

Understanding the processes of discharge formation under extreme precipitation

a study based on the numerical simulation of hillslope experiments

Doctoral Thesis

Author(s):

Faeh, Andrew

Publication date:

1997

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001747130>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH No. 12040

***UNDERSTANDING THE PROCESSES OF DISCHARGE FORMATION UNDER
EXTREME PRECIPITATION,
A study based on the numerical simulation of hillslope experiments.***

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
Doctor of Technical Sciences



presented by:

Andrew Oscar Faeh

B.Sc. (Civil Engineering), University of the Witwatersrand, Johannesburg.

born 28th of October 1963
citizen of Kaltbrunn SG

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr Dr h.c. Daniel Vischer,	examiner
Prof. Dr Hannes Flühler,	co-examiner
Dr Felix Naef,	co-examiner



1997

SUMMARY

The continued occurrence of catastrophic flooding in Switzerland and elsewhere, provides evidence for the necessity of a better understanding of the processes leading to flood formation. Only once the mechanisms involved in the transformation of precipitation to discharge are understood, can the planning and implementation of flood protection measures be improved. In recognition of the fact that floods are generated by the combined influence of both overland and subsurface flow processes and that the paths of soil-water-movement are not fully known, this investigation was aimed at identifying the controlling aspects of flood generation not only on the soil surface but within the soil body itself. A clearer understanding of the soil water transport processes was also sought in order to facilitate more reliable predictions of catchment retention capacities.

Field experiments are simulated here for process recognition purposes only, and not to demonstrate the suitability of the utilized model for general hydrological prediction purposes. Such predictions made in the absence of an accurate understanding of the processes involved, are shown to be unreliable even when a sophisticated model is employed and detailed site information is available. The approach adopted in this study is thus unique in that a numerical simulation model was used solely as a tool to identify the decisive flow mechanisms during the rainfall experiments performed on natural hillslopes.

The Galerkin-type finite element model utilized is able to model the various flow processes on and in the soil, which are thought to be of significance under extreme precipitation. By employing double porosity techniques the individual mechanisms of flow in the soil matrix itself and within its various structural features and their interaction are described. The problems associated with the estimation of the required model parameters are discussed, and a new method for the description of the transfer flows between the matrix and macropore systems is presented.

The experiments, in which intense rainfall with mostly constant intensities ranging from 50 to 95 mm/h were applied over an area of 60 m², performed at four contrasting experimental sites are examined in detail in this study. An analysis of experimental measurements pertaining to overland and subsurface flow, soil moisture, soil suction and water-table indicates that although experimental techniques provide insight into the processes of discharge formation, the controlling mechanisms cannot always be distinguished. Common aspects not identifiable from the experimental measurements alone relate to the factors responsible for poor infiltration, the mechanisms responsible for and locations of macropore

flow initiation, the relative proportions of matrix and macropore flow, the extent of soil saturation development, and the causes for changed response in follow-up experiments. Clarity on these aspects is sought in the numerical investigation of the experiments.

The plausibility of flow processes, which are assumed to occur in nature, is examined. The modular nature of the model employed enables various, and sometimes conflicting, process concepts to be analysed. For each of the experiments examined, processes formulations are sought which provide correlation of the numerical results with both the discharge and pressure change measurements, within the framework of the stringent momentum and continuity criterion of the numerical model utilized. The factors controlling discharge formation are shown to be time variant (and precipitation volume dependant) at all sites examined. The influence and occurrence of the various controlling mechanisms also varies between sites. The results demonstrate the decisive influence on infiltration capacities of the efficiency of water exchange between the macropore and matrix systems, and the infrequent occurrence of soil saturation even under extreme precipitation conditions. Based on the flow processes information gained, subsequent experiments at the various sites are examined, revealing processes variability effects. These relate to changes in structural soil features brought about by macropore collapse or closure, pipe suffusion and differential seasonal biotic activity.

The regulatory influence on discharge formation of the soil properties *below* the soil surface is shown, even for sites with strong overland flow response. Reliable predictions on flood formation can thus only be expected if the response of the soil body in its entirety is accurately portrayed. The controlling mechanisms identified can thereby be used to serve as a guide for hydrological response assessment.

ZUSAMMENFASSUNG

Hochwasser richten in der Schweiz und anderswo wegen unzureichender Schutzmassnahmen auch heute noch grosse Schäden an. Ein wesentlicher Grund hierfür ist das ungenügende Wissen über die abflussbildenden Prozesse bei extremen Niederschlägen, das Voraussetzung für eine solide Abschätzung von Abflussspitzen ist. Erst wenn besser verstanden wird, wie die Umwandlung von Niederschlag in Abfluss erfolgt, können auch die Planung und Durchführung von Hochwasserschutzmassnahmen verbessert werden.

Für die Grösse eines Hochwassers spielt das vom Boden zurückgehaltene Wasser eine entscheidende Rolle. Ziel dieser Arbeit war es deshalb, die heute noch weitgehend unbekannt massgebenden Prozesse, die bei der Abflussbildung auf der Bodenoberfläche und im Boden bei Hochwasser von Bedeutung sind, zu identifizieren. Mit den gewonnenen Erkenntnissen soll eine genauere Einschätzung des Retentionsvermögens natürlicher Einzugsgebiete unter extremen Niederschlagsbedingungen ermöglicht werden.

Berechnungsversuche auf einer Fläche von 60 m² und künstlichen Niederschlagsintensitäten im Bereich von 50 bis 100 mm/h an 18 unterschiedlichen Hangstandorten in der Schweiz dienen als Grundlage für diese Untersuchung. Gemessen wurden dabei Oberflächenabfluss und Abfluss im Boden, Bodenfeuchte, Saugspannung und Hangwasserspiegel. Die Versuche an vier Standorten sind ausführlich analysiert, und belegen, dass die Wasserbewegungen entlang bevorzugter Fliesswege die Abflussbildung entscheidend beeinflussen. Es zeigt sich, dass die Prozesse anhand der Messungen alleine zwar identifiziert werden können, die dabei steuernden Mechanismen jedoch nicht immer erkennbar sind. Nicht eindeutig bestimmen lassen sich beispielsweise die auslösenden Mechanismen des Makroporenflusses, das Verhältnis zwischen Matrix- und Makroporenfluss, die Ausdehnung der Bodensättigung sowie die Ursachen des veränderten Verhaltens in Nachversuchen. Aufschluss über diese Aspekte der Abflussbildung gibt der Einsatz von numerischen Simulationen.

Ein numerisches Modell wird erstmals als Werkzeug zur Bestimmung der massgebenden Abflussprozesse auf natürlichen Hängen eingesetzt. Die Prozessidentifikation steht im Vordergrund, und nicht, wie sonst üblich, die Prüfung der Tauglichkeit eines bestimmten Modells für allgemeine hydrologische Zwecke.

Das verwendete zweidimensionale Galerkin Finite-Element-Modell (QSOIL) beschreibt für extreme Niederschlägen die Abflussprozesse auf der Bodenoberfläche und im Boden. Die unterschiedlichen Fliessprozesse in der Bodenmatrix

und in den von der Bodenstruktur abhängigen Fliesspfaden sowie deren Zusammenwirken werden mit doppelten Porositätsansätzen berücksichtigt. Die Schwierigkeiten, die sich bei der Bestimmung der erforderlichen Parameter zeigen, sind beschrieben. Ein neuer Ansatz für die Bestimmung des Wasseraustausches zwischen Matrix- und Makroporensysteme wird ebenfalls vorgestellt.

Das Bausteinprinzip des QSOIL-Modells ermöglicht es, die Plausibilität unterschiedlicher und teilweise entgegengesetzter Prozessvorstellungen in einem iterativen Verfahren zu prüfen. Es werden Prozesskombinationen gesucht, die im Rahmen der strengen Impuls- und Kontinuitätsanforderungen des Modells in der Lage sind, die Abfluss- und Druckmessungen nachzubilden. Dabei werden die entscheidenden Schlüsselstellen für die Abflussbildung eruiert und die im jeweiligen Fall wichtigen Fliesspfade bestimmt. Es wird gezeigt, dass

- die massgebenden Faktoren für die Abflussbildung zeitlich variieren (und demzufolge auch bei hohen Niederschlagsintensitäten vom Niederschlagsvolumen abhängen);
- das Auftreten und die Auswirkungen von verschiedenen steuernden Mechanismen standortabhängig sind;
- die Effizienz des Wasseraustausches zwischen Matrix- und Makroporensystemen von entscheidendem Einfluss für die Abflussbildung ist;
- Bodensättigung auch unter extremen Niederschlagsbedingungen nur selten vorkommt.

Die Folgeversuche an einzelnen Beregnungsstandorten werden, basierend auf den gewonnenen Prozesserkennnissen, untersucht. Dabei werden Veränderungen an der Bodenstruktur als Ursachen der Prozessvariabilität identifiziert, wie das Kollabieren oder Schliessen von Makroporen, Materialauswaschungen oder die saisonal bedingte unterschiedliche biologische Aktivität im Boden.

Ohne genaue Prozesskenntnisse liefert das verwendete hochentwickelte Modell keine zuverlässigen hydrologischen Prognosen, auch wenn detaillierte Standortinformationen wie z.B. Bodentextur und Porosität einbezogen werden. Solche Angaben reichen also nicht aus um die Abflussbildung am Hang beurteilen zu können. Erst das Wissen über die Schlüsselmechanismen wie das Eindringen von Wasser in die Makroporen oder das darauffolgende Austreten aus der Makroporen erlaubt eine sichere hydrologische Prognose.

Der überaus entscheidende und steuernde Einfluss der Bodeneigenschaften *unterhalb* der Oberfläche auf die Abflussbildung wird verdeutlicht. Selbst bei Standorten mit starkem Oberflächenabfluss wird die Abflussbildung vielfach durch die Fliessmechanismen im Boden gelenkt. Ohne Kenntnisse über diese Fliessvorgänge lassen sich die Abflussbildung kaum erklären und die Grösse von Hochwasser schlecht abschätzen. Diese Arbeit liefert einen Beitrag zum Verständnis dieser Prozesse.