

Röntgenabsorptionsmessungen zur Quantifizierung hydraulischer Eigenschaften am Übergang von gesättigter zu ungesättigter Zone

A. Bayer¹, H.-J. Vogel und K. Roth

Zur Bestimmung hydraulischer Eigenschaften wird eine auf Röntgenabsorption basierende Methode vorgestellt. Damit ist es möglich, die Druck-Sättigungsbeziehung für grobkörnige Materialien in einem schnellen Experiment zu messen. Zur Überprüfung dieses Ansatzes werden die Messergebnisse mit einer van Genuchten Parametrisierung beschrieben, die dann benutzt wird um die Ergebnisse eines Multi-Step-Outflow Experiments, das an der selben Probe durchgeführt wurde, vorherzusagen.

Die Bestimmung hydraulischer Parameter poröser Materialien ist oft nur mit zeitintensiven Experimenten möglich. Es soll hier eine Methode gezeigt werden, die es ermöglicht diese Eigenschaften schnell zu messen. Damit soll es auch möglich werden zeitlich schnell variierende Prozesse zu betrachten. Das Prinzip der Messung beruht darauf, dass die lokale Änderung des Wassergehalts in einem porösen Medium zu einer Änderung in der Absorption von Röntgenstrahlung führt. Dadurch ist man in der Lage die räumliche Verteilung des Wassers im Medium zu analysieren. Bei hydrostatischem Gleichgewicht entspricht der Wassergehalt in verschiedenen Tiefen der Probe, dem Wassergehalt bei unterschiedlichem Matrixpotential. Damit erhält man einen Ausschnitt der Druck-Sättigungsbeziehung des Materials. Ziel dieser Arbeit war zu prüfen, inwieweit die so gewonnenen Ergebnisse mit denen aus einem klassischen Multi-Step-Outflow Experiment übereinstimmen.

Messmethode

Die hier gezeigten Daten wurden an einer homogenen Sandschüttung (Korngröße 0.63-1.25 mm) aufgenommen. Der Sand wurde in eine Säule mit Radius 8.15 cm und einer Höhe von 10.0 cm eingefüllt. Dann wurden Röntgenabsorptionsmessungen am trockenen, vollständig wassergesättigten und am entwässerten Material (Druck am unteren Rand $\psi = -3$ cm WS) durchgeführt. Dafür wurde wie in Abbildung 1 dargestellt ein CCD-Zeilendetektor mit 1280 quadratischen Pixeln der Kantlänge 0.4 mm und eine medizinische Röntgenröhre, die bei 141 kV Beschleunigungsspannung und 20.0 mA betrieben wurde, verwendet. Zur Messung wurde die Probe von unten nach oben durch synchrones Verschieben von Röhre und Detektor entlang der z-Achse gescannt. Die vertikale Auflösung ist durch die Größe der Detektorpixel gegeben. Horizontal wurde der Mittelwert aus 370 Pixeln um die Säulenmitte betrachtet. Durch diese Mittelung werden Effekte, die sich

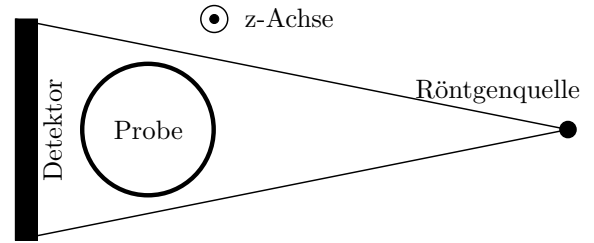


Abbildung 1: Skizze des experimentellen Aufbaus zur Messung der Röntgenabsorptionsdaten. Die z-Achse, entlang der gemessen wurde, zeigt aus der Bildebene heraus. Die Röntgenquelle emittiert einen Fächerstrahl auf einen Zeilendetektor.

aus Strukturen innerhalb des Materials ergeben (Korngröße vergleichbar mit räumlicher Auflösung), unterdrückt und das Signal-Rausch Verhältnis verbessert. Die Intensität $I(\theta, d)$ am Detektor nachdem der einfallende Strahl mit einer Intensität I_0 das Material der Dicke d mit Wassergehalt θ passiert hat wird durch

$$I(\theta, d) = I_0 \cdot e^{-\mu^*(\theta) \cdot d} \quad (1)$$

beschreiben. Dabei hängt der Absorptionskoeffizient μ^* bei gegebener Porosität Φ wie folgt vom Wassergehalt ab

$$\mu^*(\theta) = (1 - \Phi) \cdot \mu_{\text{Sand}} + \theta \cdot \mu_{\text{H}_2\text{O}} + (\Phi - \theta) \cdot \mu_{\text{Luft}} \quad (2)$$

wobei hier die Abhängigkeiten der Absorptionskoeffizienten μ_{\dots} von der Photonenenergie unberücksichtigt bleiben. Vernachlässigt man nun in Gl. 2 die Absorption der Luft, deren Absorptionskoeffizient um drei Größenordnungen kleiner ist als der von Wasser bzw. Sand kann aus den so gemessenen Daten der Wassergehalt nach

$$\theta(z) = \frac{\mu^*(\theta) - \mu^*(0)}{\mu^*(\theta_s) - \mu^*(0)} \cdot \theta_s \quad (3)$$

in den verschiedenen Probenhöhen berechnet werden. θ_s ist dabei der Sättigungswassergehalt, wobei dieser gleich der Porosität angenommen wird. Da die Höhe der Probe z im stationären Fall auch eine Potentialachse darstellt, ist nun der Wassergehalt in Abhängigkeit des Matrixpotentials ψ innerhalb eines Intervalls von 10 cm WS bekannt. An die so gewonnene Druck-Sättigungsbeziehung konnte dann die Parametrisierung nach van Genuchten

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot (1 + (\alpha \cdot \psi)^n)^{-1+1/n} \quad (4)$$

angepasst werden. Variiert wurden dabei n , α und der Restwassergehalt θ_r .

Zusätzlich wurde an der selben Probe ein klassisches Multi-Step-Outflow Experiment durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden mit denen aus dem Röntgenabsorptionsexperiment verglichen. Die Porosität ergab sich aus dem Säulenvolumen, der Dichte und der Masse des eingefüllten Materials zu $\Phi = 0.4$. Ausserdem wurde in einem unabhängig durchgeführten Experiment nach der Falling-Head Methode die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit $K_S = 1400$ cm/h gemessen werden.

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

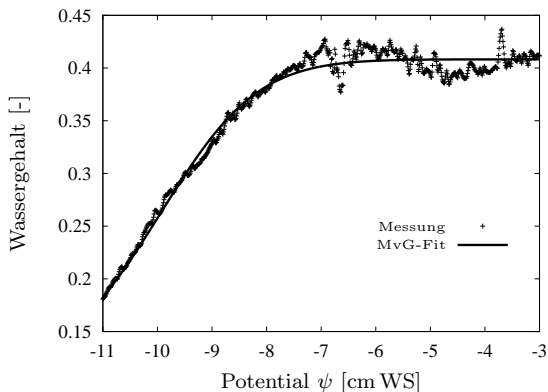


Abbildung 2: mit Röntgenabsorption gemessene Druck-Sättigungsbeziehung (Kreuze) und die angepasste van Genuchten Parametrisierung (Linie)

Ergebnisse und Diskussion

Aus den Absorptionsdaten konnte nun die Druck-Sättigungsbeziehung innerhalb eines Intervalls von $\psi = -13, \dots, -3$ cm WS gewonnen werden. Abbildung 2 zeigt die Messdaten (Kreuze) und die gefittete Druck-Sättigungsbeziehung (Linie). Der Fit berücksichtigt allerdings nur Werte mit $\psi > -11.5$ cm WS, da der obere Bereich der Säule durch ein Tensiometer gestört war. Mit Hilfe dieser Parameter und den separat gemessenen Werten für Porosität und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit konnte nun das Multi-Step-Outflow Experiment in guter Näherung vorhergesagt werden. Dieses wurde an der selben Probe durchgeführt. Über die Lösung des inversen Problems für die Richardsgleichung wurde daraus ein zweiter Parametersatz gewonnen, wobei die direkt gemessenen Parameter θ_s und K_s festgehalten wurden. Abb. 3 zeigt das Ergebnis für den Wasserausfluss und den Druckverlauf an einem Tensiometer. Die Parameter der verschiedenen Methoden sind in Tabelle 1 aufgeführt. Obwohl die gefittete Kurve die gemessenen Daten besser beschreibt, als die mit Hilfe der Röntgenabsorption getroffene Vorhersage, unterscheiden sich die Parameter der beiden Methoden nur wenig voneinander.

Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass über Röntgenabsorptionsmessungen der Wassergehalt mit hoher Genauigkeit und hoher räumlicher Auflösung gemessen werden kann. Der apparative Aufwand könnte durch einen vereinfachten Aufbau wesentlich reduziert werden. Der Wertebereich des Matrixpotentials wäre durch höhere Säulen leicht erweiterbar.

Parameter	Röntgenabs.	MSO-Fit
n [-]	10.7	11.6
α [cm ⁻¹]	0.0995	0.0959
θ_r [-]	0.08	0.09

Tabelle 1: Parameter der gefitteten van Genuchten Parametrisierung an die Röntgenabsorptionsdaten und der besten Simulation der Multi-Step-Outflow Daten.

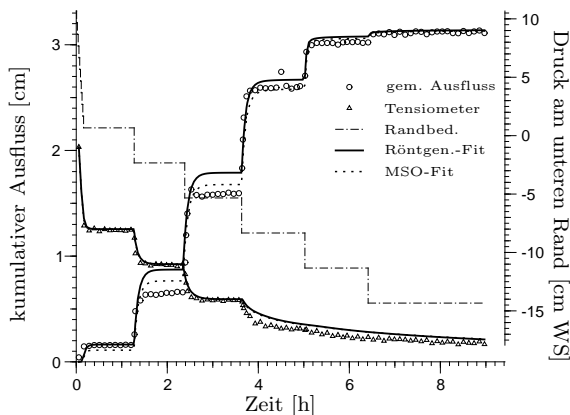


Abbildung 3: Gemessene Werte des Multi-Step-Outflow Experiments (kumulativer Ausfluss: Kreise, Matrixpotential acht Zentimeter über dem unteren Rand: Dreiecke) während der Entwässerung (Druck am unteren Rand: strichpunkt Linie) und die Modellvorhersage mit den Werten aus den Röntgenabsorptionsdaten (durchgezogene Linie). Zusätzlich ist noch die beste Anpassung des Modells (Punktlinie) an die MSO-Daten gezeigt. Die Modellkurven für die Tensiometerdaten liegen fast übereinander

Damit stünde dieses Verfahren auch für Routinemessungen der hydraulischen Eigenschaften zur Verfügung. Neben statischen Messungen erlaubt diese Methode Wassergehaltsprofile auch mit sehr hoher zeitlichen Auflösung zu messen. Damit öffnet sich eine vielversprechende Möglichkeit um dynamische Prozesse der Be- und Entwässerung zu untersuchen. Ein Beispiel zeigt Abb. 4. Hier wurde die Dynamik des kapillaren Aufstieges von Wasser in eine initial trockene Probe gemessen. Man erkennt zu Beginn einen schnellen Anstieg des Wassergehaltes bis zu einem kritischen Punkt, ab dem der Wassergehalt nur noch sehr langsam ansteigt. Hier manifestieren sich Mehrphasenphänomene die mit der Richardsgleichung nicht beschrieben werden können.

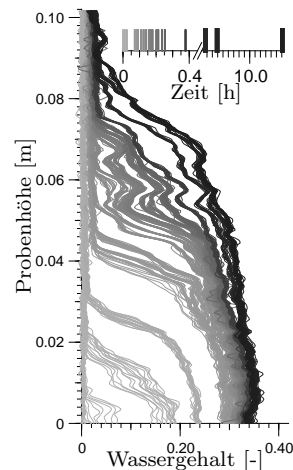


Abbildung 4: Wassergehalt zu verschiedenen Zeiten entlang der vertikalen Säulenachse, während des kapillaren Aufstieges von Wasser in die zu Beginn trockene Probe