

Diss ETH Nr. 17330

Experimental study of subsurface stormflow formation

Combining tracer, hydrometric and geophysical techniques

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

PETER MATTHIAS KIENZLER

Diplom - Hydrologe, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg.

born February 01, 1972
citizen of Germany

Prof. Wolfgang Kinzelbach, examiner

Prof. Axel Bronstert, co-examiner

Dr. Felix Naef, co-examiner

2007

Abstract

Fast lateral flow in the shallow subsurface has been observed to contribute substantially to storm runoff from hillslopes and can also lead to unexpected fast drainage of soils and the transport of contaminants. This runoff formation mechanism is in general termed "subsurface stormflow" (SSF). While many studies over the past decades have documented the importance of SSF, its formation is still not well understood. Quantification of SSF is further hampered by invisibility of subsurface flow paths along with high spatial variability.

SSF formation was studied at four different hillslopes with different soils and geology during controlled sprinkling experiments and natural rainfall events. Event and pre-event water fractions were determined using artificially traced sprinkling water. The potential was explored of the radioactive noble gas Radon-222 as a natural tracer and of geophysical techniques to improve experimental investigations of subsurface stormflow.

SSF formation and the fraction of pre-event water varied substantially at different hillslopes. Both, intensity of SSF and fraction of pre-event water depended on whether SSF in preferential flow paths was fed directly from precipitation or indirectly from saturated parts of the soil. Soil water was rapidly mobilised from saturated patches in the soil matrix and released into larger pores, where it mixed with event water. Substantial amounts of pre-event water were therefore contained in fast flow components like subsurface storm flow and also in overland flow. This finding has consequences for commonly used hydrograph separation methods and might explain part of the "old water paradox".

Radon could be used successfully to monitor continuously pre-event water fractions in subsurface storm flow with a high temporal resolution. This allowed identifying the origin and initiation process of subsurface storm flow. Georadar provided insight into the formation of SSF, as concentrated flow in pipe-like structures could be located and observation of actual water movement provided information on concentration of diffuse flow into pipe flow. Application of georadar also helped to establish the subsurface topography of moraine material with reduced hydraulic permeability at another test slope. This allowed estimating the spatial variability of SSF and locating areas of concentrated SSF.

SSF response was affected in different ways and to varying degree by changes of precipitation intensity and antecedent precipitation. The study showed that the influence of antecedent soil moisture on SSF response depends on how SSF is formed. Formation of subsurface stormflow was hardly influenced by the increase of precipitation intensity. As a consequence, subsurface discharge rates were not further increased by increasing precipitation intensity. Different soil structures were relevant for runoff formation during different precipitation intensities as saturation occurred at the base of the soil during low precipitation intensity and within the topsoil during high intensity. Thus, timing and dominance of different flow components can change substantially during different intensities.

The findings of this study highlight the relevance of subsurface stormflow for the formation of floods. They provide an improved understanding of subsurface stormflow formation and help to conceptualize and parameterize subsurface stormflow in rainfall-runoff modeling more accurately.

Zusammenfassung

Schneller lateraler Abfluss im oberflächennahen Untergrund von Hängen kann wesentlich zur Entstehung von Hochwasser beitragen. Dieser Abflussbildungsmechanismus, in der Fachliteratur generell als "subsurface stormflow (SSF)" bezeichnet, kann auch eine unerwartet schnelle Drainage von Böden ermöglichen und den Transport gelöster Schadstoffe verstärken. Obwohl zahlreiche Studien während der letzten Jahrzehnte die große Bedeutung von subsurface stormflow aufgezeigt haben, gibt es nur ein mangelndes Verständnis davon, wie, wann und wo diese Abflüsse gebildet werden. Abschätzungen von SSF werden erschwert durch die große räumliche Variabilität der unterirdischen - und damit nicht sichtbaren - Fließwege.

Das Ziel dieser Studie ist ein vertieftes Verständnis der Entstehungsmechanismen von subsurface stormflow. Dazu wurden hydrometrische Messungen und Tracerexperimente während Beregnungsexperimenten und natürlichen Regenereignissen an vier Testhängen mit unterschiedlichen Böden im Schweizer Mittelland durchgeführt. Im Oberflächenabfluss, im SSF und im Bodenwasser wurde der Anteil von aktuellem Regenwasser (event water), beziehungsweise von Wasser, das schon vor dem Experiment im Boden gespeichert war (pre-event water) bestimmt. Eingesetzt und getestet wurden neue experimentelle Techniken, wie die Verwendung des radioaktiven Edelgases Radon-222 als natürlichen Tracer, sowie neue geophysikalische Messmethoden (Georadar und elektromagnetische Induktion).

Die verschiedenen Testhänge zeigten sehr unterschiedliche Reaktionen hinsichtlich der Fliessrate, der Zeitverzögerung bis zum Einsetzen des SSF, der unterirdischen Fliessgeschwindigkeiten sowie der Anteile an pre-event water im SSF. Diese unterschiedlichen Reaktionen hingen davon ab, ob SSF in präferentiellen Fliesswegen direkt vom Niederschlag oder indirekt von gesättigten Bereichen im Boden gespeist wurde. Es zeigte sich, dass in gesättigten Bereichen der Bodenmatrix Bodenwasser schnell mobilisiert werden kann und in grössere Poren freigesetzt werden kann, wo es sich mit schnell fliessendem event water mischen kann. So enthalten schnelle Abflusskomponenten, wie SSF und auch Oberflächenabfluss substantielle Mengen von pre-event water. Dieser Befund hat weitreichende Konsequenzen für allgemein verwendete Ganglinienseparationen und kann teilweise das sogenannte "old water paradox" erklären.

Der natürliche Tracer Radon erlaubt es, den Anteil an pre-event water im SSF kontinuierlich und mit hoher zeitlicher Auflösung zu beobachten und die jeweiligen SSF Entstehungsmechanismen zu identifizieren. Mit Georadar konnte beobachtet werden, wie sich diffuser unterirdischer Abfluss hangabwärts in präferentiellen Fließwegen konzentriert. Es ermöglichte auch, die unterirdische Topographie von Grundmoränenmaterial mit reduzierter hydraulischer Durchlässigkeit und damit die räumliche Variabilität von SSF zu erfassen.

SSF Reaktionen wurden in unterschiedlicher Art und Weise und in unterschiedlichem Ausmass von Veränderungen des Vorregens und der Niederschlagsintensität beeinflusst. Der Einfluss des Vorregens auf die SSF Reaktion steht in Beziehung zum jeweiligen SSF Entstehungsmechanismus. Der Einfluss der Niederschlagsintensität auf SSF war hingegen niedrig und SSF Fließraten waren auf ein ortsabhängiges Maximum beschränkt. Unterschiedliche Bodenstrukturen waren relevant für die Abflussbildung bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. Bei niedriger Intensität sättigte sich zuerst der Unterboden über dem stauenden geologischen Untergrund, während sich bei hoher Intensität vorübergehende, hängende Sättigung im Oberboden bildete. Daher gab es in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität tiefgreifende Veränderungen der Dominanz und Anfangszeit verschiedener Abflusskomponenten.

Diese Ergebnisse zeigen die hohe Relevanz von subsurface stormflow für die Abflussbildung auf. Die vorliegende Studie erlaubt ein vertieftes Verständnis von subsurface stormflow und liefert Grundlagen für eine verbesserte Konzeptionalisierung und Parametrisierung von SSF in Niederschlag-Abfluss-Modellen.