

Experimentelle Untersuchung von Mehrphasenfluss in porösen Medien

H. Graf¹, H.-J. Vogel und K. Roth

Der Einfluss der Gasdynamik auf die hydraulischen Eigenschaften poröser Medien ist besonders im Bereich nahe Wassersättigung von grosser Bedeutung. Um diese Zusammenhänge zu untersuchen, wurde neben den hydraulischen Eigenschaften simultan die Gasleitfähigkeit an homogenen und heterogenen Sandpackungen gemessen. Die kontinuierliche Messung der Luftleitfähigkeit erlaubt Rückschlüsse auf die mikroskopische und makroskopische Struktur der Probe. Hystereseeffekte konnten durch eine zusätzliche Messmethode untersucht werden.

Einleitung

Die Messung von hydraulischen und pneumatischen Eigenschaften an porösen Medien gestaltet sich oft sehr zeitaufwändig und umständlich. Proben müssen in verschiedene Messvorrichtungen ein- und ausgebaut werden, und ein Ent-/Bewässerungszyklus kann sehr lange dauern. Die zur Erleichterung dieser Messungen konzipierte Apparatur ist in Abbildung 1 dargestellt und wurde bereits von Graf *et al.* [2001] ausführlich vorgestellt. Mithilfe dieser Messanlage konnten nun die hydraulischen Eigenschaften poröser Medien (bisher gesintertes Borsilikatglas und geschütteter Sand) mithilfe von Multi-Step Outflow Experimenten ermittelt werden und simultan dazu konnte im gleichen Experiment die Gasleitfähigkeit bestimmt werden. Die gemessenen Daten stellen eine gute Grundlage für eine Modellierung der Zusammenhänge zwischen den hydraulischen und pneumatischen Eigenschaften der porösen Medien dar. Drei dieser Modelle werden mit den Messdaten verglichen.

Messmethode

Die hier präsentierten Ergebnisse wurden an einem geschütteten Sand mit einer Korngrößenverteilung zwischen 0.25-0.63mm gemessen. Die Probe wurde zur Messung einer Erstentwässerungskurve vollständig mit Wasser aufgesättigt. Die Randbedingung für das durchgeführte MSO Experiment, das neben der primären Ent- und Bewässerungskurve noch weitere "Scanning Zyklen" beinhaltet, sind in Abbildung 2 (oben) dargestellt. An die Gasphase wurde während des gesamten Experiments ein konstanter Druck von -0.04 kPa angelegt.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist wurde die Probe über ca. 72 Stunden entwässert wobei jede Stunde eine Messung der Luftleitfähigkeit vorgenommen wurde. Ebenso wurde mit der Bewässerung verfahren.

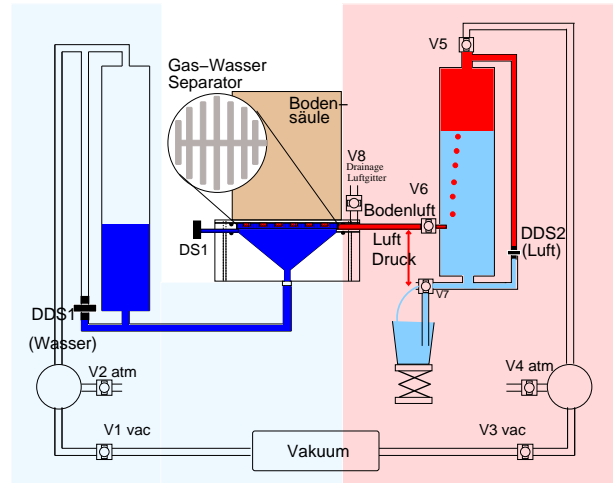


Abbildung 1: Messaufbau des erweiterten Multi-Step Outflow Experiments (MSO). Die poröse Sockelplatte ist so untergliedert, daß eine Separation der Gas- und Wasserphase möglich ist. Über den linken Teil der Anlage werden hydraulische Eigenschaften gemessen, rechts die Gasflusseigenschaften.

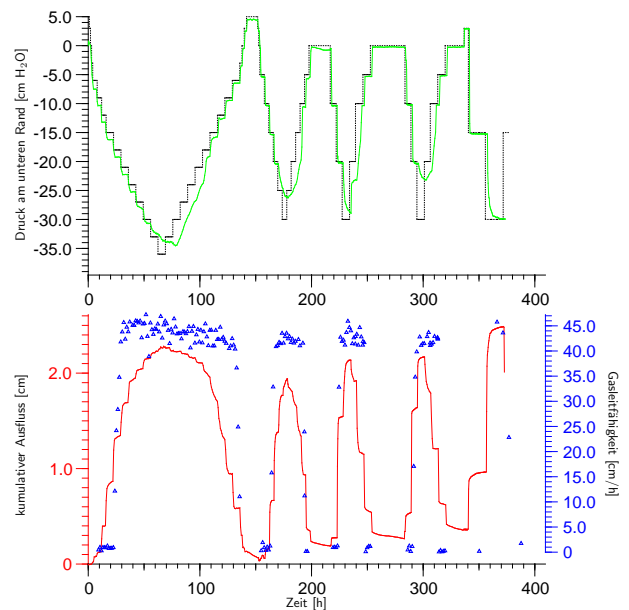


Abbildung 2: Oben: Randbedingungen für das MSO Experiment (Linie) und gemessener Tensiometerdruck (Symbole). Unten: Kumulativer Ausfluss (Linie) und Gasleitfähigkeit (Symbole)

Zur Untersuchung des Lufteintrittspunktes, ab dem die Gasphase kontinuierlich und die Gasleitfähigkeit >0 wird (Emergence- und Extinction Points für Ent- und Bewässerung) wurden noch vier weitere Scanning Zyklen gemessen, um die Stabilität dieser Punkte zu prüfen.

¹Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 229, D-69120 Heidelberg
email: hans.graf@iup.uni-heidelberg.de

Modell	Gassättigung	Gasleitfähigkeit	Referenz
VGM	$\bar{S}_{nw} = 1 - S_w$	$k_{nw} = \bar{S}_{nw}^{0.5} [1 - (1 - \bar{S}_{nw})^{1/m}]^{2m}$	Parker et al. [1987]
VGB	$\bar{S}_{nw} = 1 - S_w$	$k_{nw} = \bar{S}_{nw}^2 [1 - (1 - \bar{S}_{nw})^{1/m}]^m$	Dury et al. [1999]
EP	$\bar{S}_{nw,c}^* = \frac{S_{w,e} - S_w}{S_{w,e} - S_{w,r}}$	$k_{nw}(\bar{S}_{nw,c}^*) = (\bar{S}_{nw,c}^*)^{0.5} [1 - (1 - \bar{S}_{nw,c}^*)^{1/m}]^{2m}$ für $S_{w,r} < S_w < S_{w,e}$ $k_{nw}(\bar{S}_{nw,c}^*) = 0$ für $S_w > S_{w,e}$	Fischer et al. [1996]

Tabelle 1: Gasleitfähigkeitsmodelle: VGM nach Mualem-van Genuchten, VGB nach Burdine-van Genuchten, EP Emergence Point Modell. S bezeichnet die Sättigungen, k die relativen Leitfähigkeiten für die benetzende, w , und die nichtbenetzende Phase, nw . $\bar{S}_{nw,c}$ ist die Sättigung der kontinuierlichen Gasphase, $S_{w,e}$ die Wassersättigung am Emergence point.

Gasleitfähigkeitsmodelle

Es wurden drei verschiedene Gaspermeabilitätsmodelle untersucht, die auf der relativ einfach messbaren Wasserretentionskurve beruhen und sich auf eine Parametrisierung nach van Genuchten stützen. Anhand der Ausflussdaten der primären Ent- und Bewässerungskurven wurden die hysteretischen, hydraulischen van Genuchten Parameter bestimmt, die dann in die verschiedenen Modelle aus Tabelle 1 eingebracht wurden. Der Wert für die Emergencepointsättigung wurde aus der Messung bestimmt, sodass für die Bestimmung der Gasleitfähigkeiten kein zusätzlicher Fitparameter verwendet wurde.

Die Ergebnisse der Modellanpassung sind in Abbildung 4 dargestellt. Die klassischen Modelle von Parker und Dury, die dem van Genuchten Ansatz folgen beschreiben die Realität nicht ausreichend. Die von diesem Ansatz angenommene Kontinuität der Gasphase, die mit dem ersten Einsetzen der Entwässerung vorliegen soll, ist offensichtlich nicht gegeben. Beide Modelle beschreiben eine langsame Änderung der Gasleitfähigkeit bei hohen Wassersättigungen und sind nicht in der Lage den steilen Anstieg der in den Messdaten klar zu erkennen ist, zu beschreiben. Das Modell von Fischer berücksichtigt eine plötzlich eintretende Gasleitfähigkeit durch den zusätzlich eingeführten Parameter. Bis zur Sättigung $S_{w,e}$ gibt es überhaupt keine Gasleitfähigkeit, die erst ab diesem kritischen Wert gemessen werden kann. Das Modell passt deshalb deutlich besser zu den Messdaten. Der

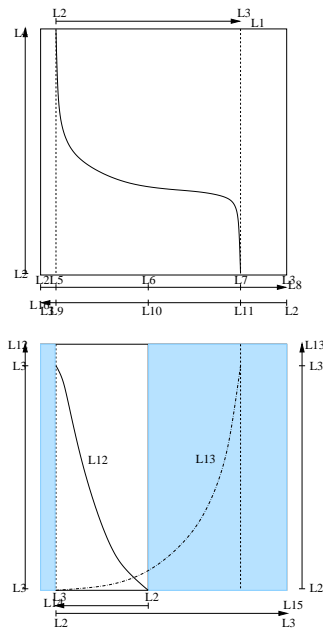


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Retentionskurve (oben) und relative Leitfähigkeitsfunktionen (unten) für die benetzende (gestrichelt) und die nichtbenetzende Phase (Linie). Die grauen Bereiche zeigen Bereiche in denen eine der Phasen nicht-kontinuierlich ist. Verschiedene Möglichkeiten zur Skalierung der Sättigungen werden dargestellt.

steile Anstieg der Gasleitfähigkeit kann durch die messbare Größe der Emergence-Point Sättigung besser dargestellt werden. Die in Abbildung 2 erkennbare Druck-Sättigungshysterese kann zusätzlich in die Modellierung der Gasleitfähigkeit eingebunden werden, hier kann zusätzlich der Extinction-Point bestimmt werden, die Sättigung, bei der die Leitfähigkeit beim Bewässern wieder verschwindet.

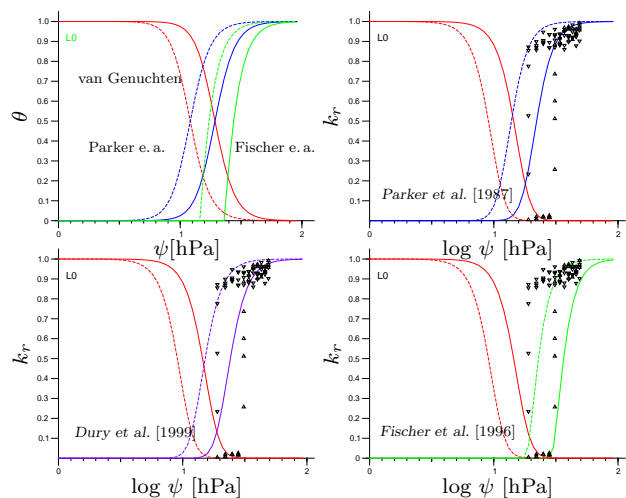


Abbildung 4: Angepasste Modelle: a) Druck Sättigungsbeziehung für beide Phasen. An die Entwässerungskurve (—) angepasste van Genuchten Parameter wurden in die Modelle von Parker et al. [1987] und Fischer et al. [1996] eingesetzt, um die Luftsättigung zu berechnen. Ebenso wurde mit der Bewässerungskurve (- - -) verfahren. b)-d) Relative Permeabilitäten der beiden Phasen mit jeweils angepasstem Modell. Die Messdaten der Gasleitfähigkeit sind ebenfalls für Ent- (Δ) und Bewässerung (∇) dargestellt.

Bibliographie

- Dury, O., U. Fischer and R. Schulin, 1999: A comparison of relative nonwetting-phase permeability models, *Water Resources Research*, **35**, 1481–1493.
- Fischer, U., R. Schulin and M. Keller, 1996: Experimental and numerical investigation of soil vapor extraction, *Water Resources Research*, **32**, 3413–3427.
- Graf, H., H.-J. Vogel and K. Roth, 2001: Experimenteller Ansatz zur Untersuchung von Mehrphasenfluss in porösen Medien, *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, **96**, 75–76.
- Parker, J., R. Lenhard and T. Kuppusamy, 1987: A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media, *Water Resources Research*, **23**, 618–624.