

# Monolithischer oder händischer Aufbau von Lysimetern - Folgerungen für die Lagerungs- und hydraulischen Parameter

Dietmar Klotz<sup>1</sup>

## Abstract

Beim händischen Aufbau von Lysimeterböden werden die Horizontsedimente versuchstechnisch dicht („gestört“) eingebaut, um ein unkontrolliertes Nachsacken beim Durchströmen zu vermeiden. I. a. unterscheidet sich diese gestörte, dichte Lagerung der Sedimente von der natürlichen Ablagerung monolithischer Lysimeterböden. Verschiedene totale Porositätswerte bewirken aber Unterschiede in den Wassergehalten, in den hydraulischen Parametern und letztlich in den Sickerwassergeschwindigkeiten beider Lysimetertypen.

## Einleitung

Böden für Lysimeter können nicht monolithisch unter Erhalt der natürlichen Lagerung genommen (ausgestochen) werden

- bei zu großer Körnung der Horizontsedimente (Grobsande und Kiese),
- bei zu geringer Feuchte der Bodenmatrix,
- in unzugänglichen Gebieten (Wald, Hanglagen) oder
- bei zu großen Dimensionen der Böden ( $> 5 \text{ m}^3$ );

sie müssen dann händisch in die Lysimetergefäße eingebaut werden. Dabei werden einige Texturmerkmale (Schichtungen und Inhomogenitäten) und das Strukturmerkmal Lagerung natürlicher Böden verändert. Auch ist zu beachten, dass aus Kostengründen beim Aufbau mehrerer Lysimeterböden der kostengünstigere, händische Lysimeteraufbau gewählt werden muss.

Im Folgenden wird über den Einfluss von Gefüge- und Lagerungsänderungen von oberflächlich entnommenen, bindigen und sandigen Sedimenten auf ihre hydraulischen Parameter (Durchlässigkeit, effektive Porosität, Dispersivität) berichtet.

Die Untersuchungen wurden nach der Entnahme/dem Aufbau von 7 GSF-Lysimeterböden (36 Gefäßlysimeter) im Zeitraum 1996 – 2002 an 19 Lockersedimenten unter natürlicher Ablagerung und unter gestörter, versuchstechnisch dichter Lagerung durchgeführt (KLOTZ 2002 und 2007 a).

## Grundlagen

Die natürliche Lagerung eines Sediments wird beeinflusst durch die Ablagerungsart (z. B. äolisch, fluviatil, fluvioglazial) und durch die Auflast sowie durch einige Sedimenteigenschaften (Körnung für Sande und Kiese, Oberflächenladung für bindige Sedimente).

Die Kennzeichnung der Porenraumgröße („Lagerung“) erfolgt durch die **totale Porosität**  $n$

$$n = V_p/V. \quad (1)$$

$V_p$  = Gesamtporenraum des Sediments

$V$  = Gesamtvolumen (Feststoff- und Porenvolumen).

Die totale Porosität eines Sediments bestimmt neben weiteren sedimentphysikalischen Parametern (Körnung, Kornform, Kornrauigkeit und –splittrigkeit, Gefüge), der Feuchte des Sediments sowie physikalischen Parametern des Wassers (Dichte, Zähigkeit) die hydraulischen Parameter der Lockersedimente (KLOTZ 1992); sie sind für wassergesättigtes Fließen definiert durch:

- Die **Durchlässigkeit**  $k$  ist ein Maß für den Widerstand, den das Korngerüst dem strömenden Wasser entgegensetzt (Darcysches Gesetz)

$$k = v_f/i. \quad (2)$$

$v_f$  = Filtergeschwindigkeit

$i$  = Gefälle.

- Die **effektive Porosität**  $n_e$  ist ein Maß für das Wasservolumen, das am Fließvorgang teilnimmt

$$n_e = v_f/v_a. \quad (3)$$

$v_a$  = Abstandsgeschwindigkeit.

Sie ist um einen Prozentsatz der Tot- und Haftwasserbereiche kleiner als die totale Porosität.

- Die **longitudinale Dispersivität**  $\alpha$  ist ein Maß für die mechanische Vermischung von Wasserinhaltsstoffen (KLOTZ 1992)

$$\alpha = D/v_a^{1,07}, \quad (4)$$

$D$  = longitudinaler Dispersionskoeffizient,

mit den Benennungen  $\alpha$  [cm],  $D$  [cm<sup>2</sup>/s] und  $v_a$  [cm/s].

## Eingesetzte Sedimente und Messmethoden

Bei der monolithischen Gewinnung von drei GSF-Lysimeterböden und bei der Entnahme von Horizontsedimenten zum händischen Aufbau von vier GSF-Lysimeterböden wurden in unmittelbarer Nähe der Entnahmeorte von den feinkörnigen (bindigen und sandigen) Horizonten

- Sediment unter natürlicher Lagerung (I) durch Stechzylinder ausgestochen und
- Sediment lose (II) entnommen.

Die Stechzylinder bestehen aus Messing von 1 mm Wandstärke (an einem Ende konisch zugespitzt), 38 mm (bzw. 50 mm) Durchmesser und 100 mm (bzw. 250 mm) Länge. Sie

<sup>1</sup> Helmholtz-Zentrum München, Institut für Grundwasserökologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 NEUHERBERG, dietmar-klotz@t-online.de

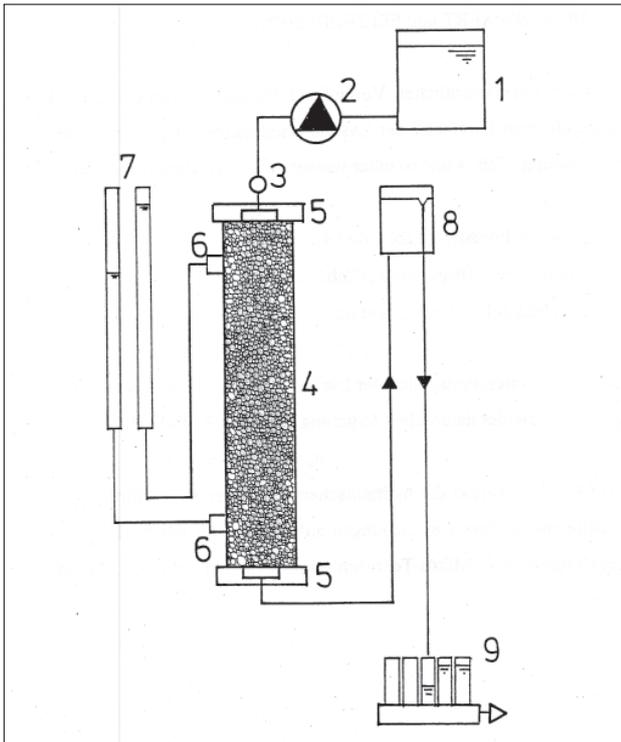


Abbildung 1: Schematische Darstellung der eingesetzten Säulenapparatur. 1 = Wasserreservoir, 2 = Schlauchpumpe, 3 = Infusionszwischenstück für Tracer, 4 = Säule vom Typ I oder II, 5 = Verteiler, 6 = Manometeranschlüsse, 7 = Standrohranordnung, 8 = Niveaugefäß, 9 = Probensammler.

wurden im Ein- und Auslauf mit frittenbestückten Verteilern gefasst: **Säulentyp I** zur Parameterbestimmung unter natürlicher Lagerung.

Das lose entnommene Sediment wurde unter Wasser verdichtet („versuchstechnisch dichte Lagerung“) in Acrylglassäulen (KLOTZ 1992) von 50 mm Durchmesser und 250 mm Länge eingebaut: **Säulentyp II** zur Parameterbestimmung unter gestörter Lagerung.

Die Säulen beider Typen wurden in GSF-Säulenapparaturen eingebaut (Abbildung 1). In diesen Anordnungen wurden zunächst durch Traceruntersuchungen und Gefällemessungen die hydraulischen Eigenschaften, durch Tensiometerversuche die Porengrößenverteilungen und beim Abbau der Säulen die totalen Porositäten bestimmt (KLOTZ 1992).

Als Sedimente wurden 4 Schluffe und 15 Sande der 7 bis 2002 entnommenen/aufgebauten GSF-Lysimeterböden eingesetzt.

## Ergebnisse

### Lagerungsparameter

Die versuchstechnisch dichte („gestörte“) Lagerung der eingesetzten Lockersedimente in den Acrylglassäulen wurde erreicht durch Einbau der Sedimente in dünnen Schichten ( $\leq 2$  cm) unter Wasser (Schluffe mit aufgesetztem Unterdruck) und anschließendem Verdichten durch Stampfen mit einem Rundstab und Klopfen von außen mit einem

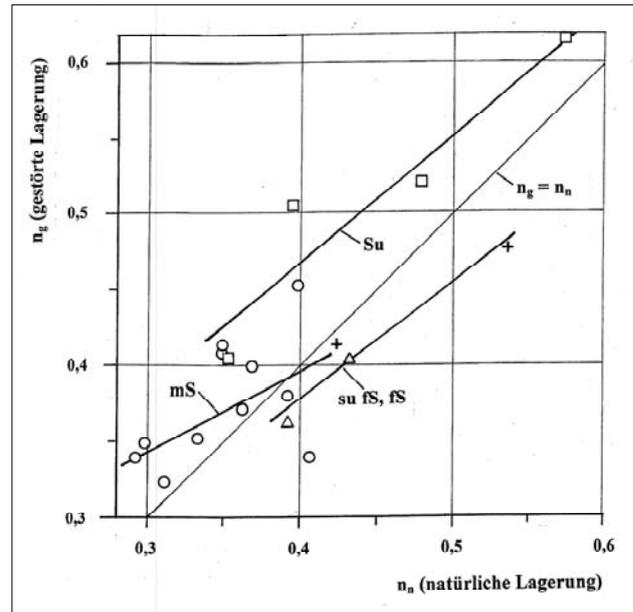


Abbildung 2: Totale Porositäten der untersuchten Lockersedimente bei gestörter Lagerung  $n_g$  in Abhängigkeit der totalen Porositäten unter natürlicher Lagerung  $n_n$ . Messpunkte  $\square$ : Schluffe (Su), +: schluffige Feinsande (Su - fS),  $\Delta$ : Feinsande (fS),  $\circ$ : Mittelsande (mS).

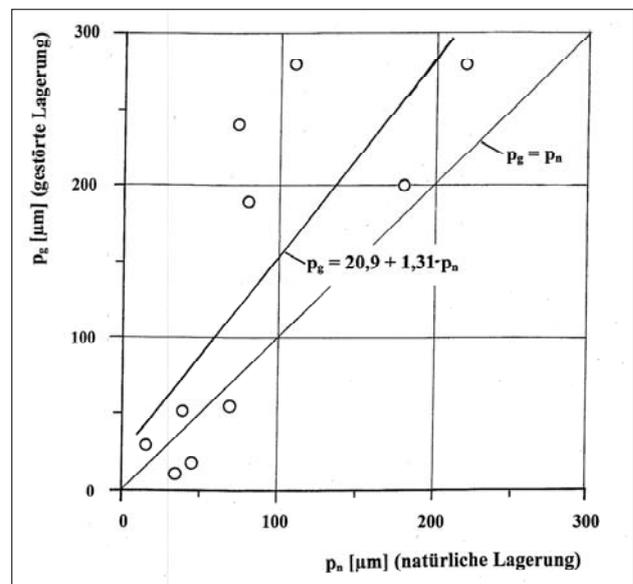


Abbildung 3: Mittlere Porengrößen der Mittelsande bei gestörter Lagerung  $p_g$  in Abhängigkeit der mittleren Porengrößen unter natürlicher Lagerung  $p_n$  ( $r$  = Korrelationskoeffizient).

Kunststoffhammer (KLOTZ 1992). Die Lagerungsdichten sind für homogenisierte Materialien sehr gut reproduzierbar ( $\leq 5\%$ ), für dieselben, natürlich abgelagerten Materialien sind die totalen Porositäten mit einem größeren Fehler ( $\leq 15\%$ ) behaftet (Ursache: Auftreten von Inhomogenitäten).

Die Ergebnisse, d. h. die totalen Porositäten  $n_g$  bei gestörter Lagerung in Abhängigkeit der Porositäten  $n_n$  unter natürlicher Lagerung streuen stark um die Gerade  $n_g = n_n$  (Abbildung 2). Betrachtet man die untersuchten Sedimente

**Tabelle 1: Regressions-Ergebnisse  $x_g = a + b x_n$  der totalen Porositäten (n), der mittleren Porengrößen (p), der effektiven Porositäten (n<sub>e</sub>) und der longitudinalen Dispersivitäten (α) sowie  $\lg k_g = a^* + b^* \lg k_n$  der Durchlässigkeiten (k) bei gestörter (Index: g) und unter natürlicher Lagerung (Index: n).**

	n	p	n <sub>e</sub>	α [cm]	k [cm/s]
<b>SCHLUFF (Anzahl: 4)</b>					
a	0,132	0,204			
b	0,841	0,154			
r	0,941	0,991			
<b>SCHLUFFIGE FEINSANDE und FEINSANDE (Anzahl: 4)</b>					
a	0,074	23,2		0,543	
b	0,761	-0,179		1,52	
r	0,970	-0,648		0,673	
<b>MITTELSANDE (Anzahl: 11)</b>					
a	0,187	20,9	0,176	0,873	0,084*
b	0,523	1,31	0,484	0,731	1,016*
r	0,553	0,769	0,785	0,778	0,697*

der Korngrößenbereiche Schluffe (Anzahl: 4), Feinsande (4) und Mittelsande (11) so folgt (Abbildung 2, Tabelle 1):

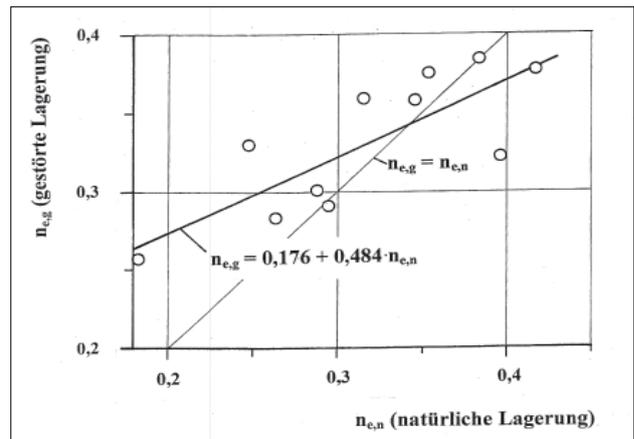
1. Die natürlich gelagerten 4 Feinsande und 2 Mittelsande sind nicht dicht gelagert, sie reagieren durch „Klopfen“ mit Einsacken. Alle 4 Schluffe zeigen keine Reaktion.
2. Die totalen Porositäten der **Schluffe** bei gestörter Lagerung sind ca. 10 % größer als unter natürlicher Ablagerung. Möglicherweise hat sich nach dem gestörten Einbau wegen der großen Oberflächenladungen das Aggregatgefüge noch nicht vollständig eingestellt (KLOTZ 2003). Die lineare Regression zwischen n<sub>g</sub> und n<sub>n</sub> ist gut reproduzierbar (Tabelle 1, Korrelationskoeffizient r = 0,941).
3. Die totalen Porositäten der Feinsande bei gestörter Lagerung sind bis 10 % kleiner als unter natürlicher Lagerung (Ursache s. 1.). Die Korrelation zwischen n<sub>g</sub> und n<sub>n</sub> ist sehr gut (Tabelle 1, r = 0,970).
4. Die Porositätsergebnisse der **Mittelsande** liegen oberhalb (82 % der Mittelsande) und unterhalb (18 %) der Geraden n<sub>g</sub> = n<sub>n</sub>. Die Korrelation zwischen den Porositäten ist schlecht (Tabelle 1, r = 0,553), da die untersuchten Mittelsande unterschiedliche Ungleichförmigkeitsgrade und verschiedene Korngeometrien aufweisen.

Direkten Einfluss haben die unterschiedlichen Porositätsergebnisse auf die Porengrößen-Verteilungen. Für Mittelsande sind vielfach die mittleren Porengrößen bei gestörter Lagerung größer (bis Faktor 3, *Abbildung 3*) als unter natürlicher Lagerung (Korrelationskoeffizient der linearen Regression r = 0,769, *Tabelle 1*).

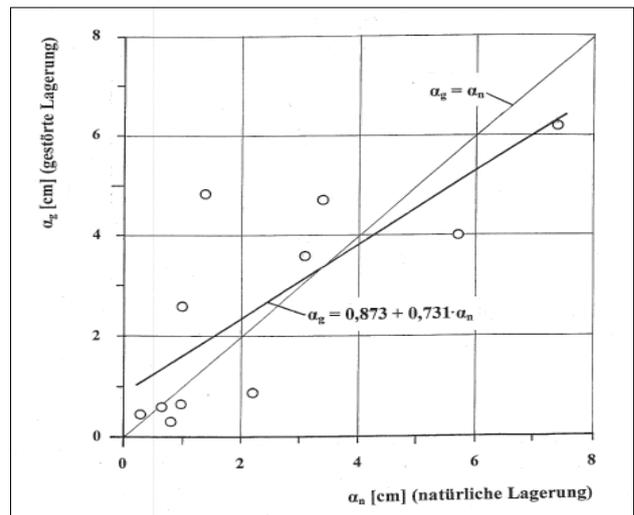
### Hydraulische Parameter

Da die hydraulischen Parameter abhängig sind von der totalen Porosität, werden sie für unterschiedliche Lagerungsdichten verschiedene Werte annehmen:

1. Die mit Tracerversuchen bestimmten **effektiven Porositäten** (nach Gl. (3)) und **longitudinalen Dispersivitäten** (nach Gl. (4)) streuen stark um die Geraden n<sub>e,g</sub> = n<sub>e,n</sub> bzw.



**Abbildung 4: Effektive Porositäten der untersuchten Mittelsande bei gestörter Lagerung n<sub>e,g</sub> in Abhängigkeit der effektiven Porositäten unter natürlicher Lagerung n<sub>e,n</sub> (r = Korrelationskoeffizient).**



**Abbildung 5: Longitudinale Dispersivitäten der untersuchten Mittelsande bei gestörter Lagerung α<sub>g</sub> in Abhängigkeit der Dispersivitäten unter natürlicher Lagerung α<sub>n</sub> (r = Korrelationskoeffizient).**

α<sub>g</sub> = α<sub>n</sub> (s. *Abbildung 4* bzw. *5* für Mittelsande), da beide hydraulische Parameter stark auf geringe Inhomogenitäten im Mikrobereich reagieren. Die Ergebnisse n<sub>e,g</sub> (bzw. α<sub>g</sub>) in Abhängigkeit von n<sub>e,n</sub> (bzw. α<sub>n</sub>) korrelieren (*Tabelle 1*) mit Koeffizienten r ≈ 0,8.

2. Die mit Gefällemessungen bestimmten **Durchlässigkeiten** der 19 Sedimente bei gestörter und unter natürlicher Lagerung sind ebenfalls stark unterschiedlich (sie streuen bis Faktor 5 um die Gerade  $\lg k_g = a^* + b^* \lg k_n$ ). Für Mittelsande korrelieren die  $\lg k_g$  - und die  $\lg k_n$  -Ergebnisse nur schwach (*Abbildung 6*, r = 0,697, s. *Tabelle 1*).

### Schlussfolgerungen

Die an 19 GSF-Lysimeter-Sedimenten bei gestörter (versuchstechnisch dichter) Lagerung und unter natürlicher Lagerung durchgeführten Versuche zur Bestimmung der

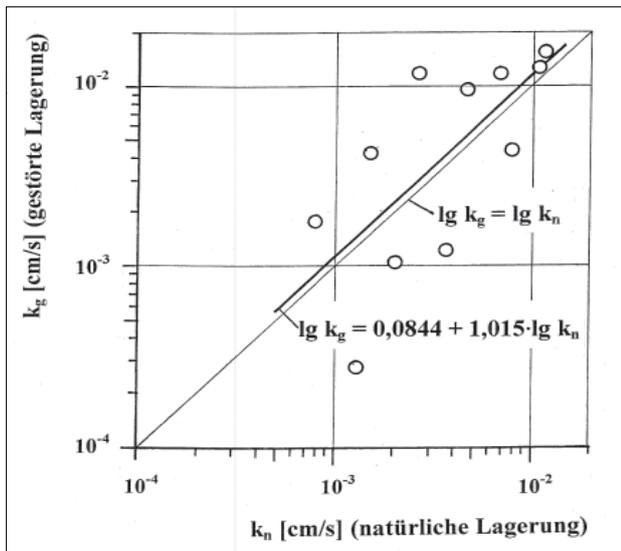


Abbildung 6: Durchlässigkeiten der untersuchten Mittelsande bei gestörter Lagerung  $k_g$  in Abhängigkeit der Durchlässigkeiten unter natürlicher Lagerung  $k_n$  ( $r$  = Korrelationskoeffizient).

totalen Porositäten und der hydraulischen Parameter unter wassergesättigten Bedingungen erbringen für den Aufbau von Lysimetern wichtige Ergebnisse:

1. Beim händischen, horizontweisen Aufbau von Lysimetern
  - sind sehr gut die Strukturmerkmale Körnungseigenschaften (Kornverteilung, Ungleichförmigkeitsgrad, Unter- und Oberkorn, Korngeometrie) und die Homogenität der Lockersedimente,
  - aber nicht die natürliche Lagerungsdichte (totale Porosität, Porengrößenverteilung), sondern nur eine versuchstechnisch dichte Sedimentlagerung und

- nicht die natürlichen Texturmerkmale im Mikro- und Mesobereich nachzubilden.

2. Insbesondere die Diskrepanz zwischen versuchstechnisch dichter („gestörter“) und natürlicher Lagerung haben für händisch aufgebaute Lysimeter andere Wassergehalte als für monolithisch entnommene Lysimeterböden zur Folge.

3. Da die hydraulischen Parameter (Durchlässigkeit, Dispersivität, effektiver Wassergehalt, Saugspannung) von der Feuchte der Böden abhängen (KLOTZ 2002 und 2007 a), sind letztlich die Sickerwassergeschwindigkeiten, die Grundwasserneubildungsraten und die Schadstoff-Retardationen in beiden Lysimetertypen verschieden.

4. Wegen der besseren Homogenität der Körnung und der Lagerung beim händischen Einbau der Horizontsedimente sind die händisch aufgebauten Lysimeter besser als monolithisch entnommene Lysimeter für Schadstoff-Migrationsversuche geeignet.

## Literatur

- KLOTZ, D., 1992: Erfahrungen mit Säulenversuchen zur Bestimmung der Schadstoff-Migration. – GSF-Bericht 07/91, 118 S.
- KLOTZ, D., 2002: Grundparameter der Lysimetersedimente – Standorte Scheyern, Kelheim, Hohenwart und Feldkirchen. – GSF-Bericht 10/02, 114 S.
- KLOTZ, D., 2003: Änderung der Lagerungs-, Mikrostruktur- und hydraulischen Parameter eines Bodens während eines Jahres. – Proceedings der 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL-Bericht, 195-198.
- KLOTZ, D., 2007 a: Grundparameter der Lysimetersedimente – Standorte Hilpoltstein, Höglwald und Weichselstein. – GSF-Bericht 01/07, 102 S.
- KLOTZ, D., 2007 b: Einfluss des prognostizierten globalen Wandels auf die Sickerwasserparameter von Böden. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 51, 170-180.