



Doctoral Thesis

Characteristics of drainage processes behind fluid displacement fronts in porous media

Author(s):

Hoogland, Frouke

Publication Date:

2016

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010890788> →

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. 23916

**CHARACTERISTICS OF DRAINAGE PROCESSES BEHIND
FLUID DISPLACEMENT FRONTS IN POROUS MEDIA**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

Presented by

FROUKE HOOGLAND

Msc. Utrecht University, The Netherlands

born on 05.05.1987

citizen of The Netherlands

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dani Or, examiner

Dr. Peter Lehmann, examiner

Prof. Dr. Rer. Nat. Insa Neuweiler, co-examiner

Prof. Dr, Ir. Majid Hassanizadeh, co-examiner

2016

Abstract

Water redistribution in soils after rainfall is a key process of the global water cycle, defining the amount of water transmitted to the atmosphere by evaporation or to aquifers by deep percolation. In addition, the water remaining in the soil is essential to sustain live and plant growth and to maintain the various soil functions. To estimate the amount of water that can be stored in the soil (or emitted to the atmosphere), accurate predictions of the soil water draining by gravity are essential. However, as addressed in this thesis, predictions are hampered by the complexity of the soil pore space and the interaction of various forces that lead to different time and length scale controlling drainage dynamics.

In the thesis we first analyze the effect of high drainage rates on water content left in the unsaturated zone, and the dynamics of subsequent gravity drainage of this temporarily entrapped soil water. Experimental observations and theoretical analyses provide a means to quantify the increase in the amount of retained water behind a frontal region (a front is the interface between the wet and dry region) with increasing drainage rates. Subsequently we focus on the associated pore scale description of drainage mechanisms and detailed morphology of retained water that define the unsaturated hydraulic conductivity and flow dynamics. Experimental observations at the pore scale using fast X-ray tomography enable visualization of capillary hydraulic networks spanned by clusters of water filled pores interconnected by water threads held in crevices and corners. The geometry of these capillary channels in pore corners and crevices is related to pore space architecture and angularity. The new morphological insights are applied to a recent framework for modeling unsaturated flows that capitalize on analogy between capillary liquid threads in soil and the structure of draining foam. The resulting soil foam drainage equation (FDE) provides an alternative to the standard Richards equation formulation, or local descriptions such as done in pore network modeling. The FDE offers a means to insert pore scale insights of physical flow pathways into a macroscopic theory of unsaturated flow, without the need for a-priori defined hydraulic conductivity function (viscous resistance originates from the geometry and evolution of flow channels). The practical applications of such a framework are discussed and illustrated for simple cases such as the prediction of internal drainage rates behind fast fronts and for unsaturated flows across textural interfaces. The thesis provides a coherent set of tools for exploring more general applications of the FDE framework in porous media and defines the conditions for the onset of an “unsaturated” regime behind a drainage front where the FDE applies. The studies also provide initial insights into the role of pathway size on transport of particulate objects through porous media (colloids and pathogens), a capability integral to the FDE and the flow pathway geometries proposed here.

Zusammenfassung

Die Wasserverteilung im Boden nach einem Niederschlag ist ein Schlüsselprozess im globalen Wasserkreislauf, da durch sie bestimmt wird, wie viel Wasser für die Verdunstung in die Atmosphäre und für die Versickerung in den Grundwasserleiter zur Verfügung steht. Die Wassermenge, die im Boden zwischengespeichert wird, ist zudem für das Pflanzenwachstum und für die Erhaltung aller Bodenfunktionen von grösster Bedeutung. Um abzuschätzen, welche Wassermenge nach einem Niederschlag im Boden verbleibt, muss vorhergesagt werden können, mit welcher Rate Wasser durch den Einfluss der Schwerkraft versickert (im Folgenden wird die Wasserverlagerung durch Gravitation als „Drainage“ bezeichnet). Wie in dieser Dissertation aber gezeigt wird, werden genaue Vorhersagen durch die komplexe Porenstruktur und das Zusammenwirken unterschiedlicher Kräfte stark erschwert und es bedarf neuer Ansätze, um die Vorhersagen zu verbessern.

Im ersten Teil der Arbeit wird untersucht, wie viel Wasser zurück bleibt, wenn ein poröses Medium sehr schnell drainiert wird und mit welcher Geschwindigkeit das zurück gebundene Wasser weiter verlagert wird. Experimentelle und theoretische Ansätze werden angewendet um aufzuzeigen, dass mehr Wasser hinter der Drainagefront (die sich verschiebende Grenze zwischen nassem und trockenem Medium) zurück bleibt, je schneller der Boden drainiert wird. Zuerst wird die Analyse auf der Makroskala vorgenommen, um dann in einem nächsten Schritt die Prozesse auf der Porenskala genauer zu quantifizieren. Wir werden zeigen, wie das Wasser hinter der Drainagefront ein Netzwerk entlang der Körner bildet, das die hydraulische Leitfähigkeit und die Fliessgeschwindigkeit des Wassers im ungesättigten Boden bestimmt (als „ungesättigt“ wird ein poröses Medium bezeichnet, dessen Poren nicht vollständig mit Wasser gefüllt sind). Die Formierung und Geometrie des Wassernetzwerks wurde mit schneller Röntgentomographie untersucht: Sind zuerst noch viele Poren Wasser gefüllt und mit der Drainagefront verbunden, dringt Luft nach und nach in alle Poren ein und Wasser bleibt nur noch entlang der unregelmässigen Porenwände durch Kapillarkräfte als „dicker Wasserfilm“ zurück. Sobald Wasser nur noch entlang dieses „Films“ drainiert wird, ist die Drainagerate viel geringer.

In der Dissertation präsentieren wir einen Ansatz, der die Geometrie und Vernetzung dieser Wasserfilme berücksichtigt und den Wasserfluss durch das Netzwerk quantifizieren kann. Der Ansatz basiert auf der Analogie zwischen der Drainage eines Schaums (Wasser zwischen benachbarten Luftblasen) und dem Fluss entlang der Wasserfilme (Wasser zwischen sich berührenden Körnern). Die Drainage von Schäumen („foams“) und den Wasserfilmen des Bodens wird durch die „Foam Drainage Equation FDE“ beschrieben. Die FDE bietet eine alternative Beschreibung der Drainagedynamik an, die sonst üblicherweise mittels der Richards Gleichung erfolgt, aber die Existenz und Geometrie der Wasserfilme vernachlässigt. Mit der FDE können Eigenschaften der Porenskala sehr einfach in die Beschreibung des ungesättigten Wasserflusses auf der grösseren Skala einfliessen und es bedarf keiner unabhängigen Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Wir zeigen in der

Dissertation verschiedene und neue Anwendungen der FDE für die Beschreibung der Drainage in porösen Medien: Mit der FDE können wir sowohl Fließgeschwindigkeiten hinter der Front als auch über die Grenzen verschiedener Materialien hinweg (beispielsweise die Schichtgrenze zweier Bodenhorizonte) vorhersagen. Da dieser Ansatz (im Gegensatz zur Richards Gleichung) die Geometrie der Fließpfade berücksichtigt, können auch Bedingungen definiert werden, die den Transport von grösseren Partikeln (zum Beispiel Kolloide und Bakterien) verunmöglichen. So bietet die FDE also nicht nur eine interessante Alternative zur Beschreibung des Wassertransports, sondern eine sehr allgemeine Theorie für den Fluss und Transport in ungesättigten porösen Medien.