

Diss. ETHZ No. 14237

Mechanisms controlling macropore flow during infiltration

Dye tracer experiments and simulations

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH
for the degree of
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCE

presented by
MARKUS HELMUT WEILER
Dipl. Hyd., Albert-Ludwigs University of Freiburg (D)
born June 17, 1971
Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Paolo Burlando, examiner
Dr. Felix Naef, co-examiner
Prof. Dr. Hannes Flüher, co-examiner

2001

Abstract

Macropore flow describes the fast movement of water in structural features like wormholes, root channels, or cracks in soils. The influence of macropore flow on infiltration, transport of solutes, and the generation of runoff is generally accepted; however, the mechanisms controlling macropore flow are not very well known. Several studies have shown that the initiation of macropore flow and the water flow from the macropores in the surrounding soil matrix (interaction) mainly determine the infiltration in macroporous soils. Yet an integrated approach to investigate the processes controlling macropore flow, to identify the major factors influencing these processes, and to determine their effects on runoff generation is lacking. Concentrating on soils containing macropores built by earthworms, this study observed and analysed in detail macropore flow processes during flood producing rainfall events.

Combined sprinkling and dye tracer experiments with different rainfall intensities and initial soil moisture conditions were carried out on four sites in Switzerland. The experimental set-up allowed the observation of macropore flow initiation and interaction at a high spatial and temporal resolution. The sites were selected to cover a wide variety of properties that can influence macropore flow. However, the land-use was restricted to grassland to ensure an undisturbed development of the macropore network and all sites were located on hillslopes to be able to measure overland flow. The experiments provided detailed soil water regime measurements in order to detect water content changes in different depths and to determine the time of saturation and the saturation deficit at the beginning of the experiment.

Several vertical and horizontal soil sections showing the patterns of the applied dye tracer Brilliant Blue FCF were prepared for each experiment. Despite dye patterns showing only one picture of the cumulative flow pattern at the end of the experiment, preferential flow pathways can be visualized and identified with a high spatial resolution. A series of image analysis procedures was first applied to the photographed soil sections to distinguish between stained and unstained areas and to classify the stained areas for different concentration classes. Using the classified vertical dye patterns, a new approach was developed to recognize five different flow processes within the soil profile; two processes in which only the soil matrix is involved and three processes in which macropores with a different degree of interaction dominate the infiltration. The resulting profiles showed a logical sequence of flow processes for each experiment, which were later used to validate the modelling results. The horizontal sections were

used to derive the macropore density. Furthermore, the interaction was quantified by a method describing the spatial relation between macropores and stained areas.

The detailed analysis of the macropore processes showed that the high macropore flow rate and the velocity in vertically oriented macropores formed by earthworms usually does not limit infiltration. However, initiation and interaction and especially their interdependence determine infiltration into macroporous soils. Initiation of macropore flow can either take place on the soil surface or in a saturated soil layer. Both initiation processes significantly change the flow rate distribution within the macropores, resulting in a high rate in some macropores and in a very low rate in the majority of macropores. This flow variability considerably alters the interaction and thus the generation of runoff.

These mechanisms were integrated in the new macropore infiltration model IN³M. This model is capable both of simulating the observed soil water regime and of reproducing the observed variability of dye patterns. The comparison of the simulated and observed dye patterns provided an innovation to validate the model results. Testing the sensitivity of some parameters, the major factors influencing the macropore flow processes were identified. Different impacts of macropores on infiltration were shown to depend mainly on the balance between initiation and interaction of macropore flow. The permeability near the soil surface and the surface characteristics control whether macropore flow is directly initiated at the soil surface or delayed after saturating a soil layer. Interaction is mainly influenced by the soil moisture content, since matric potential is the major driving force of water flowing from the macropore into the soil matrix. In a macroporous soil, the average saturated hydraulic conductivity mainly determines the interaction and thus the infiltration. In contrast, in a soil without macropores, the soil layer with the lowest conductivity controls infiltration. Finally, the geological bedrock material or the properties of the subsoil influence the drainage of the macropores and thus the flow pathways for runoff generation.

The findings of this study have important implications for hydrological applications. As the initiation process in combination with interaction can considerably accelerate the runoff response, the leaching of solutes will most likely be affected and should be studied in more detail in this respect. Related to this area is the question about movement of "old" and "new" water in the soil. Besides the modification of runoff generation by macropore flow processes, also the resulting heterogeneous distribution of the water content in the soil should be taken into consideration for rainfall-runoff modelling in catchment hydrology. The results should encourage hydrologists to consider macropore flow processes when assessing runoff generation mechanisms or whenever macropores are relevant for the problem.

Kurzfassung

Makroporenfluss beschreibt die schnelle Wasserbewegung in Bodenstrukturen, wie z.B. Regenwurmgingen, Wurzelkanalen oder Schwundrissen. Der Einfluss von Makroporen im Boden auf die Infiltration, den Stofftransport und die Abflussbildung ist allgemein erkannt, jedoch sind die Mechanismen, die den Makroporenfluss beeinflussen, noch nicht vollständig erforscht. In mehrere Untersuchungen wurde aufgezeigt, dass die Initiierung von Makroporenfluss und der Wasseraustausch von den Makroporen in die umliegende Bodenmatrix (Interaktion) die Infiltration besonders stark beeinflusst. Einen integrativen Ansatz zur Untersuchung der Kontrollmechanismen und zur Identifikation der wichtigsten Einflussfaktoren gibt es jedoch nicht. Um diesem Ziel näher zu kommen konzentriert sich diese Untersuchung auf Böden mit durch Regenwürmer entstandene Makroporen und untersucht detailliert die Prozesse des Makroporenflusses für extreme Niederschlagsereignisse.

An vier Standorten in der Schweiz wurden kombinierte Beregnungs- und Farbtracerversuche mit unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten und Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte durchgeführt. Mit diesem Ansatz kann die Initiierung und die Interaktion während starker Niederschlagsereignisse in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung untersucht werden. Die Standorte wurden dahingehend ausgewählt, dass die Variation der Makroporenfluss beeinflussenden Bodeneigenschaften gross ist. Dabei war die Landnutzung der Standorte auf Wiese festgelegt, da sich dort das Makroporensystems ungestört entwickeln kann. Die Lage der Standorte war auf Hänge beschränkt, um Oberflächenabfluss messen zu können. Mit Hilfe von Messungen des Bodenwasserregimes wurde die Wassergehaltsänderung in verschiedenen Tiefen, der Zeitpunkt der Sättigung und das Sättigungsdefizit zu Beginn der Versuche bestimmt. Für jeden Versuch wurden mehrere horizontale und vertikale Schnitte der Fliessmuster des Farbtracers Brilliant Blue FCF präpariert. Obwohl Fliessmuster nur ein einmaliges Bild der kumulierten Tracerverteilung am Ende des Versuches zeigen, können präferentielle Fliesswege sehr gut visualisiert und identifiziert werden. Verschiedene Bildverarbeitungsmethoden wurden eingesetzt um die fotografierten Fliessmuster auszuwerten. Zuerst wurde zwischen gefärbten und ungefärbten Bereichen unterschieden, dann wurden die gefärbten Bereiche in verschiedene Konzentrationsklassen eingeteilt. So war es möglich aus den klassifizierten vertikalen Fliessmustern verschiedene Fliessprozesse abzuleiten; zwei Prozesse, die den Fluss in der Bodenmatrix beschreiben und drei Prozesse, bei denen Makroporenfluss mit unterschied-

licher Interaktion den Infiltrationsvorgang dominiert. Die klassifizierten Profile zeigen eine logische Sequenz von Fliessprozessen für jeden Versuch, die später dazu benutzt wurden, die Modellergebnisse zu validieren. Mit den horizontalen Fliessmustern wurde die Makroporendichte bestimmt und die Interaktion mit einer Methode quantifiziert, die den räumlichen Bezug zwischen Makroporen und gefärbten Flächen auswertet.

Es zeigte sich bei der Prozesseauswertung, dass die Fliessraten und die Fliessgeschwindigkeit in Regenwurmgingen normalerweise nicht limitierend für die Infiltration ist. Vielmehr bestimmen Initiierung und Interaktion das Infiltrationsverhalten in Böden mit Makroporen. Die Initiierung kann von der Bodenoberfläche oder von einem gesättigten Bereich im Boden ausgehen. Beide Mechanismen verändern die Verteilung der Fliessraten in den Makroporen, was zu sehr hohen Fliessraten in einigen wenigen Makroporen und zu sehr geringen Fliessraten in der Mehrzahl der Makroporen führt. Diese Variabilität verändert die Interaktion und somit auch die Abflussbildung signifikant.

Diese Prozesse wurden in das neue Infiltrationsmodell IN³M eingebaut. IN³M konnte sowohl die gemessenen Bodenwasserregime simulieren, als auch die Variabilität der Fliessmuster reproduzieren. Der Vergleich zwischen den simulierten und beobachteten Fliessmustern ermöglichte eine zuverlässige Validierung des Modells. Mittels einer Sensitivitätsanalyse konnten die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Infiltrationsvorgang in Böden mit Makroporen bestimmt werden. Diese sind besonders vom Gleichgewicht zwischen Initiierung und Interaktion abhängig. Ob Makroporefluss direkt an der Bodenoberfläche oder erst verspätet nach Sättigung eines Bereiches im Boden initiiert wird, hängt stark von der Durchlässigkeit der Bodenoberfläche und der Oberflächenbeschaffenheit ab. Nicht nur die Initiierung im Boden, sondern insbesondere auch die Interaktion wird vom Bodenwassergehalt bestimmt, da das Matrixpotential die treibende Kraft für den Wasserfluss von den Makroporen in die Matrix ist. In einem Boden mit Makroporen ist die mittlere hydraulische Leitfähigkeit verantwortlich für Unterschiede der Interaktion zwischen zwei Standorten. Dies steht im Gegensatz zu Böden ohne Makroporen, wo der Horizont mit der geringsten Leitfähigkeit die Infiltration kontrolliert. Schliesslich beeinflusst der geologische Untergrund, bzw. der Unterboden die Entleerung der Makroporen und somit die Fliesswege bei der Abflussbildung.

Diese Ergebnisse haben wichtige Auswirkungen auf andere hydrologische Fragestellungen. Die beobachtete und modellierte schnelle Abflussreaktion verändert nicht nur das hydrologische Verhalten eines Bodens, sondern auch den Stofftransport im Boden. In Bezug dazu steht auch die Frage zum Transport von "altem" und "neuem" Wasser im Boden. Nicht nur die Veränderung der Abflussbildung durch Makroporen, auch die sehr heterogene Verteilung des Wassergehaltes im Boden sollte bei der Modellierung von Niederschlags-Abfluss-Prozessen berücksichtigt werden. Diese grundsätzlichen Ergebnisse sollen Hydrologen ermutigen Makroporen zu berücksichtigen, wenn direkte Aussagen zur Abflussbildung von Ihnen gefordert oder für die Fragestellung indirekt relevant sind.