



## Doctoral Thesis

# From small-scale modelling of alpine catchments towards probabilistic flood forecasting in the Rhine basin

**Author(s):**

Verbunt, Mark

**Publication Date:**

2005

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005068366> →

**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. 16115

**From small-scale modelling of  
alpine catchments towards  
probabilistic flood forecasting in  
the Rhine basin**

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

for the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCE

presented by  
MARK VERBUNT  
Dipl. Ing. Wageningen University  
born 16 March 1978  
citizen of The Netherlands

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. C. Schär (ETH Zurich), examiner  
Prof. Dr. A. Bronstert (Potsdam University), co-examiner  
Doz. Dr. J. Gurtz (ETH Zurich), co-examiner

2005

# Abstract

Recent floods in Central Europe caused damages in the order of several billions of Euros and numerous casualties. To mitigate the destructive consequences of severe flooding, society requires reliable forecasts of these events with a sufficient lead time. Hence, this study uses a coupled atmospheric-hydrologic forecasting system and explores the feasibility of exploiting recent advances in numerical weather prediction (e.g. Limited-area Ensemble Prediction System) for probabilistic flood forecasting.

Because runoff formation in mountainous regions is mainly dominated by snow and glacier melt, chapter 2 presents a detailed analysis of melt processes in alpine catchments. The spatially distributed WaSiM-ETH model is applied to three Swiss high-alpine river catchments with different portions of glacierized areas for the period 1981-2000 with a spatial resolution of  $100 \times 100 \text{ m}^2$  and an hourly time-step. To improve the calculation of glacier runoff, a seasonal varying radiation factor has been implemented in the glacier melt equation. Results show a strong dependency of the melt processes on season, altitude and exposition. Annual snow melt amount shows a maximum at around 2900 m a.s.l. in all investigated catchments.

Besides natural processes, anthropogenic water storages and releases by hydropower stations can also have a considerable impact on the discharges and water cycle. In chapter 3, these mechanisms have therefore been incorporated into hydrologic modelling of the Swiss Alpine Rhine basin ( $4838 \text{ km}^2$ ). The hydrologic model was not able to simulate the diurnal and weekly cycle in the release mechanisms. By reconstructing hourly storage and release volumes from reservoir level data, a clear increase in the model performance was reached, especially during the release periods and smaller floods. Additionally, an analysis of possible consequences of land-use changes is performed, showing that, although urbanization may have an impact on local hydrologic processes, its effect appears negligible in larger catchments.

After the analyses of small-scale hydrologic processes, the next goal was the setup of an off-line coupled atmospheric-hydrologic modelling system (chapter 4) for runoff forecasting in the Rhine basin down to the gauge Rheinfelden ( $34550 \text{ km}^2$ ). Due to the complex topography, the highly variable meteorology and the presence of lakes, it was necessary to divide the basin into several subcatchments. The conceptual PREVAH model was applied with a spatial resolution of  $500 \times 500 \text{ m}^2$ . The calibration of the catchments was done with the help of a semi-automatic parameter calibration program. The model correctly reproduces the relevant hy-

drologic processes and properly captures the extreme runoff peaks. To validate the numerical weather prediction (NWP) model (Lokal Modell, LM), 6 years of 19-42 h precipitation and 2m temperature forecasts are used as input in the hydrologic model. Consequences for runoff forecasts, arising out of errors in precipitation forecasts, are most pronounced for events with high precipitation intensities, while the coupled modelling system in most cases properly predicts smaller flood events.

Because of the hydrologic model sensitivity to atmospheric forcing, it would be desirable to quantify forecast uncertainties. A high-resolution atmospheric ensemble forecasting system based on 51 runs of the LM, which runs in a horizontal resolution of 10 km, has therefore been used to make probabilistic runoff forecasts for the Rhine basin down to Rheinfelden (chapter 5). The 5-day forecasts of the LM are used to drive the PREVAH model for two flood events. The case studies investigated are the spring 1999 flood event in the Rhine basin and the November 2002 flood in the Alpine Rhine catchment. The Limited-area Ensemble Prediction System (LEPS) allows to quantify hydrologic forecast uncertainties. Although the deterministic simulations yield large forecast failures, the coupled atmospheric-hydrologic LEPS provides appropriate forecast guidance with proper uncertainty intervals. The use of the clustering technique did not reduce ensemble spread compared to the 51 predictions. Furthermore, it was shown that the inclusion of horizontal advection of precipitation may be crucial for flood forecasts in alpine catchments.

# Zusammenfassung

Hochwasser in Zentraleuropa haben in den letzten Jahren Schäden in Höhe von mehreren Milliarden Euro und zahlreiche Opfer verursacht. Um die schädlichen Folgen solcher Hochwasser soweit wie möglich zu reduzieren, verlangt die Gesellschaft verlässliche Vorhersagen zu einem möglichst frühen Zeitpunkt. Um diesem Bedürfnis in Zukunft besser gerecht zu werden, wird in dieser Studie ein gekoppeltes atmosphärisches-hydrologisches Vorhersagesystem angewendet und untersucht, wie neue Entwicklungen in der numerischen Wettervorhersage (z.B. Ensemble-Vorhersage) für probabilistische Hochwasservorhersage genutzt werden können.

Da die Abflussbildung in Gebirgsregionen einer starken Beeinflussung durch die Prozesse der Schnee- und Gletscherschmelze unterliegt, wird in Kapitel 2 eine Analyse dieser Prozesse in alpinen Einzugsgebieten vorangestellt. Das räumlich differenzierte Einzugsgebietsmodellsystem WaSiM-ETH wurde in drei hochalpinen Einzugsgebieten der Schweiz mit jeweils unterschiedlichem Gletscheranteil von 1981 bis 2000 mit einer  $100 \times 100 \text{ m}^2$  Auflösung und einem stündlichen Zeitschritt angewendet. Um die Berechnung des Gletscherabflusses zu verbessern, wurde ein seasonsabhängiger Strahlungsfaktor in die Gletscherschmelzgleichung einbezogen. Die Resultate zeigen eine starke Abhängigkeit der Schmelzprozesse von Jahreszeit, Höhenlage und Exposition. Die jährliche Schneeschmelzmenge hat ihr Maximum im Höhenbereich von ungefähr 2900 m ü.M. in allen untersuchten Einzugsgebieten.

Neben natürlichen Prozessen können auch anthropogene Wasserspeicherung und -abgaben durch Wasserkraftwerken eine beträchtliche Auswirkung auf den Abfluss und den Wasserhaushalt haben. Kapitel 3 zeigt deshalb wie diese Mechanismen im Einzugsgebiet des Alpenrheins ( $4838 \text{ km}^2$ ) in die hydrologische Modellierung einbezogen wurden. Das hydrologische Modell war nicht in der Lage, den innertäglichen und wöchentlichen Zyklus in den Wasserabgaben zu simulieren. Durch die Rekonstruktion von stündlichen Werten des Rückhalts oder der Abgaben aus den Speichervolumina, konnte eine klare Verbesserung in der Modellgüte während den Abgabep perioden und kleineren Hochwasserereignissen erreicht werden. Zusätzlich wurden mögliche Konsequenzen von Landnutzungsänderungen durchgeführt, welche zeigten, dass Verstädterung einen Einfluss auf lokale Hochwasserereignisse haben könnte, ihr Einfluss aber in grösseren Einzugsgebieten vernachlässigbar scheint.

Nach der Analyse von kleinskaligen hydrologischen Prozessen bestand das nächste Ziel darin, ein off-line gekoppeltes atmosphärisch-hydrologisches Modellsystem (Kapi-

tel 4) für die Abflussvorhersage im Rheineinzugsgebiet bis Rheinfeldern (34550 km<sup>2</sup>) aufzubauen. Wegen der komplizierten Topographie, der variablen Meteorologie und dem Einfluss von Seen, war es notwendig, das Gebiet in Teil Einzugsgebiete zu untergliedern. Das konzeptionellen PREVAH Modell wurde mit einer Auflösung von 500×500 m<sup>2</sup> benutzt. Die Kalibrierung der Einzugsgebiete fand mit Hilfe eines halb-automatischen Kalibrierungsverfahrens statt. Das Modell ist in der Lage, die relevanten hydrologischen Prozesse richtig nachzubilden und die extremen Hochwasserseitel gut zu simulieren. Um das numerische Wettervorhersagemodell (Lokal Modell, LM) zu validieren, wurde eine 6-jährige Reihe der 19-42 Stunden Vorhersagen des Niederschlags und der Lufttemperatur als Eingabe in das hydrologische Modell benutzt. Die Folgen von Fehlern in den Niederschlagsvorhersagen sind in der Abflussvorhersage bei hohen Niederschlagsintensitäten am stärksten ausgeprägt, während kleinere Hochwasser meist richtig vorhersagt werden.

Wegen der Sensitivität von hydrologischen Modellen gegenüber atmosphärischen Eingaben, ist es wünschenswert, die Unsicherheit der Prognose bestimmen zu können. Ein hochaufgelöstes atmosphärisches Ensemble-Vorhersagesystem ist deshalb, basierend auf 51 Läufen des LM, benutzt worden, um eine probabilistische Abflussvorhersage für das Rheingebiet bis Rheinfeldern zu berechnen (Kapitel 5). Das LM mit einer horizontalen Modellauflösung von 10 km liefert 5-Tages Vorhersagen, welche das PREVAH Modell für zwei Hochwasserereignisse antreiben. Die analysierten Fallbeispiele sind das Frühlingshochwasser 1999 im Rheineinzugsgebiet und die Flut vom November 2002 im Alpenrhein. Das "Limited-area Ensemble Prediction System" (LEPS) gestattet Abschätzungen der Unsicherheiten der Abflussvorhersagen. Obwohl die deterministische Vorhersage mit grossen Fehlern behaftet ist, liefert das atmosphärisch-hydrologische LEPS Vorhersagen mit angemessenen Unsicherheitsintervallen. Die Anwendung des Clusterungsverfahrens reduzierte die Spannweite der Vorhersagen im Vergleich zu den 51 Vorhersagen nicht. Ferner kann die Einbeziehung der horizontalen Advektion des Niederschlags wichtig sein für die Hochwasservorhersage in alpinen Einzugsgebieten.