierung von Niederschlagsvorhersagen. Doch abgesehen von direkten Messfehlern kommt, in Abhängigkeit der Dichte der verfügbaren Messstationen, zusätzlich die Interpolationsunsicherheit zum Tragen. Mit Hilfe einer stochastischen Simulation kann ein Beobachtungsensemble der interpolierten Niederschlagsdaten erzeugt werden, das die Abschätzung der Interpolationsunsicherheit erlaubt. Die Resultate der Evaluierungsstudie zeigen, dass die Interpolationsunsicherheit selbst auf der Skala der Schweiz nicht vernachlässigt werden sollte, und dass sie sich auch auf die nachfolgenden hydrologischen Simulationen auswirkt.

Die Nutzung quantitativer Niederschlagsvorhersagen bringt grosse Unsicherheiten mit sich. Wird eine solche Vorhersage im hydrologischen Bereich verwendet, kann diese zusätzlich eingebrachte Unsicherheit mit einer deterministischen Vorhersage nicht bestimmt werden. Eine Möglichkeit, diese Unsicherheit zu berücksichtigen, bietet eine probabilistische Vorhersage unter Verwendung eines meteorologischen Ensemblevorhersagesystems.

Ein solches System wurde im Rahmen einer Fallstudie über das Hochwasserereignis vom August 2005 betrachtet. Für weitere Untersuchungen standen zudem meteorologische Ensemblevorhersagen für zwei Jahre (2005 und 2006) zur Verfügung. Diese wurden für tägliche hydrologische Nachhersagen genutzt.

Die auf den hochauflösenden meteorologischen Ensemblevorhersagen basierende hydrologische Anwendung zeigt Vorteile und Anwendbarkeit der zusätzlichen Unsicherheitsinformation im Vergleich mit einer deterministischen Vorhersage auf. Die Auswertungen ergeben dabei höhere Gütemasse für das probabilistische System. Der gewählte Ansatz zeigte sich zudem unter verschiedensten Wetterbedingungen robust und ist über eine längere Zeitperiode anwendbar. Dabei wird die durch die quantitative Niederschlagsvorhersage eingebrachte Unsicherheit gut abgebildet.

Durch die Untersuchung der Unsicherheitskomponenten innerhalb eines hydrometeorologischen Systems versucht diese Dissertation Möglichkeiten, Vorteile und Schwächen gekoppelter hydrometeorologischer Ensemblevorhersagesysteme mit Hinblick auf eine Operationalisierung zu zeigen. Im Rahmen der MAP D-PHASE war es möglich, solche Modellsysteme in einer (experimentellen) operationellen Konfiguration erstmals zu erproben. Auf Grund der mehrheitlich positiven Erfahrungen werden aktuell weitere operationelle Anwendungen implementiert.

Abstract

Recent flood events in the Switzerland and neighbouring countries led to tremendous damages and loss of life. To mitigate the severe consequences of such events, longer lead times in hydrological forecasting are required to allow for appropriate precautions.

The size of typical Alpine and Pre-Alpine catchments does not allow for medium-range runoff forecasts primarily based on precipitation observations, due to short catchment response times. Rather, to achieve the required lead times, hydrological models must be driven by meteorological numerical weather prediction systems. Meteorological observations remain important, however, to assign the initial conditions of the hydrological model prior to forecast initialization.

It is well known that hydrological models show a high sensitivity to errors in the atmospheric forcing (especially precipitation), whether stemming from observations or forecasts. The present PhD therefore aims at the investigation of uncertainties within a coupled hydrometeorological modelling system. To account for the uncertainty in driving precipitation, a one-way coupled hydrometeorological modeling system is set up and tested. The system comprises an operational global atmospheric ensemble prediction system (EPS) provided by the ECMWF, dynamical downscaling with a limited-area atmospheric EPS (COSMO-LEPS), and a semi-distributed hydrological model (PREVAH). The main study area covers the upper Rhine catchment till Rheinfelden and is further divided into 23 subcatchments, covering a total of 34'550 km². The hydrological model runs at a spatial resolution of 500 meters and with hourly time steps.

The initial conditions of the hydrological model are obtained by driving it in an assimilation mode and thereby acquiring surface precipitation observations. Observed precipitation data (also commonly used for verification purposes) is commonly assumed to be without errors. However, apart from measurement errors, the spatial interpolation of precipitation point data is highly uncertain and strongly depends upon the density of stations. To account for this uncertainty, observational precipitation ensembles from interpolated rain gauge data are created by stochastic simulation. The evaluation experiments show that the interpolation uncertainties are substantial, even on the scale of Switzerland, and they also affect subsequent hydrological forecasts.

Quantitative precipitation forecasts (QPF) are deemed even more uncertain. The use of QPF within a hydrometeorological model system therefore implies an increased uncertainty, which cannot be accounted for by deterministic simulations. A promising avenue towards addressing this issue is the use of probabilistic hydrological forecasts driven by meteorological EPSs.

To test such a system, hydrological hindcasts were conducted for a case study as well as for an extended time period. The case study addresses the extreme Alpine flood in August 2005, which is one of the worst floods ever experienced in this region. The longer

study encompasses two full years (2005 and 2006) during which daily meteorological ensemble forecasts were available for hydrological application.

The hydrological forecast based on the high-resolution meteorological EPS was found to complement the deterministic forecast, providing valuable information about the uncertainty of the weather situation and its hydrological consequences for decision making. Objective validation against observed runoff shows that the probabilistic system yields higher scores than its deterministic counterpart. The chosen ensemble approach works for a wide band of weather conditions and the ensemble spread nicely represents the additional uncertainties introduced by poorly predictable weather situations.

By analyzing the uncertainty component within a hydrometeorological system this PhD tried to explore potential benefits and weaknesses of coupled hydrometeorological ensemble prediction systems with the objective to advance these systems towards operational implementation. In addition to the studies referred to above, first (experimental) operational applications took place during the MAP D-PHASE. On the basis of the largely positive experience, further operational applications are currently being implemented.