



Doctoral Thesis

Pore scale characterization of displacement front dynamics in porous media interfacial jumps, pressure bursts and acoustic emissions

Author(s):

Möbius, Franziska

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010168229> →

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. 21584

Pore scale characterization of displacement front
dynamics in porous media -
interfacial jumps, pressure bursts and acoustic emissions

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

FRANZISKA MÖBIUS

Dipl.-Ing., Technische Universität Dresden

born 14th of June, 1983

citizen of Germany

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Dani Or	examiner
Prof. Dr. Hans-Jörg Vogel	co-examiner
Prof. Dr. Knut-Jørgen Måløy	co-examiner
Prof. Dr. Renaud Toussaint	co-examiner

2013

Abstract

There is a broad interest in the behavior and characteristics of fluid displacement fronts through porous media in fields ranging from hydrology (infiltration and drainage, evaporation-drying fronts) and petroleum engineering to numerous industrial applications. Interfacial fronts are marked by sharp phase discontinuities and presence of large gradients that depart from the classical macroscopic description of multiphase flows. The apparent macroscopically smooth and continuous motion of displacement fluid fronts involve numerous pore-scale interfacial jumps and associated pressure bursts, as well as rapid energy release of interfacial energy. Pore-scale processes at the front are affected by macroscopic boundary conditions that, in turn, affect residual phase distribution and thus hydraulic properties behind the displacement front. The long-standing challenges toward an improved understanding of fluid displacement in porous media are the characterizing the pore scale dynamics during fluid front displacement and elucidating links between pore scale dynamic processes and emergent macroscopic behavior of the front itself and the domain left behind it.

This thesis presents systematic experimental and theoretical studies for quantifying the roles of interfacial pore scale dynamics on fluid displacement characteristics in simple porous media. We focused on experimentally characterizing of the rich energy release processes at the fluid front by monitoring acoustic emissions during drainage and imbibition. These studies enabled the “counting” of Haines jumps and snap-off processes and revealed differences between drainage and imbibition. Moreover, the observation of acoustic emission long after the cessation of front motion reflected an extended period of interfacial reconfigurations behind the front toward equilibrium.

We also studied mechanistically the sequence of pore scale interfacial jumps and the associated capillary pressure signatures and liquid redistribution. Experimental information from rapid imaging and pressure transducers revealed that the velocity of pore scale interfacial jumps often exceeds mean front velocity by more than 50 fold and represents a significant inertial component. A prototypic mechanistic model, two hydraulically coupled constricted capillaries, was developed to study the role of inertial force on interfacial jump dynamics and associated wetting liquid redistribution between neighboring pores. In agreement with experimental observations, we found the interfacial pore scale dynamics to be sensitive to variations in pore geometry and boundary conditions resulting in rich behavior of interfacial motions including consecutive throat invasions. Rapid pressure measurements and imaging also enabled quantification of the distinct invasion event size distribution. This and distribution of pressure-deduced pore spaces was found to be in remarkable agreement with geometrically-

deduced pore volumes. In contrast to the expectation of more frequently occurring consecutive jumps with increasing macroscopic front velocity, we found that invasion event sizes were reduced due to the increasing role of viscous dissipation and shorter opportunity times for evacuation. The cumulative distribution of associated pressure fluctuations was found to follow an exponential distribution with a remarkable cutoff with the onset of simultaneous invasion events.

To broaden the treatment of the inertial force in the dynamic description of pore scale processes, we developed a pore throat network model that focuses on dynamic invasion and exchange processes at the displacement front considering inertial force and capillary, viscous, and gravitational forces. We focused on the role of inertia on the resulting (local) interfacial jump velocities, displacement patterns, and invasion event size distributions. Although inertia enabled invasion of smaller throats (compared to the case of no inertia), the resulting phase entrapment (residual saturation) remained unaffected suggesting that inertia have only a minor effect on the resulting hydrological properties behind the front (the results are not likely to be affected by considering porous media with smaller and more heterogeneous pore sizes).

The study provides new insights into the pore scale “engine” that drives the macroscopic motion of fluid displacement fronts in porous media. The characteristics of pore scale invasion events paint a complex picture of rapid and inertial strongly dissipative interfacial motions with considerable release of interfacial energy in the form of elastic waves. Although it was not possible to link differences in such motions (with and without inertia) to residual liquid phase entrapment, the treatment opens the door for systematic quantification of mixing and colloid mobilization at the front and provides a glimpse into cascade of instabilities that mobilize fluid fronts beyond the standard Stokes-based description used in the foundation of most macroscopic (unsaturated) flow models. The experimental and theoretical front invasion models revealed new and interesting patterns of what “pores” are and how invaded volumes compare with geometrically-determined pore spaces. Generalization of the results of this work would require considering of porous media with a broader pore size distribution and addressing challenges related to contact line motions, applications to mixing and colloid/virus mobilization, and potentially passage of fronts across wettability and textural contrasts.

Zusammenfassung

Wenn ein Fluid des porösen Mediums durch ein anderes verdrängt wird, bildet sich eine scharfe als ‚Front‘ bezeichnete Grenze zwischen den beiden Fluiden. Die Dynamik und die Charakterisierung solcher Fronten in porösen Medien ist von grosser Bedeutung für verschiedene Fachgebiete, angefangen von der Hydrologie (Drainage und Infiltration, präferentielle Fliesswege) über die Erdölfördertechnik bis hin zu zahlreichen industriellen Anwendungen. Die Fronten zeichnen sich durch scharfe Phasenübergänge und dem grossen Kontrast physikalischer Eigenschaften aus, welche von der klassischen makroskopischen Beschreibung von Mehrphasenflüssen abweichen. Die auf makroskopischer Skala scheinbar stetige und gleichmäßige Bewegung von Fronten besteht bei genauerem Hinsehen auf der Porenskala aus zahlreiche Sprüngen der Grenzflächen, die mit Drucksprüngen sowie einer schnellen Energiefreisetzung durch Verringerung der Oberfläche einhergehen. Die Dynamik an der Front beeinflusst auch die Verteilung der Restfeuchte und damit die hydraulischen Eigenschaften hinter der sich bewegenden Front. Die grundlegenden Fragen auf dem Weg zu einem besseren Verständnis von Fluidbewegung in porösen Medien sind zum einen die Charakterisierung der Grenzflächen-Dynamik auf der Porenskala, und zum anderen der Zusammenhang zwischen den dynamischen Prozessen auf der Porenskala und dem makroskopischen Verhalten an und hinter der Front.

In dieser Doktorarbeit werden experimentelle und theoretische Studien vorgestellt, die in einfachen porösen Medien systematisch den Einfluss der Grenzflächendynamik auf die Bewegung der Fluidfront quantifizieren. Wir haben uns darauf konzentriert, die vielfältigen Prozesse, bei denen an der Fluidfront Energie freigesetzt wird, durch das Aufzeichnen der akustischen Emission während der Drainage und Benetzung experimentell zu charakterisieren. Bei diesen Studien war es uns möglich, verschiedene abrupte Bewegungen und Formationen der Grenzflächen zu zählen, und es zeigten sich dabei Unterschiede zwischen Drainage und Benetzung. Darüber hinaus zeigte die Beobachtung von akustischer Emission, dass sich noch lange nach dem Stillstand der Front die Grenzflächenkonfiguration ändert.

Des Weiteren haben wir den Mechanismus der Abfolge von Grenzflächensprüngen auf Porenebene und die einhergehenden Kapillardrucke und die Umverteilung der Flüssigkeit untersucht. Die experimentelle Auswertung von Hochgeschwindigkeitsvideos und Drucksignalwandlern hat gezeigt, dass die Geschwindigkeit der Grenzschicht während eines Sprunges auf Porenskala die mittlere Geschwindigkeit der Fluidfront um mehr als das 50fache übertrifft und Trägheitskräfte relevant sind. Ein vereinfachtes mechanisches Modell von zwei hydraulisch verbundenen und periodisch verengten Kapillaren wurde entwickelt, um den

Einfluss der Trägheitskraft auf die Dynamik der Grenzflächensprünge und die einhergehende Flüssigkeitsumverteilung zwischen benachbarten Poren zu untersuchen. In Übereinstimmung zu unseren experimentellen Ergebnissen zeigten die Simulationen, dass die Dynamik der Grenzfläche auf der Porenskala sensitiv gegenüber Veränderungen der Porengeometrie und der Randbedingungen ist. Diese Sensitivität führt zu einem vielfältigen Verhalten der Bewegungen der Grenzschicht, einschliesslich des fortlaufenden Entleerens mehrerer aufeinanderfolgender Poren. Zeitlich hochaufgelöste Druckmessungen und Bildabfolgen ermöglichten es uns, die Größenverteilung der sich entleerenden Porenbereiche zu bestimmen. Diese ‚dynamische‘ Verteilung und die vom Drucksignal abgeleitete Größenverteilung der Porenräume stimmten bemerkenswert gut mit den geometrisch bestimmten Porenvolumina überein. Im Gegensatz zu der Annahme, dass mit zunehmender makroskopischer Geschwindigkeit der Front auch Sprünge über mehrere Poren häufiger vorkommen müssten, fanden wir heraus, dass die Größe der Eindringereignisse durch den zunehmenden Einfluss der viskosen Kräfte und die kürzeren Zeitfenster für Entleerung reduziert wurde.

Um den Einfluss der Trägheitskraft in der dynamischen Beschreibung der Prozesse auf Porenskala vertieft zu untersuchen, haben wir ein neues Poren-Netzwerk-Modell entwickelt, das neben der Gravitation, den viskosen Kräften und der Kapillarität auch die Trägheitskräfte miteinbezieht. Wir untersuchten den Einfluss der Trägheit auf die lokalen Sprunggeschwindigkeiten der Grenzschicht, auf die Muster der Fluid-Verdrängung und auf die Größenverteilungen der Eindringereignisse. Obwohl es nur durch Berücksichtigung der Trägheit möglich war, auch in kleinere Poren einzudringen, blieb der resultierende Phaseneinschluss (Restsättigung) hinter der Front gleich, was nahelegt, dass die Trägheit nur einen geringen Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften hinter der Front hat.

Die Studie zeigt neue Erkenntnisse über den „Motor“ auf der Porenskala, der die makroskopische Bewegung von Fluidfronten in porösen Medien antreibt. Die Charakterisierung von Eindringereignissen auf der Porenskala zeichnet ein vielschichtiges Bild schneller Grenzschichtbewegungen, die eine beträchtliche Menge an Oberflächenenergie in Form von elastischen Wellen freisetzen. Die präsentierten experimentellen und theoretischen Studien offenbarten zudem neue Einsichten über die Definition einer „Pore“ und wie man eingedrungene Volumina mit geometrisch bestimmten Porenräumen vergleichen kann. Die Arbeit eröffnet damit die systematische Quantifizierung der (i) Phasenverteilung an und hinter der Front in natürlichen porösen Medien, (ii) des Transportes und der Mobilisierung von Stoffen, Kolloiden oder Mikroorganismen, und (iii) der Instabilitäten von Fluidfronten jenseits der normalen auf Stokes basierenden Beschreibung, welche als Grundlage für die meisten makroskopischen Flussmodelle dient.