

Experimentelle Untersuchungen zum Stofftransport bei transientem Wasserfluss

H.Lambrecht, H.-J. Vogel und K. Roth¹

Laborexperimente zur Bestimmung von Transportparametern in Böden werden typischerweise bei stationärem Wasserfluss durchgeführt und stellen letztlich den Ausgangspunkt zur Modellierung des Stofftransportes unter natürlichen Bedingungen dar. Insbesondere nahe der Bodenoberfläche ist der Wasserfluss jedoch häufig transient. In dieser Studie wurde die Phänomenologie des Stofftransportes unter transienten Bedingungen im Gegensatz zu stationären Bedingungen experimentell untersucht. Hierzu wurden Infiltrationsexperimente mit konservativen Tracern an 50 cm hohen Laborsäulen durchgeführt, in die gut definierte, heterogene Strukturen aus verschiedenen Sanden eingebaut wurden. Mit diesem experimentellen Aufbau wird die Bedeutung hydraulischer Strukturen für die Stoffverlagerung unter transienten Bedingungen demonstriert. Der Verlauf der gemessenen Durchbruchkurven kann im Rahmen eines konzeptionellen Modells durch die prinzipiell unterschiedlichen Prozesse erklärt werden, die den Transport gelöster Stoffe im Bereich der Infiltrationsfront und in einem Abstand dahinter bestimmen.

Experimente

In zwei Experimenten mit verschiedenen oberen Fluss-Randbedingungen wurde Stofftransport bei Infiltration in einen einfach strukturierten heterogenen Sand untersucht. In einer Laborsäule waren zylinderförmige Aggregate aus feinem Sand von einem vergleichsweise groben Sand umschlossen Abb. 1. Größe und Lage der Bereiche verschiedener hydraulischer Eigenschaften waren daher a priori bekannt. Beide Sande wurden ofentrocken eingebaut.

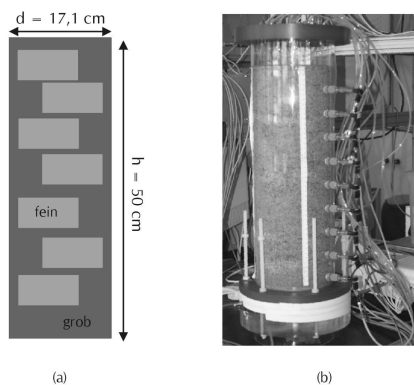


Abbildung 1: (a) Vertikaler Schnitt durch die Probe. (b) Laborsäule mit eingebauten Tensiometern.

Es wurde der Reihe nach mit einer Bromid-Chlorid-Lösung, einer reinen Chlorid-Lösung und vollentsalztem Wasser bei stets gleich bleibendem Fluss beregnet (Abb. 2).

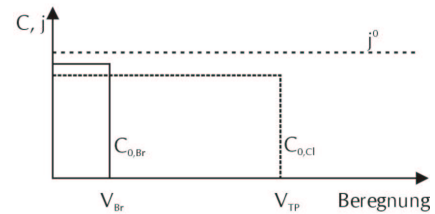


Abbildung 2: Schematische Darstellung der oberen Randbedingung für Tracerkonzentrationen C und Wasserfluss j^0 .

Das Volumen des Bromid-Pulses entsprach einem Drittel des Wasservolumens, das sich bei Sättigung im feintexturierten Bereich befindet. Mit diesem kurzen Tracer-Puls wurden die transienten Transportprozesse im Bereich der Infiltrationsfront untersucht. Das Chlorid wurde solange aufgegeben, bis Ausfluss am unteren Rand der Säule auftrat. So konnte im selben Experiment das stationäre Auswaschen des Chlorids aus dem heterogenen Boden untersucht werden.

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 3 zeigt die Bromid-Durchbruchkurven der Experimente mit $j^0 = 5$ cm/h (NF) und mit $j^0 = 60$ cm/h (HF). Beide Durchbruchkurven beginnen bei verschiedenen großen Anfangskonzentrationen $\tilde{C}(0)$ und zeigen auch insgesamt einen unterschiedlichen Verlauf.

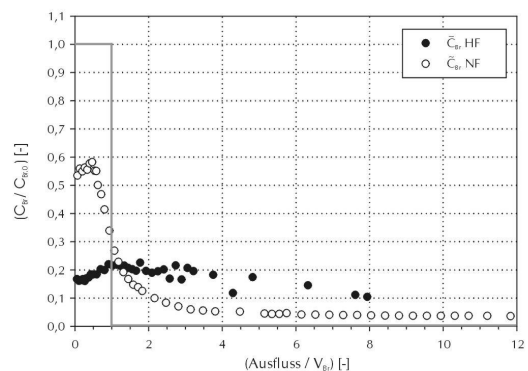


Abbildung 3: Durchbruchkurven für Bromid-Ionen. Kumulativer Ausfluss \tilde{V} und Konzentration \tilde{C} sind auf Volumen und Konzentration der Eingangslösung normiert. Die Durchgezogene Linie entspricht der Konzentrations-Randbedingung.

Bemerkenswert ist der anfängliche Anstieg und die bei kumulativen Ausflüssen $\tilde{V} > 0$ auftretenden Maxima. Für den Transport eines Tracers mit der Infiltrationsfront würde man ein Konzentrations-Maximum zu Beginn der Durchbruchkurven und einen sich anschließenden monotonen Abfall infolge von Dispersion erwarten. Man gelangt zu einem qualitativen Verständnis dieser charakteristischen Eigenschaft einer Infiltrations-Durchbruchkurve, wenn man in einem ersten, vereinfachenden Schritt die beiden Regionen des Bodens als mobil bzw. immobil auffasst. Im Bereich der Infiltrationsfront fließt das Wasser hauptsächlich entlang von

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

Gradienten im Matrixpotenzial in die feintexturierten Bereiche. Hinter der Infiltrationsfront stellt sich ein stationäres Fliessfeld ein, das durch Gradienten im Gravitationspotenzial getrieben wird. Ein Stoffaustausch zwischen den unterschiedlich mobilen Regionen findet dann nur noch langsam statt. Der kurze Bromid-Puls wird dadurch aus der mobilen Region geradezu “abgesaugt” und im anschließenden stationären Transportregime sehr lange dort zurückgehalten.

Die unterschiedlichen Flüsse in den Transportexperimenten führen zur Ausbildung komplementärer hydraulischer Strukturen im Boden [Roth, 1995]. Im NF-Experiment ist das fein texturierte im HF-Experiment das grob texturierte Material besser leitend. Abb. 4 zeigt die mit SWMS_2D [Šimunek et al., 1995] simulierte vertikale Wasserflüsse in einem fortgeschrittenen Stadium der Infiltration. In beiden Experimenten hat die fein texturierte Region, die wir einmal mit der mobilen (NF) und das andere mal mit der immobilen Region identifizieren (HF), den höheren Wassergehalt. Deshalb ist der relative Wassergehalt der immobilen Region bezogen auf den Wassergehalt der mobilen Region im HF-Experiment größer als im NF-Experiment. Entsprechend erwarten wir einen stärker ausgeprägten “Absaug-Effekt”. Dieser äußert sich tatsächlich in der kleineren Anfangskonzentration der Durchbruchskurve für Bromid im HF-Experiment.

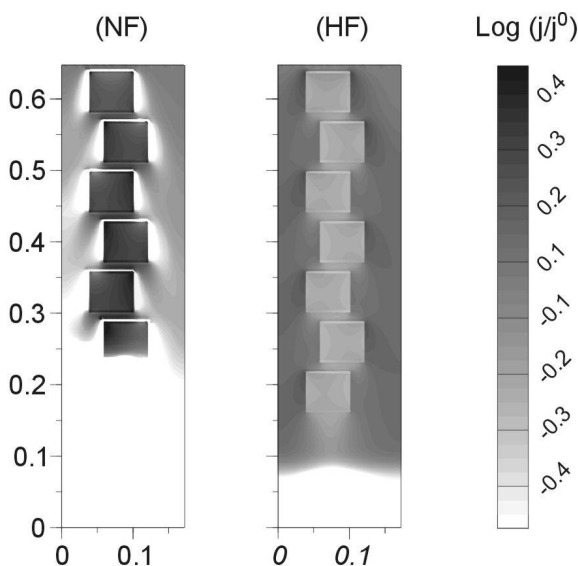


Abbildung 4: Mit SWMS_2D simulierte vertikale Flüsse. Die oberen Fluss-Randbedingungen entsprechen denjenigen aus den Experimenten.

Abb. 5 zeigt die Chlorid-Durchbruchskurven. Sie sind sich viel ähnlicher als die Bromid-Durchbruchskurven derselben Experimente. Obwohl das Auswaschen des Chlorids bei quasi-stationärem Fluss erfolgt, lässt sich die Form der Kurven nicht ausschließlich im Rahmen des Konvektion-Dispersion-Konzeptes verstehen. Im NF-Experiment fällt die Durchbruchskurve zunächst schneller, dann langsamer ab als im HF-Experiment. In diesem Verlauf zeigt sich deutlich der Stofftransport innerhalb der unterschiedlichen Regionen. Der steile Abfall ist auf das vergleichsweise schnelle Auswaschen des Tracers aus der mobilen Region zurückzuführen. Der

spätere langsame Abfall der Konzentration entspricht hingegen dem langsamen Austausch zwischen mobiler und immobil Region.

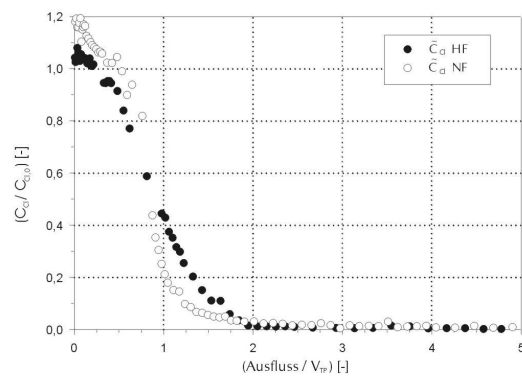


Abbildung 5: Durchbruchskurven für Chlorid-Ionen. Kumulativer Ausfluss \hat{V} und Konzentration \hat{C} sind auf Volumen und Konzentration der Eingangslösung normiert.

AUSBLICK

Derartige Prozesse können weitreichende Folgen, z. B. für den Schadstoffeintrag in natürliche Böden haben. Wird eine Substanz nach trockenen Bedingungen infiltriert, so dringt sie mit der Infiltrationsfront insbesondere in fein texturierte Bereiche. Durch die geringere Leitfähigkeit des feintexturierten Materials kann die transportierte Substanz unter Umständen sehr lange dort “gefangen” bleiben. Dadurch wird der Transport ins Grundwasser stark verzögert. Andererseits kann die hohe Konzentration eines toxischen Schadstoffes in den fein texturierten Bereichen zu Problemen führen. Die vorgestellten Experimente machen darüber hinaus deutlich, dass die Beregnungsstärke, neben den bekannten Einflüssen der Bodenstruktur, einen wesentlichen Faktor für das Verständnis von Stofftransport unter transienten Bedingungen darstellt.

ZITIERTE LITERATUR

- Roth, K., 1995: Steady state flow in an unsaturated, two-dimensional, macroscopically homogeneous, miller-similar medium, *Water Resour. Res.*, **31**, (9), 2127–2140.
- Šimunek, J., K. Huang and M. T. van Genuchten, 1995: The SWMS_3D code for simulating water flow and solute transport in three-dimensional variably-saturated media, Research Report 139, U.S. Salinity Laboratory, USDA/ARS, Riverside, CA.