

DISS. ETH No. 21112

MODELLING THE SPACE-TIME STRUCTURE OF PRECIPITATION AND  
ITS IMPACT ON BASIN RESPONSE

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

ATHANASIOS PASCHALIS  
Dipl. Civil Engineering, National Technical University of Athens

born 14 September 1986  
citizen of Greece

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Paolo Burlando, examiner  
Prof. Dr. Peter Molnar, co-examiner  
Prof. Dr. Efi Foufoula-Georgiou, co-examiner  
Dr. Simone Fatichi, co-examiner

Zurich, 2013

# ABSTRACT

---

An improved understanding of the spatio-temporal statistical structure of precipitation across scales is a prerequisite for making connections with the physics of precipitation formation and for developing advanced stochastic modelling techniques useful in operational hydrology and especially in natural hazard risk management. The aim of this thesis is to investigate the precipitation structure in space and time for the orographically complex area of the European Alps and develop appropriate stochastic simulation tools for its modelling. With these tools, the impact of the spatial and temporal structure of precipitation on the response of river basins is investigated.

The first part of the thesis focuses on the description of the statistical structure of the precipitation process in space and time. The statistical theories based on the notion of scale invariance are presented, and their applicability to precipitation time series and radar precipitation fields are assessed. Several issues concerning the parameter estimation are raised and the influence of the measurement errors of rain-gauges and radars are quantified. After establishing optimal parameter estimation techniques in terms of bias and robustness, an extensive data analysis of the precipitation records of the Federal Office of Meteorology and Climatology of Switzerland (MeteoSwiss) consisting of long and reliable point scale measurements (68 rain-gauges with 10 minutes temporal resolution [1981-2009]) and radar measurements (7 years of 5 min data) is conducted. The general applicability of the theory of scale invariance is tested by the data analysis and limitations are presented. Connections between the physical mechanisms that trigger precipitation processes and their respective statistical structure are identified and discussed.

The second goal of this thesis is to provide appropriate stochastic modelling techniques for precipitation. For temporal rainfall, an extensive intercomparison of the state of the art modelling approaches is presented. Their main capabilities and deficiencies are presented and new modelling techniques are proposed. For temporal rainfall, new modelling techniques of combining various classes of stochastic models are developed. For space-time rainfall a new stochastic model (STREAP) is developed that captures most of the key structural and dynamic characteristics of rainfall as captured by weather radars. The model is shown to outperform other traditional and well established space-time stochastic models for rainfall based on Poisson processes.

Finally, the sensitivity of basin response to precipitation structure is investigated through an extensive numerical experiment that combines the new stochastic rainfall model (STREAP) and a detailed fully-distributed hydrological model (TOPKAPI-ETH). Different response patterns dependent on various structural and kinematic patterns of the precipitation fields are identified and their respective discharge generating mechanisms are studied. This study leads to results which demonstrate which parameters of the precipitation structure influence flood discharge and can potentially lead to an optimal decision of the precipitation monitoring network density for flood prediction.

# ZUSAMMENFASSUNG

---

Ein besseres Verständnis der räumlichen und zeitlichen statistischen Struktur des Niederschlags über verschiedene Skalen ist eine Voraussetzung für die Verknüpfung mit der Physik der Niederschlagsbildung und für die Entwicklung fortgeschrittener stochastischer Modellieretechniken, welche nützlich sind für angewandte hydrologische Fragestellungen und vor allem im Risikomanagement von Naturgefahren. Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Niederschlagsstruktur in Raum und Zeit in einem orographisch komplexen Gebiet der europäischen Alpen zu untersuchen und geeignete stochastische Simulationstechniken zu entwickeln, um diese Prozesse zu modellieren. Damit wird der Einfluss der räumlichen und zeitlichen Struktur des Niederschlags auf das Abflussverhalten im Einzugsgebiet untersucht.

Der erste Teil der Forschungsarbeit fokussiert auf die Beschreibung der statistischen Struktur des Niederschlagsprozesses in Raum und Zeit. Die statistischen Theorien, welche auf der Notation der Skaleninvarianz basieren, werden präsentiert, und deren Anwendbarkeit im Bereich von Niederschlagszeitreihen und Radar Niederschlagsfeldern wird abgeschätzt. Verschiedene Probleme bezüglich der Parameterschätzung werden aufgezeigt, und der Einfluss des Messfehlers der Pluviometer und des Radars wird quantifiziert. Nach der Festlegung der optimalen Technik zur Parameterschätzung in Bezug auf den systematischen Messfehler und die Robustheit wird eine ausführliche Datenanalyse der Niederschlagsmessreihen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie der Schweiz (MeteoSchweiz) bestehend aus langen und verlässlichen Punktmessungen (68 Pluviometer mit 10 min Auflösung [1981-2009]) und Radarmessungen (7 Jahre mit 5 min Auflösung) durchgeführt. Die allgemeine Anwendbarkeit der Theorie der Skaleninvarianz wird durch die Datenanalyse getestet, und die Einschränkungen werden aufgezeigt. Die Verknüpfung zwischen den physikalischen Mechanismen, welche den Niederschlagsprozess auslösen, und der entsprechenden statistischen Struktur wird identifiziert und diskutiert.

Das zweite Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung von geeigneten stochastischen Modellierungstechniken für den Niederschlag. Für zeitlichen Niederschlag wird ein ausführlicher Vergleich der Modellierungsansätze gemäss dem aktuellen Stand der Forschung präsentiert. Ihre wichtigsten Einsatzmöglichkeiten und ihre Defizite werden aufgezeigt, und eine neue Modellierungstechnik wird vorgeschlagen. Für zeitlichen Niederschlag werden basierend auf einer Kombination verschiedener Klassen von stochastischen Modellen neue Modellierungstechniken entwickelt. Für Raum-Zeit Niederschlag wird ein neues stochastisches Modell (STREAP) entwickelt, welches die wichtigsten strukturellen und dynamischen Charakteristiken des Niederschlags gemäss Wetterradarbeobachtungen erfasst. Es wird aufgezeigt, dass das Modell andere traditionelle und etablierte stochastische Raum-Zeit Modelle, welche auf dem Poisson Prozess basieren, übertrifft.

Zum Schluss wird anhand eines ausführlichen numerischen Experiments, welches das neue stochastische Niederschlagsmodell (STREAP) mit einem detaillierten räumlich diskretisierten hydrologischen Modell (TOPKAPI-ETH) kombiniert, die Sensitivität der Antwort des Einzugsgebiets auf die Niederschlagsstruktur untersucht. In Abhängigkeit von verschiedenen strukturellen und kinematischen Mustern des

Niederschlagsfelds werden verschiedene Abflussmuster identifiziert, und der entsprechende Abflussbildungsmechanismus wird untersucht. Diese Studie führt zu Resultaten, welche aufzeigen welche Parameter der Niederschlagsstruktur den Hochwasserabfluss beeinflussen, und kann daher potentiell als Entscheidungshilfe für die Optimierung der Dichte des Niederschlagsmessnetzes für Hochwasservorhersage eingesetzt werden.