

Wie homogen sind künstlich befüllte Zylinder?

TH. BAUMGARTL

Abstract

Für hydraulische und chemische Untersuchungen an Bodenproben oder Bodenmonolithen werden häufig Böden künstlich nachgeahmt durch Befüllung mit homogenisiertem Substrat. Hierdurch können erst Randbedingungen bodenchemischer oder bodenhydrologischer Natur definiert und kontrolliert werden. Aus künstlich in mehreren Schritten befüllten Bodensäulen wurden Teilproben (Stechzylinder) entnommen und auf ihre Wasserleitfähigkeit und Lagerungsdichte untersucht. Gleichzeitig wurden an den Bodenzylindern die räumliche Verteilung der Poren mit Hilfe von Computertomographiemessungen bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass es unerwartet keinen Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und gesättigter Wasserleitfähigkeit gibt. Die vertikale Verteilung der Lagerungsdichten, die mit Hilfe der Computertomographie ermittelt wurden, zeigen dagegen hohe Gradienten in der Dichte. Es ist damit zu erwarten, dass der Wasserfluss durch kleinräumige Dichtelagerungen kontrolliert wird. Die mittlere Lagerungsdichte ergibt hinsichtlich der Güte keine befriedigende Aussage, die Befüllung führte zu einer sehr heterogenen Dichteverteilung. Konsequenzen bezüglich Wasser- und Stofffluss sind zu erwarten und die Homogenität künstlich befüllter Bodenmonolithen in Frage zu stellen.

To determine the hydraulic and chemical characterisation of soils, samples are often used which are filled with homogenized material. This is often essential to define soil chemical and soil hydrological boundary conditions. Soil samples are extracted from artificially filled soil cylinders and their hydraulic conductivity and bulk density is determined. With a high resolution the spatial distribution of pores was determined with computer tomography tests. The results show, that there is other than expected no relationship between bulk density and hydraulic conductivity. However, the vertical

distribution of pores is on a small scale very heterogeneous as can be seen by the results of the computertomography tests. Hence water flow will be controlled by the smallest conductivity. Consequences in respect to water and element flux has to be expected and the homogeneity of artificially filled soil monoliths has to be questioned.

Ziel

Bodenproben wurden künstlich geschüttet und hinsichtlich bodenphysikalischer Kennwerte untersucht. Anschliessend wurden diese Ergebnisse verglichen mit computertomographischen Analysen, d.h. einer nicht destruktiven Analyse auf anderer Skalenebene.

Material und Methoden

Bodenphysikalische Untersuchungen

Als Substrat für die Untersuchungen wurde Diaton gewählt (Korngrößenverteilung: Sande: 35, U:1%, T:56%, Proctordichte 1.67 g cm^{-3}). Das Material wurde zunächst homogenisiert (Sie-

bung $< 2 \text{ mm}$). Anschließend wurde der Diaton mit Wasser besprüht und gerührt um künstliche Miniaggregate von ca. 2-3 mm Durchmesser zu erzeugen. Das Material wurde luftgetrocknet und anschließend wiederum befeuchtet. Um eine optimale Verdichtbarkeit zu gewährleisten, richtete sich der Befeuchtungswassergehalt nach dem Proctor-Wassergehalt des Diatonmaterials von 20 Gew-%. Zur Befüllung der Stechzylinder wurde nahe dem Proctor-Wassergehalt sowohl ein Wassergehalt auf nassen, als auch auf dem trockenen Ast der Proctor-Kurve gewählt, um unterschiedliche Verdichtungseffekte durch Aggregatzerstörung zu erzielen. Dies entsprach Wassergehalten von ca. 22 % bzw. 18 %. In den folgenden erläuterten Versuchen werden diese mit D-I bzw. D-II bezeichnet. Fünf übereinandergestellte Plexiglaszylinder (Höhe 40 mm, Innen-Durchmesser: 54 mm) wurden in eine diese Zylinder umfassende Hülse gestellt. Die Befüllung wurde in 3 Stufen unterteilt, wobei nach jedem Verdichtungs Vorgang eine gleiche Lagerungsdichte herrschen sollte. Als

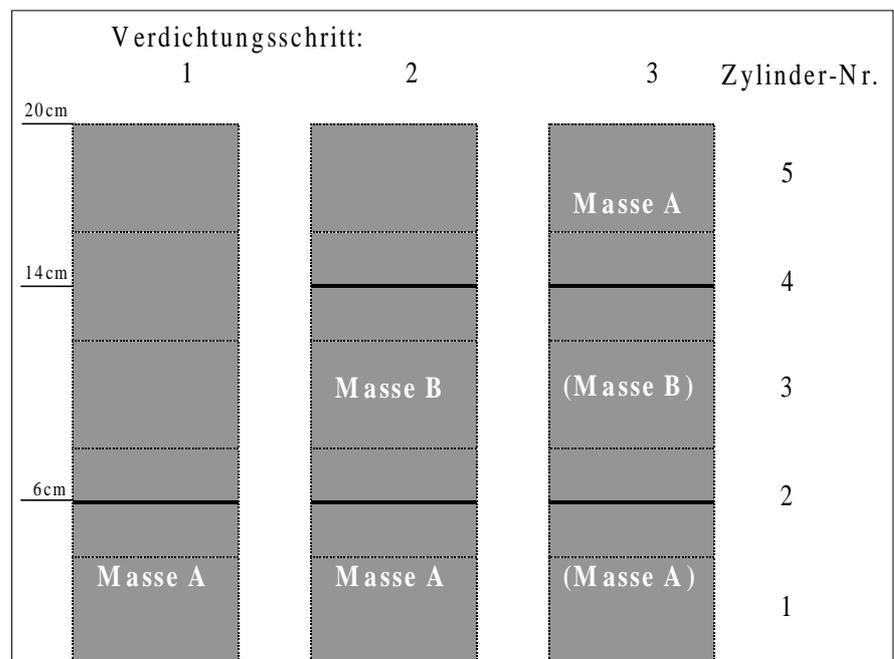


Abbildung 1: Vorgehensweise der Befüllung

Autor: Dr. Thomas BAUMGARTL, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, D-24118 KIEL

Tabelle 1: Bodenphysikalische Größen

	D-I		D-II	
	dB [g/cm ³]	Kf [cm/s]	dB [g/cm ³]	Kf [cm/s]
1	1.303	2.56E-05	1.327	1.68E-05
3	1.300	6.10E-06	1.113	1.52E-04
5	1.315	3.00E-04	1.187	1.31E-05
2	1.280	3.57E-05	1.110	2.08E-05
4	1.315	2.40E-05	1.179	1.80E-05

durchschnittliche Gesamtlagerungsdichte wurde ein Wert von $\text{dB} = 1.33 \text{ g/cm}^3$ bzw. 1.22 g/cm^3 angestrebt. An den Bodenproben D-II wurde zusätzlich die Porengrößenverteilung in erster Linie der Grobporen auf keramischen Platten mit Hilfe von Unterdruck bestimmt. Als Entwässerungsstufen wurden hierzu -1, -2, -3 und -6 kPa gewählt.

Computertomographische Untersuchungen

Die Bodenproben wurden im Röntgen-Computertomographen in liegender Position gescannt (Schichtdicke 2 mm, Schichtabstand 2 mm). Berechnet wurden hieraus die Hounsfield-Einheiten der Schichten sowie die Standardabweichungen, die als Maß für die Dichtelagerung und die Homogenität der Bodenproben herangezogen werden können.

Ergebnisse

Bestimmung von gesättigter Wasserleitfähigkeit und Lagerungsdichte des Gesamtbodens

Die Lagerungsdichte wurde bestimmt durch Trocknung des Gesamtbodens nach den Untersuchungen bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Wasserleitfähigkeit errechnet sich aus drei aufeinanderfolgenden Messungen an einem Zylinder. Tabelle 1 fasst die gemessenen und die daraus z.T. abgeleiteten Ergebnisse zusammen.

In der Analyse der Lagerungsdichte fällt auf, dass die Werte sehr variabel sind. Sie umspannen einen Bereich von 1.28 bis 1.32 g/cm^3 in D-I und 1.11 bis 1.33 g/cm^3 in D-II, obwohl die Bodenmenge und Füllhöhe so definiert waren, dass sich in etwa gleiche Lagerungsdichten ergeben sollten und obwohl die gewählte Lagerungsdichte weit unter der Proctor-Dichte als maximal zu erzielende Dichte liegt.

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit nimmt in einem Substrat mit abnehmender Porenziffer aufgrund der Verringerung des Fließquerschnittes ab. Diese Abnahme lässt sich häufig durch logarithmische Anpassungen beschreiben. Zwischen Wasserleitfähigkeit und Lagerungs-

dichte lässt sich kein Zusammenhang herstellen.

Bestimmung der Lagerungsdichte aus computer-tomographischen Messungen

Aus den Ergebnissen der CT-Untersuchung wurde für jede gescannte 2 mm Schicht die Lagerungsdichte bestimmt und als Tiefenverteilung dargestellt. Abbildung 2 zeigt die Abfolge der Lagerungsdichte des Gesamtzylinders für beide Untersuchungsvarianten. Die Untersuchungsserie D-I zeigt für die Zylinder 1, 3 und 5 relativ gleiche Lagerungsdichten, der Schwankungsbereich der Werte liegt bei ca. $0.02\text{-}0.04 \text{ g/cm}^3$. Zylinder 2 und 4 lassen eindeutig einen Sprung in der Lagerungsdichte an der Grenzfläche der Verdichtungsebenen erkennen. Die Lagerungsdichte ändert sich dort abrupt um ca. 0.1 g/cm^3 . Der maximale Unterschied der Gesamtlagerungsdichte zwischen den Zylindern ist jedoch kleiner als 0.25 g/cm^3 .

Die Lagerungsdichteverteilung von Serie D-II zeigt große Inhomogenitäten an. Die Lagerungsdichteänderung ist vor allem in Zylinder 2 mit 0.3 g/cm^3 sehr hoch, obwohl die Gesamtlagerungsdichte mit Zylinder 4 nahezu identisch ist. Zylinder 4 lässt in der Mitte der Probe eine Verdichtungsschicht erkennen. Jedoch sind die Differenzen der Lagerungsdichte wesentlich kleiner. Die Ergebnisse zeigen, dass innerhalb eines Zylinders große Änderungen der Lagerungsdichte herrschen können, die sich bei der summierenden Analyse des Gesamtzylinders nicht widerspiegeln.

Schlussfolgerungen

- Es gibt keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen gesättigter Wasserleitfähigkeit und Lagerungsdichte, da die Wasserleitfähigkeit über die kontinuierlichste Pore mit dem größten Durchmesser gesteuert wird (Hagen-Poiseuille) und nicht über den Mittelwert der Lagerungsdichte einer Schicht.
- Die tatsächlichen Fließpfade sind entscheidend für eine porenbezogene Quantifizierung von chemischen Austauschreaktionen und Stoffflüssen.
- Können Ergebnisse von künstlich geschütteten Säulen verwendet werden bzw. auf andere Skalen übertragen werden?

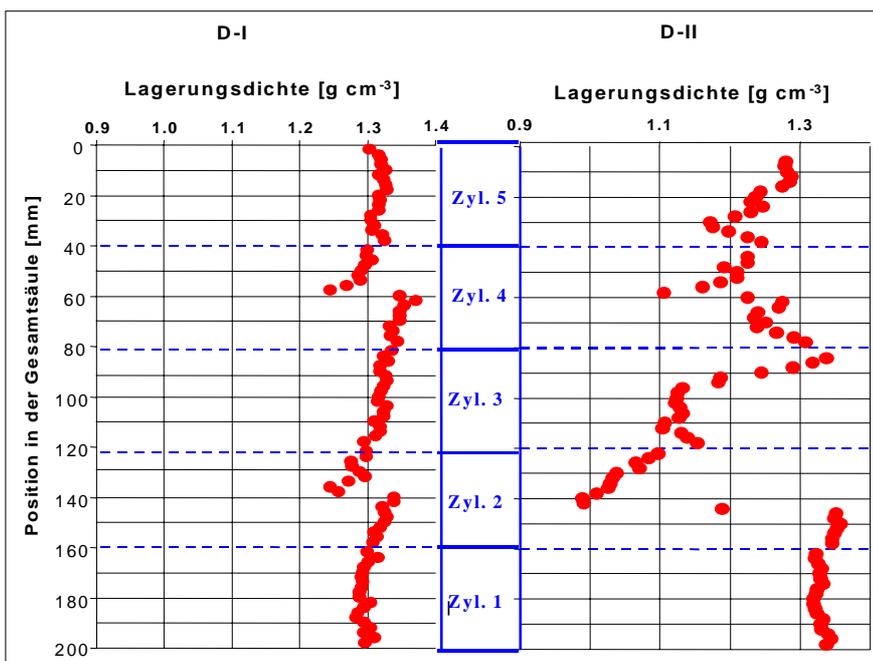


Abbildung 2: Lagerungsdichteverteilung (2 mm-Schichten) innerhalb der Stechzylinder, dargestellt für die Gesamtsäule