

Tagungsbeitrag zu: Tagung der Kommission V der DGB
 Die Böden der Küste und deren Genese im Spannungsfeld von Landnutzung und Klimawandel
 Kommission V der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 03.-05.09.2008, Universität Oldenburg
 Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation)
<http://www.dbges.de>

Rheologie: Mikrostrukturelle (De)stabilisierung in Böden unter Einfluss von Salz- und Wassergehaltklassifikation von Festigkeitsverlust auf der Mikroskala

W. Markgraf*, R. Horn

Die Bodenmikromechanik befasst sich im Wesentlichen mit den strukturellen Veränderungen des 3-Phasen-Systems Boden. In vorangegangenen Arbeiten (Markgraf et al. 2006, Markgraf und Horn 2007) wurde Rheometrie als geeignete Methode vorgestellt, mit der es möglich ist, mikrostrukturelle Veränderungen auf interpartikulärer und -granularer Ebene zu erfassen. Die Festigkeit (Elastizität, Steifigkeit) wird im Wesentlichen durch Ionen in der flüssigen Phase, die Textur, den Wassergehalt sowie weitere Parameter wie den Gehalt an organischer Substanz und Karbonat beeinflusst. Es wurden zwei Substrate ausgewählt, die von Natur aus über einen hohen Salz- bzw. Karbonatgehalt verfügen - Salzmarsch (Watt) und Kalkmarsch - und charakteristische Texturunterschiede aufweisen. Eine Synopse aller bislang ermittelten Ergebnisse rheologischer Tests führt zu einer - hier als Beispiel - texturorientierten Klassifikation des Festigkeitsverlustes. Es werden im folgenden Ergebnisse aktuell durchgeführter rheologischer Tests vorgestellt sowie die Klassifikation um diese ergänzt.

Rheologie, Mikromechanik, Salzeinfluss

Rheologische Grundlagen

Boden wird im Allgemeinen als viskoelastische Substanz definiert. Um eine physikalische Beschreibung und Quantifizierung vornehmen zu können, bedarf es zweier grund-

legender Gesetze aus der Kontinuumsmechanik. Ein ideal elastischer Zustand wird durch das Hooke'sche Gesetz [1.1] beschrieben, repräsentiert durch eine Feder, ein ideal-viskoser Zustand durch Newtons Gesetz [2], dessen Analog ein Stoßdämpfer darstellt. Gleichung [1.2] stellt den direkten Bezug der Schubspannung zur Deformation dar und liefert somit eine Aussage über den Schubmodul G (Konstitutivgesetz). Ist die Steigung $G = 1$, so handelt es sich um einen Hooke'schen Festkörper (ideal elastisch).

$$\tau = G \gamma \quad [1.1]$$

$$G = \tau / \gamma \quad [1.2]$$

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad [2]$$

mit τ = Schubspannung [Pa], G = Schubmodul [Pa], γ = Deformation [%] oder [-] und η = Viskosität.

Unter oszillierenden Bedingungen werden zwei weitere Moduli verwendet: der Speichermodul G' [Pa] und der Verlustmodul G'' [Pa]. Befindet sich ein viskoelastisches Material in einem elastischen Zustand, so gilt: $G' > G''$.

Ist eine bestimmte Fließ- bzw. Deformationsgrenze überschritten, überwiegen viskose Eigenschaften: $G' < G''$.

Der Quotient aus G'' und G' führt zu einem so genannten Verlustfaktor $\tan \delta$ [-].

$$G''/G' = \tan \delta \quad [3]$$

Ist $\tan \delta < 1$, so ist davon auszugehen, dass sich die Deformation in einem reversiblen Bereich befindet. Ein mikrostruktureller Zusammenbruch ist bei $\tan \delta > 1$ erreicht.

Amplitudentest

In Markgraf et al. (2006) werden theoretische Grundlagen der Rheologie sowie die methodische Umsetzung von Amplitudentests detaillierter vorgestellt.

Es können gestörte wie auch ungestörte Bodenproben in (un)gesättigtem Zustand analysiert werden. Die Messungen werden mit einem Platte-Platte-Messsystem (25 PPR) an einem Rotationsrheometer der Fa. Paar Physica durchgeführt.

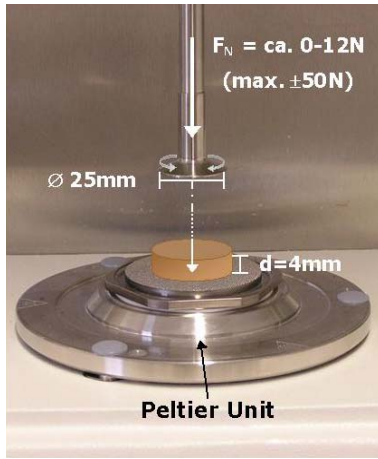


Abb. 1: Platte-Platte-Messsystem, 25PPR, Anton Paar, Rheometer MCR 300.

Der Plattenabstand beträgt konstant 4 mm. Bei einem Plattendurchmesser von 25 mm entspricht das einem Probenvolumen von ca. 4 cm³. Laut der Definition von verrichteter Arbeit $W = F \cdot s$ handelt es sich um eine Weg gesteuerte Energie, die bei einer gleich bleibenden Frequenz von 0,5 Hz generiert wird. Der Rohdatensatz besteht aus Drehmoments- bzw. Normalkraftwerten [Nm]. In Verbindung mit einer konstanten Kreisfrequenz und dem vorgegebenen Plattenabstand, sowie der Materialvariablen, ergeben sich hieraus die Werte für G' und G'' .

Der mikrostrukturelle Abbau erfolgt in drei Phasen (Abb. 2). Basierend auf einem Datensatz, ist es möglich, eine direkte Gegenüberstellung von physikalischen Größen vorzunehmen. Für eine eindeutigere Darstellung des Übergangs elastischen, rigiden Verhaltens zu einem viskosen Zustand eignet sich neben der „klassischen“ Darstellung von Speicher- und Verlustmodul G' - G'' vs. Deformation γ , die Gegenüberstellung des Verlustfaktor $\tan \delta$ vs. Deformation γ (Abb. 3).

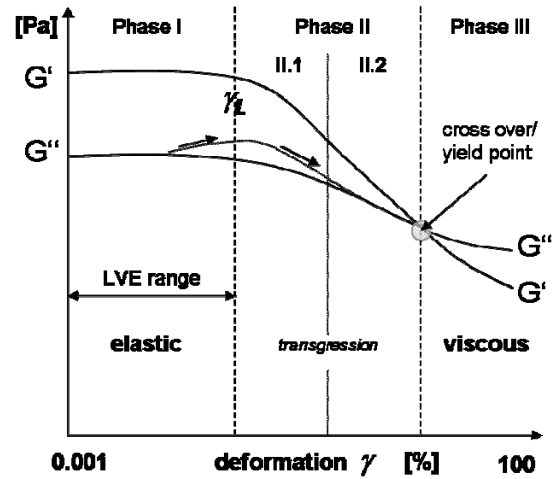


Abb. 2: Festigkeitsverlust in drei Phasen G' - G'' : Phase I: elastischer Zustand, $G' > G''$; Phase II: Transgressionsphase, II.1 nicht-linear elastischer Bereich, in II.2 Überschneidung von G' und G'' , Erreichen der absoluten Fließgrenze („cross over“); Phase III: mikrostruktureller Zusammenbruch, $G' < G''$

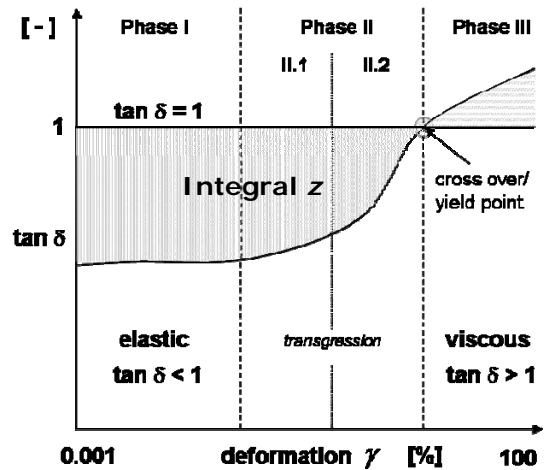


Abb. 3: Festigkeitsverlust in drei Phasen $\tan \delta$: Phase I: elastischer Zustand, $\tan \delta < 1$; Phase II: Transgressionsphase, II.1 nicht-linear elastischer Bereich, in II.2 Überschneidung $\tan \delta = 1$, Erreichen der absoluten Fließgrenze („cross over“); Phase III: mikrostruktureller Zusammenbruch, $\tan \delta > 1$. Integral z ermöglicht einen Vergleich des elastischen Bereichs in absoluten Zahlen

Nach einer kurzen Beschreibung des untersuchten Materials, erfolgt eine Vorstellung der Ergebnisse.

Material

Die untersuchten Substrate wurden zuvor an zwei Standorten an der Westküste Schleswig-Holsteins beprobt. Im Wesentlichen unterscheiden sie sich in ihrer Textur, ihrem Carbonat- sowie ihrem Salzgehalt (Tab. 1).

	Textur %			pH	CaCO ₃
	S	U	T	CaCl ₂	%
Nordstrand zeGo	1	49	50	7,2	7
Speicherkoog eGo	85	11	4	7,7	4

Tab. 1: Übersicht untersuchter Substrate

Gestörtes Probenmaterial aus den jeweiligen oberen Horizonten wurde gesiebt (<2mm), Stechzylinder befüllt und mit destilliertem Wasser aufgesättigt. Parallelen wurden bei -60hPa vorentwässert. Amplitudentests wurden nach oben beschriebener Methode durchgeführt (n=3).

Resultate

In Abb. 4 und 5 ist der Festigkeitsverlust beider Substrate unter gesättigten und vorentwässerten Bedingungen dargestellt ($\tan \delta$ vs. γ). Im Vergleich weist die stark sandig-schluffige Kalkmarsch (eGo) ein grundlegend anderes mikromechanisches Verhalten auf als das tonig-schluffige Substrat der Salzmarsch (zeGo), was auf Texturunterschiede zurückzuführen ist. Des Weiteren weist der Kurvenverlauf auf höhere strukturelle Stabilität der Salzmarsch hin: sowohl unter gesättigten als auch unter vorentwässerten Bedingungen kommt es nicht zu einer Überschneidung mit $\tan \delta=1$, ein viskoser Zustand wird nicht erreicht. Bei einem weiteren Vergleich absoluter Zahlen der kalkulierten Integrale z wird der elastisch-rigide Charakter dieses Substrates deutlich, wengleich sich die Kurvenverläufe (gesättigt/ vorentwässert) nur geringfügig ändern.

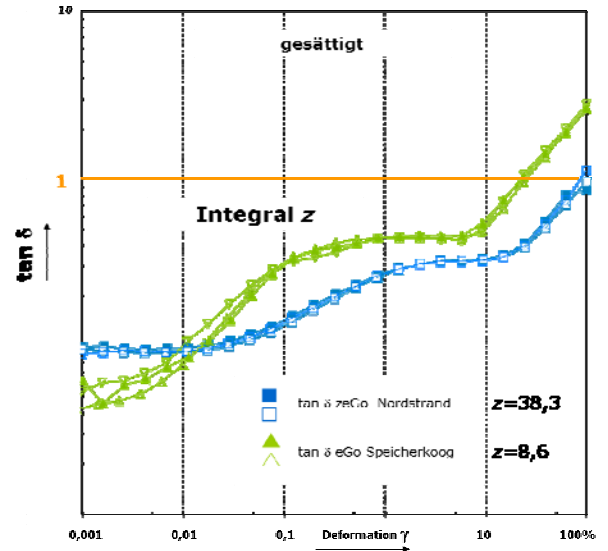


Abb. 4: Festigkeitsverlust der untersuchten, gesättigten Substrate ($\tan \delta$ vs. Deformation γ): stark sandig-schluffige Kalkmarsch (eGo, Speicherkoog), Salzmarsch (zeGo, Nordstrand)

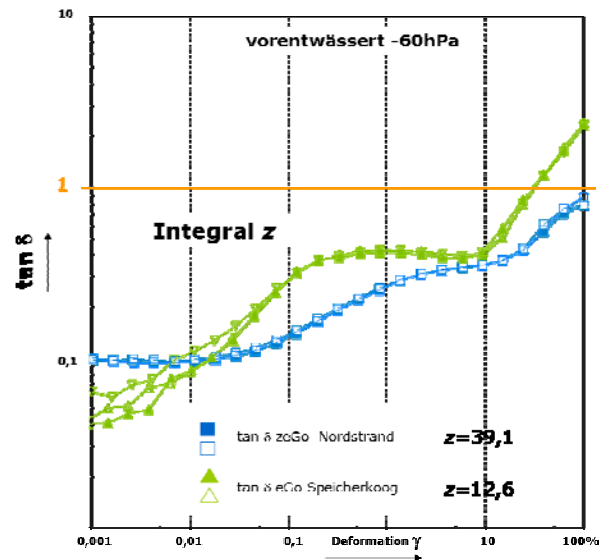


Abb. 5: Festigkeitsverlust der untersuchten, vorentwässerten Substrate ($\tan \delta$ vs. Deformation γ): stark sandig-schluffige Kalkmarsch (eGo, Speicherkoog), Salzmarsch (zeGo, Nordstrand)

Schlussfolgerungen

Eine Zusammenfassung bislang durchgeführter und aktueller Messungen führt zu einer texturorientierten Klassifikation des Festigkeitsverlustes (Abb. 6).

Sandige - reinsandige Substrate sind von rheologischen Untersuchungen ausgeschlossen - Substrate verfügen über eine Struktur mit großer Eigenfestigkeit. Der Kurvenverlauf des Graphen als $f(\log \gamma)$ unterscheidet sich erheblich von dem des schluffigen Substrates, das nahezu einer Geraden

entspricht. Der Übergang elastisch-rigiden Verhaltens zu einem viskosen Zustand erfolgt in einem Bereich von $\gamma = 70-80\%$; hieraus lässt sich schließen, dass es erst einer erhöhten Oszillationsfrequenz bzw. einem erhöhten Deformations-„Input“ zu einem mikrostrukturellen Zusammenbruch kommt. Bei Betrachtung tonigen Materials fällt insbesondere der annähernd symmetrischen Kurvenverlauf auf, d.h. die Fläche $\tan \delta < 1 \approx$ Fläche $\tan \delta > 1$ als $f(\log \gamma)$. Die plattigen Partikel führen zu einem gleitenden Scherverhalten; das sehr ausgeprägte viskoelastische Verhalten weist mitunter auf ein hohes Quellungs- und Schrumpfungspotenzial hin. Die Klassifikation kann um andere physikochemische Kenngrößen wie den Einfluss organischer Substanz, des pH-Wertes u. a. ergänzt werden.

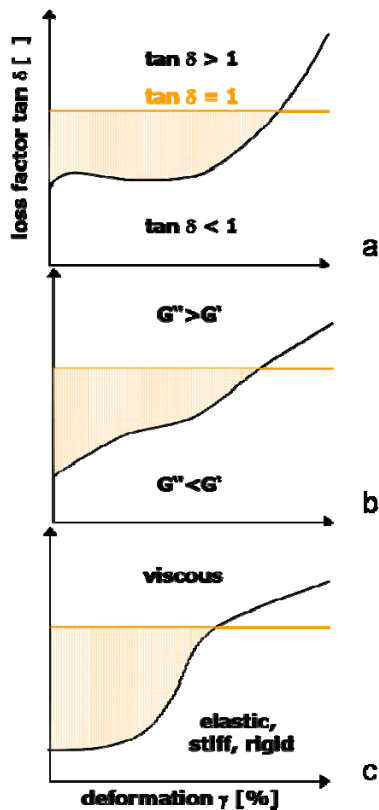


Abb. 6: texturorientierte semiquantitative Klassifikation des Festigkeitsverlustes: a sandiges, b schluffiges, c toniges Substrat

Ausblick

Das herausgearbeitete Klassifikationssystem wird in folgenden Untersuchungen ergänzt, um längerfristig ein Indikatorensystem zu entwickeln, anhand dessen es ermöglicht werden soll, physikochemische

Eigenschaften aus Kurvencharakteristika herauszulesen und Rückschlüsse auf mikrostrukturelle Stabilität zu ziehen.

Literatur

MARKGRAF, W., HORN, R., PETH, S. (2006). An Approach to Rheometry in Soil Mechanics: Structural Changes in Bentonite, Clayey and Silty Soils. *Soil Till. Res.* **91**: 1-14.

MARKGRAF, W., HORN, R. (2006). Rheological Stiffness Analysis of K^+ -treated and $CaCO_3$ -rich Soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **169**(3): 411-419.

MARKGRAF, W., HORN, R. (2006). Rheometry in Soil Mechanics: Microstructural Changes in a Calcaric Gleysol and a Dystric Planosol. Sustainability - Its Impact on Soil Management and Environment. R. Horn, Fleige, H., Peth, S., and Xh. Peng, Catena Verlag. **38**: 47-58.

MARKGRAF, W. (2006). Microstructural Changes in Soils - Rheological Investigations in Soil Mechanics. Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät. Kummulative Dissertation. Kiel, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

MARKGRAF, W., HORN, R. (2007). Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils. *J. Soil Sci. Soc. Am.* **71**: 851-59.

MARKGRAF, W., HORN, R. (2008). Rheological Investigations in Soil Micro Mechanics: Measuring Stiffness Degradation and Structural Stability on a Particle Scale. (accepted) Nova Science Publishers.