

**Tagungsbeitrag zu:** Jahrestagung der DBG, Kommission I  
**Titel der Tagung:** Unsere Böden – Unser Leben  
**Veranstalter:** DBG  
**Termin und Ort der Tagung:** 5. – 10. September 2015, München  
**Berichte der DBG** (nicht begutachtete online Publikation) <http://www.dbges.de>

## Inwieweit können klassische Stabilitätsparameter durch rheologische Kenngrößen beschrieben und wie können diese vorhergesagt werden?

Stoppe, N. \*, Neugebauer, T., Horn, R.

### Zusammenfassung

Ein grundlegendes Verständnis von Bodenverformungen auf der Meso- bzw. Makroskala setzt ein Verständnis für die auf der Mikroskala stattfindenden Prozesse voraus, weshalb die bodenkundliche Rheologie zunehmend an Bedeutung gewinnt. Mit Hilfe von deformationsgesteuerten Amplitudentests wurden die auf der Mikroskala relevanten, stabilitätsbeeinflussenden bodenchemischen Parameter bestimmt und Pedotransferfunktionen zur Ableitung der rheologischen Stabilitätskenngröße Integral z entwickelt. Darüber hinaus werden Lösungsansätze zur Extrapolation zwischen Mikro- und Mesoskala unter Berücksichtigung der Gefügecharakteristika aufgezeigt.

*Stichworte:* Rheologie, Mikroskala, Bodenmechanik, Kompressibilitätsindex, Bodenstabilität, Pedotransferfunktion

### Einleitung

In der klassischen Bodenmechanik wird die Stabilität der Bodenstruktur oftmals durch Analysen des Kompressionsverhaltens und/ oder Scherverhaltens und daraus ableitbarer Parameter wie dem Kompressibilitätsindex ( $c_n$ ), dem Winkel der inneren Reibung ( $\varphi$ ) und der Kohäsion ( $c$ ) charakterisiert. Diese Untersuchungen auf der Aggregatebene liefern Stabilitätskenngrößen, die Informationen über die Reaktion des betrachteten (Gesamt-) Bodenvolu-

mens gegenüber Spannungen bei definierten Rahmenbedingungen geben, allerdings keine Rückschlüsse auf die Ursachen der mechanischen Stabilität zulassen (Hartge & Horn 2014). Der Ursprung unterschiedlicher Festigkeiten insbesondere bei visuell vergleichbaren Böden ist auf der Partikel-ebene zu suchen, weshalb durch rheologische Tests, die die Interaktion zwischen einzelnen Bodenpartikeln erfassen, Erkenntnisse über den kombinierten Effekt stabilitätsbeeinflussender Faktoren gewonnen werden können. Hieraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- (1) Kann die rheologische Stabilitätskenngröße Integral z anhand rechnerischer Ableitungen (Pedotransferfunktionen) vorhergesagt werden?
- (2) Ist anhand mikro- und mesoskaliger Stabilitätskenngrößen eine Extrapolation zwischen Partikel- und Aggregatebene möglich?

### Material und Methodik

Auf der Aggregatebene wurden an strukturierten Stechzylinderproben von Marsch- und Wattböden der Tideelbe (22 Standorte) mittels zyklischer Druckbelastung in einem Oedometer (PMO) der Kompressibilitätsindex ( $c_n$ ) und in einem Kastenscherversuch die Parameter Kohäsion ( $c$ ) und Winkel der inneren Reibung ( $\varphi$ ) erhoben. Die zyklische Belastung erfolgte bei Feldkapazität (-6 kPa) in Form von 50 dreißigsekündigen Be- und Entlastungszyklen von je 20 kPa ( $n=5$ ). Über die Abnahme der Porenziffer ( $\varepsilon$ ) wurde der  $c_n$ -Wert nach Gleichung 1 berechnet (Peth et al. 2006).

$$\varepsilon(N) = c_n \cdot \log N + \varepsilon_u^1 \quad (1)$$

mit der Porenziffer als Funktion der Be- und Entlastungszyklen  $\varepsilon(N)$ , dem Kompressibilitätsindex  $c_n$ , sowie der Anzahl der Lastzyklen  $N$  und der Porenziffer nach dem ersten Be- und Entlastungszyklus  $\varepsilon_u^1$ .

Die Scherung der strukturierten Bodenproben wurde ebenfalls bei Feldkapazität durchgeführt und erfolgte nach Vorkonsolidierung bei behinderter Seitenausdehnung auf 20, 50, 100, 200 und 400 kPa. Aus der Auflast-Scherwiderstandskurve wurden gemäß dem Konzept der Mohr-Coulomb'schen Bruchgeraden (Gleichung

\* Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Str. 2, D-24118 Kiel  
 n.stoppe@soils.uni-kiel.de

2) die Scherparameter Winkel der inneren Reibung und Kohäsion ermittelt.

$$\tau = \tan \varphi \cdot \sigma_n + c \quad (2)$$

mit  $\tau$  = Scherwiderstand,  $\varphi$  = Winkel der inneren Reibung,  $\sigma_n$  = Normalspannung und  $c$  = Kohäsion.

Auf der Partikelebene wurden an homogenisierten Proben derselben Standorte Amplitudentests (AST) nach Markgraf et al. (2006) im Rheometer MCR 300 (Anton Paar, Ostfildern) durchgeführt, die mittels einer oszillierenden und im Testverlauf zunehmenden Deformation ( $\gamma$ ) die viskoelastischen Eigenschaften der Bodenmikrostruktur erfassen. Hierfür wurde das gestörte und auf < 2 mm gesiebte Bodenmaterial bei einer Trockenrohddichte ( $\rho_i$ ) von  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  in Zylinder gefüllt ( $45 \text{ cm}^3$ ). Nach Aufsättigung durch kapillaren Aufstieg mit destilliertem Wasser wurde ein Teil der präparierten Zylinder auf -6 und -15 kPa vorentwässert. Für die rheologischen Tests wurden aus den vorbereiteten Zylindern Messproben von ca.  $4 \text{ cm}^3$  mit einem Spatel entnommen und im Messspalt des Rheometers platziert ( $n=5$ ). Vor und nach jeder Messung wurden die gravimetrischen Wassergehalte der jeweiligen Probe bestimmt. Die Bedienung des Rheometers, die Überwachung des Amplitudentests und die Generierung der rheologischen Parameter fanden durch die Software Rheoplus/32 V3.21 statt. **Abbildung 1** zeigt eine schematische Ergebnisdarstellung eines Amplitudentests.

Zur Charakterisierung der physikochemischen Eigenschaften der untersuchten Marsch- und Wattböden wurden die Korngrößenverteilung, der Gehalt an organischer Substanz und Carbonaten sowie die Konzentration von  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  ( $\text{KAK}_{\text{eff}}$ ) und der Gehalt an pedogenen Eisenoxiden nach den in Blume et al. (2011) beschriebenen Methoden bestimmt.

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Statistiksoftware R (Version 3.1.1, R Development Core Team 2013) basierend auf gemischten Modellen anhand von Kovarianz- und Varianzanalysen (ANCOVA resp. ANOVA).

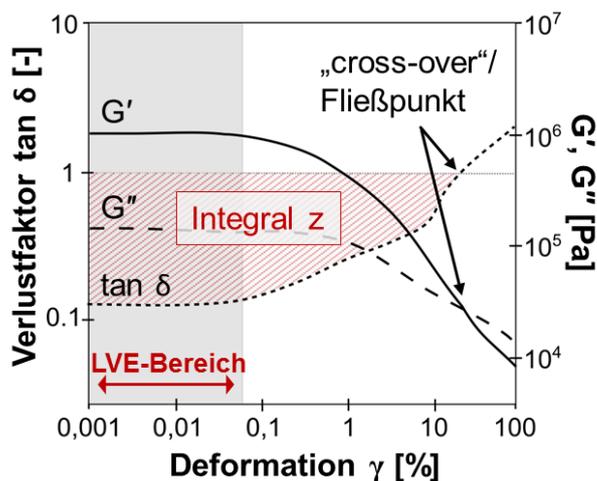


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Amplitudentests als Deformationsfunktion einer Probe.

### Ergebnisse und Diskussion

Mit Hilfe statistischer Tests wurden die in **Tabelle 1** dargestellten bodenchemischen Parameter als signifikante, stabilitätsbeeinflussende Parameter auf der Mikroebene identifiziert (Signifikanzniveau  $\alpha=0,05$ ).

Tab. 1: Signifikante bodenchemische Einflussgrößen auf die Bodenmikrostruktur ( $\alpha=0,05$ ).

Parameter	Kürzel	Einheit
Humusgehalt	OS	$\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$
Carbonatgehalt	$\text{CaCO}_3$	$\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$
pedogene Eisenoxide	$\text{Fe}_d$	$\text{g kg}^{-1}$
Calciumkonzentration	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$
Natriumkonzentration	$\text{Na}^+$	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$
gravimetrischer Wassergehalt	$\Theta_g$	Gew%
(Beprobungs-) Tiefe unter GOF	Tiefe	cm

Die ermittelten statistischen Beziehungen zwischen der rheologischen Kenngröße Integral z und den stabilitätsbeeinflussenden Parametern erlaubten außerdem die Entwicklung von Pedotransferfunktionen (PTFs) zur rechnerischen Ableitung des mikroskaligen Stabilitätsparameters für definierte Bodengruppen. Da der Einfluss der einzelnen bodenchemischen Parameter in Abhängigkeit der Textur variiert, konnten jene Parameter in den Transferfunktionen unberücksichtigt bleiben, deren Effekte auf die Bodenmikrostruktur sehr gering sind, ohne dass sich die Modellgüte resp. die Exaktheit der PTFs verschlechtert, d.h. nicht für jede definierte Bodengruppe sind alle Parameter zur Vorhersage des Integral z-Wertes erforderlich. In **Ta-**

**belle 2** sind die erarbeiteten Transferfunktionen für jede Bodengruppe zusammengefasst. Es wird ersichtlich, dass unter Berücksichtigung der kombinierten Effekte der bodenchemischen Parameter die organische Bodensubstanz, die  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration, der  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt und die pedogenen Eisenoxide stabilisierende Faktoren darstellen, wohingegen die  $\text{Na}^+$ -Konzentration, der Wassergehalt und die Beprobungstiefe strukturungünstige Faktoren sind. Der positive Effekt der strukturungünstigen Faktoren ist im Wesentlichen auf deren verklebende und verkittende Wirkung zurückzuführen (u.a. Tisdall & Oades 1982, Six et al. 2002, 2004). Mit negativem Vorzeichen gehen die destabilisierenden Faktoren in die Transferfunktionen ein, wodurch zum einen die vielfach dokumentierte dispergierende Wirkung von  $\text{Na}^+$  zur Geltung kommt (u.a. Bronick & Lal 2005, Sumner & Naidu 1998) und zum anderen die mit zunehmendem Wassergehalt abnehmende Wirkung kontrahierender Wassermenisken. Eine detaillierte Ausführung der stabilisierenden und destabilisierenden Mechanismen und Prozesse mit besonderem Bezug auf die Mikroskala ist in Stoppe (2015) zu finden.

Eine skalenübergreifende Extrapolation durch die direkte Verknüpfung der beiden dynamischen Stabilitätskenngrößen  $c_n$  und Integral  $z$ , mit dem Ziel von der Partikelebene unmittelbar auf das mechanische Verhalten auf der Aggregatebene schließen zu können, konnte nicht zufriedenstellend hergestellt werden. Da der  $c_n$ -Wert die durch zeitliche Austrocknung und/ oder chemische Prozesse stattgefundenen Gefügeentwicklung charakterisiert, während das Integral  $z$  den mikroskaligen Partikeleffekt beschreibt, kann ein direkter Link nur dort möglich sein, wo eine kohärente Struktur vorliegt. Für eine skalenübergreifende

Übertragung, die für unterschiedlich weit fortgeschrittene Gefügeentwicklungen gültig ist, müssen zusätzlich die Eigenschaften der Gefügeeinheiten einbezogen werden. Des Weiteren quantifiziert das Integral  $z$  wie, d.h. in welcher Art und Weise die Strukturstärke abgebaut wird, während der  $c_n$ -Wert die Größenordnung der Strukturveränderung als Abnahme der Porenziffer quantifiziert. Demnach stellen möglicherweise rheologische Parameter, die die Stabilität der Mikrostruktur anhand eines Grenz- oder Maximalwertes charakterisieren geeigneter Parameter zur skalenübergreifenden Betrachtung dar.

Als Lösungsansatz wurden als rheologische Kenngröße das Ende des linearviskoelastischen Bereichs (LVE) und die aus Scherversuchen abgeleitete Kohäsion ( $c$ ) in die skalenübergreifende Extrapolation integriert. Dieser Ansatz ermöglicht eine texturabhängige Vorhersage des mesoskaligen  $c_n$ -Wertes für Sande und Lehme anhand einer einzigen rheologischen Kenngröße unter Berücksichtigung der Gefügeeigenschaften (**Abb. 2**).

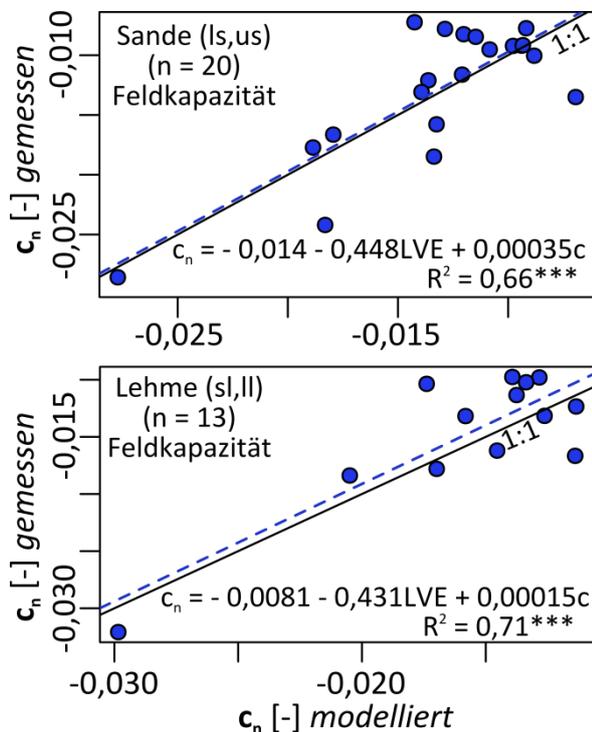
Für Tone konnte ebenfalls eine skalenübergreifende Extrapolation anhand der vorgeschlagenen Kenngrößen erreicht werden, allerdings musste hier zusätzlich die Trockenrohdichte ( $\rho_t$ ) der strukturierten Proben berücksichtigt werden (**Abb. 3**). Dies erscheint einleuchtend, da in den hier untersuchten schluffig-tonigen Marsch- und Wattböden Trockenrohdichten von durchschnittlich  $1,0 \text{ g cm}^{-3}$  ( $\pm 0,25$ ) vorliegen, während die rheologischen Test bei Trockenrohdichten von  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  durchgeführt wurden.

Ähnliche Trockenrohdichten wurden auch für die analysierten Schluffe ermittelt ( $\rho_t = 1,1 \text{ g cm}^{-3} \pm 0,28$ ), allerdings konnte hier keine deutliche Verbesserung der Extrapo-

**Tab. 2: Pedotransferfunktionen zur mathematischen Ableitung der mikrostrukturellen Stabilität.**

<i>Textur</i>	<i>Pedotransferfunktion</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
Sande (ls, us)	Integral $z = 40,2 + 3,2 \text{ OS} + 2,1 \text{ Ca}^{2+} + 2,7 \text{ Fed} - 1,2 \Theta_g - 0,1 \text{ Tiefe}$	0,64
Lehme (sl, ll)	Integral $z = 67,9 + 4,6 \text{ OS} + 0,2 \text{ CaCO}_3 - 1,4 \Theta_g$	0,56
Schluffe (su, lu, tu)	Integral $z = 41,3 + 6,8 \text{ OS} + 0,5 \text{ CaCO}_3 + 2,3 \text{ Fe}_d - 1,2 \Theta_g$	0,50
Tone (ut)	Integral $z = 46,7 + 5,0 \text{ OS} + 2,3 \text{ CaCO}_3 - 3,6 \text{ Na}^+ - 0,8 \Theta_g - 0,2 \text{ Tiefe}$	0,62

lation von Mikro- auf Mesoskala durch die Berücksichtigung der Trockenrohdichte erreicht werden. Im Vergleich wurde darüber hinaus für die schluffigen Substrate die schlechteste Anpassung erzielt (**Abb.3**).

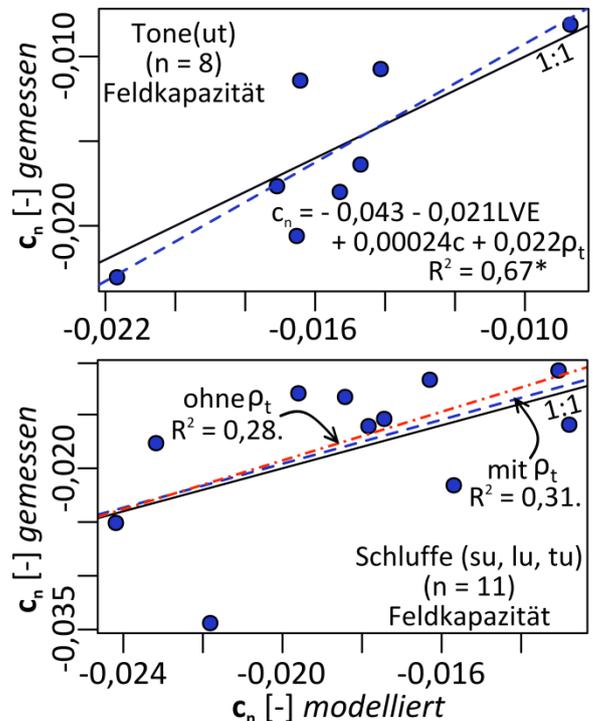


**Abb. 2:** Plot der gemessenen  $c_n$ -Werte vs. der mittels LVE und  $c$  errechneten Werte für Sande und Lehme.

Eine mögliche Ursache für diese mäßige Anpassung könnte sein, dass das rheologische Verhalten der schluffigen Substrate in Abhängigkeit ihrer Korngrößenzusammensetzung bei gleichem Matrixpotential sehr unterschiedlich ist. Ob es diesbezüglich generalisierbare Zusammenhänge gibt (z.B. prozentualer Anteil Ton oder Sand als Grenzwert), können nur weitere Untersuchungen zeigen.

### Fazit

Mit Hilfe der angewandten Methoden konnten die für die Mikrostruktur relevanten stabilitätsbeeinflussenden bodenchemischen Faktoren unter Berücksichtigung ihres kombinierten Effektes identifiziert werden. Basierend auf den ermittelten statistischen Zusammenhängen konnten plausible Transferfunktionen entwickelt werden, die eine rechnerische Ableitung des Integral  $z$  erlauben. Darüber hinaus ist eine Extrapolation zwischen Partikel- und Aggregatebene unter Berücksichtigung der Gefügeeigenschaften anhand rheologischer Kenngrößen möglich.



**Abb. 3:** Plot der gemessenen  $c_n$ -Werte vs. die mittels LVE,  $c$  und  $\rho_t$  errechneten Werte für Tone, sowie der mittels LVE und  $c$  ( $c_n = -0,023 - 0,027LVE + 0,0003c$ ; orange) und der mittels LVE,  $c$  und  $\rho_t$  ( $c_n = -0,037 - 0,11LVE + 0,0002c + 0,016\rho_t$ ) errechneten Werte für Schluffe.

### Literatur

- BLUME, H.-P., STAHR, K., LEINWEBER, P. (2011). *Bodenkundliches Praktikum*. 3. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- BRONICK, C.J., LAL, R. (2005). *Geoderma* **124** (1-2): 3 – 22.
- HARTGE, K.-H., HORN, R. (2014). *Einführung in die Bodenphysik*. 4. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- PETH, S., HORN, R., FAZEKAS, O., RICHARDS, B.G. (2006). *J Plant Nutr Soil Sc* **169** (6): 775 – 783.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2013). R. <http://www.R-project.org/>.
- SIX, J., BOSSUYT, H., DEGRYZE, S., DENEK, K. (2004). *Soil Till Res* **79** (1): 7 – 31.
- SIX, J., FELLER, C., DENEK, K., OGLE, S.M., SA, J.C.D., ALBRECHT, A. (2002). *Agronomie* **22** (7-8): 755 – 775.
- STOPPE, N. (2015). *Rheologische Untersuchungen an tidebeeinflussten Uferböden der Elbe als Grundlage für die Entwicklung mikro-mechanischer Pedotransferfunktionen*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- SUMNER, M.E., NAIDU, R. (1998). *Sodic soils*. Oxford University Press Inc., New York.
- TISDALL, J.M., OADES, J.M. (1982). *J Soil Sci* **33** (2): 141 – 163.