

Tagungsbeitrag zu: Sitzung der Kommission I, VI und VIII der DBG  
 Titel der Tagung: Wasser- und Stoffflüsse in der Landschaft  
 Veranstalter: Kom. I, VI und VIII der DBG, 29.-30.5.08, Kiel, S.-H.  
 Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation)  
<http://www.dbges.de>

## Rheologische Untersuchungen in der Bodenmikromechanik: Klassifikation mikrostrukturellen Verhaltens anhand des Verlustfaktors $\tan \delta$

Wibke Markgraf\*, Rainer Horn

### Einleitung

Die Bodenmikromechanik befasst sich im Wesentlichen mit den strukturellen Veränderungen des 3-Phasen-Systems Boden auf der Partikel-Partikel-Ebene. Rheologische Messmethoden eignen sich dazu, besonders interpartikuläre Kräfte zu erfassen, die im Hinblick auf interne Kräfte wie mechanische Spannungen eine wichtige Rolle spielen. Neben den genannten mikroskaligen Phänomenen, sind es meso- und makroskalige Kräfte (Deformation, Vibrationen), die zu strukturellen Veränderungen wie die Einregelung von Bodenpartikeln führen. Anhand ermittelter rheologischer Parameter für einen Stagnogley, einen Kalkgley (S.-H.) und einen kaolinitischen Oxisol (Südbrasilien) werden Stabilisierungseffekte vorgestellt. Resultate der durchgeführten Amplitudentests werden durch Texturunterschiede, den Einfluss organischer Substanz, durch Eisenoxide und Kationen (Wertigkeitseffekt) beeinflusst. Basierend auf einer umfangreichen Datengrundlage wird im Folgenden ein Ansatz zu einer Klassifikation mikrostrukturellen Verhaltens anhand des Verlustfaktors  $\tan \delta$  herausgearbeitet.

**Stichwörter:** Rheologie, Mikromechanik, Viskoelastizität, Verlustfaktor, Steifigkeit

### Methode

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

### Amplitudentest

Es können gestörte wie auch ungestörte Bodenproben in (un)gesättigtem Zustand analysiert werden. Die Messungen werden mit einem Platte-Platte-Messsystem (25 PP) an einem Rotationsrheometer der Fa. Paar Physica durchgeführt. Der Plattenabstand beträgt konstant 4mm. Bei einem Plattendurchmesser von 25mm entspricht das einem Probenvolumen von ca. 4 cm<sup>3</sup>. 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. 1):

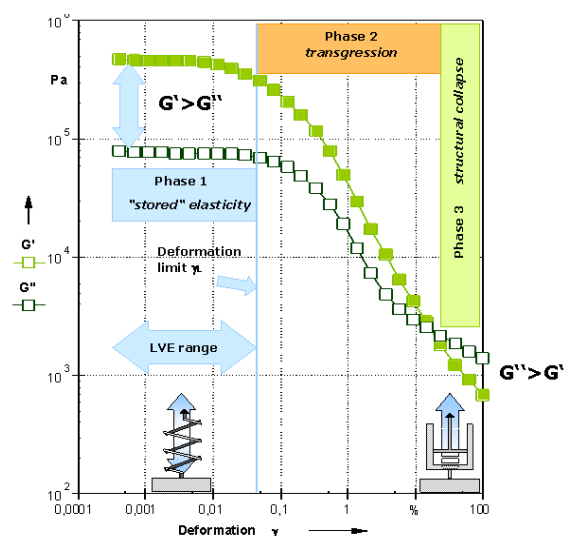


Abb. 1 Graphische Darstellung eines Ergebnisses resultierend aus einem Amplitudentest - Elastizitätsverlust in drei Phasen.

Phase 1: elastischer Zustand,  $G' > G''$   
 Phase 2: Transgressionsphase, mit einer Überschneidung von  $G'$  und  $G''$   
 Phase 3: mikrostruktureller Zusammenbruch,  $G' < G''$

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

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.

Basierend auf einem Datensatz, ist es möglich, eine direkte Gegenüberstellung von physikalischen Größen vorzunehmen. Neben der „klassischen“ Darstellung von Speicher- und Verlustmodul  $G'-G''$  vs. Deformation  $\gamma$ , können der Verlustfaktor  $\tan \delta$  vs. Deformation  $\gamma$ .

## Material

Untersucht wurde gestörtes (<2mm) Probenmaterial eines lehmig-sandigen, Al-dominierten Stagnogleys und eines schluffig-lehmigen, karbonatreichen ( $\text{CaCO}_3$  25%) Kalkgleys (weitere Daten sind Tab. 1 zu entnehmen und Markgraf und Horn, 2006b). Um den Einfluss organischer Substanz und von Eisenoxiden herauszustellen, wurden Daten eines kaolinitischen Oxisols hinzugefügt (Markgraf und Horn, 2007).

Tab. 1: Physikochemische Eigenschaften des untersuchten Kalkgleys und des Stagnogleys

Substrat	Textur			pH 0,01M CaCl <sub>2</sub>	EC [mS/cm]	C <sub>F</sub> [%]
	Sand	Schluff	Ton			
<b>Kalkgley</b>						
CaCl <sub>2</sub> 0.1 M				7,4	2,40	
CaCl <sub>2</sub> 1.0 M	7	58	35	7,3	15,89	1,1
<b>Stagnogley</b>						
CaCl <sub>2</sub> 0.1 M				4,3	3,75	
CaCl <sub>2</sub> 1.0 M	20	15	65	6,3	17,65	0,5

Markgraf und Horn, Adv. Geobot., 39, 2008

## Resultate

Bei den vorliegenden Bodenproben handelt es sich um ein recht rigides, steifes Material. Es findet lediglich ein gradueller Strukturabbau statt: der Schnittpunkt mit  $\tan \delta = 1$  liegt bei entsprechend hoher Deformation (10-30%). Es wird des Weiteren deutlich, dass

die Al-dominierten Proben eine höhere mikrostrukturelle Stabilität aufweisen: der Aggregierungseffekt des Stagnogleys ist größer als der Zementierungseffekt des karbonatreichen Kalkgleys (Abb. 2).

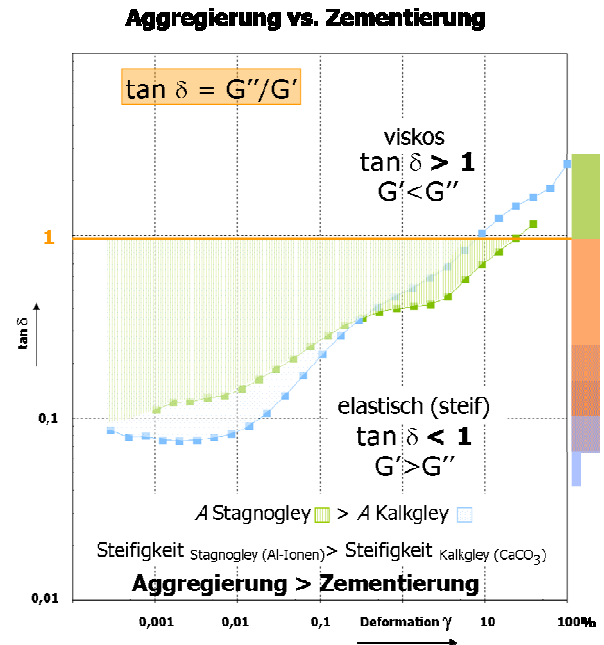


Abb. 2 Gegenüberstellung eines Al-reichen Stagnogleys (Tendenz zur strukturellen Aggregierung) und eines karbonatreichen Kalkgleys (Tendenz zur strukturellen Zementierung). Elastischer/ steifer Bereich:  $\tan \delta < 1$ ; viskoser Bereich:  $\tan \delta > 1$ . Schnittpunkt mit  $\tan \delta = 1$  entspricht einer absoluten Fließgrenze.

In Abb. 3 sind Stabilisierungseffekte durch Eisenoxide (Fe-Oxide) sowie organische Substanz dargestellt: bei der Untersuchung stellte sich heraus, dass das natürliche Substrat die höchste Steifigkeit besitzt; das Material ohne organische Substanz ( $\text{H}_2\text{O}_2$  behandelt) weist bereits eine geringere Stabilität auf. Eine weitaus stärkere Degradierung findet jedoch nach dem Entfernen Na-Dithionit löslichen Eisens statt (roter Dreiecke; fehlender Anstieg im Bereich  $\gamma = 0,05-5\%$ ).

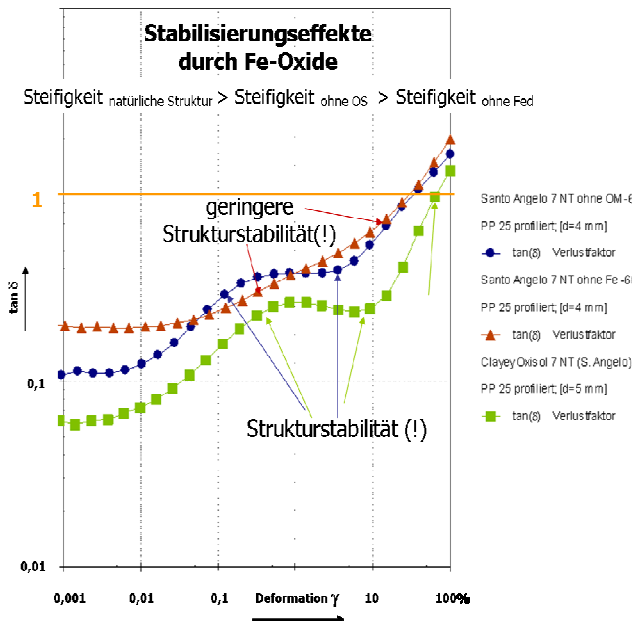


Abb. 3. Stabilisierungseffekte durch Fe-Oxide in einem tonigen Oxisol (Südbrasilien).

Auf Grundlage dieser sowie weiterer rheologischer Messungen und resultierende Daten ( $G'$ ,  $G''$ ,  $\tan \delta$ ) wurde eine Zusammenfassung typischer Kurvenverläufe vorgenommen, die sich hauptsächlich nach der Textur, dem Tonmineralbestand und dem Wassergehalt richtete (Abb. 4). Es erfolgte eine Unterteilung in drei Klassen: sandige und kaolinitische, schluffige sowie tonige, smektitisch-montmorillonitische Substrate.

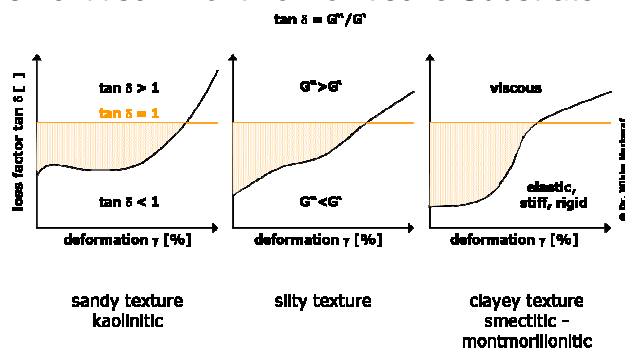


Abb. 4. Klassifikation mikrostrukturellen Verhaltens unterschiedlicher Substrate: Verlustfaktor vs. Deformation; charakterisiert nach Textur, Tonmineralogie und Grad der Wassersättigung (gesättigt/vorentwässert).

Allgemein lässt sich statuieren, dass mit zunehmendem Tongehalt der Kurvenverlauf symmetrischer wird und der viskose Anteil in der Probe steigt. Bei einem Vergleich der Integrale ( $=\tan \delta < 1$  als obere Grenze) des elastisch-rigiden Bereiches wird weiterhin deutlich, dass der

Flächeninhalt mit höherem Anteil z.T. quellfähiger Tone zunimmt, d.h. zugleich die Elastizität.

## Schlussfolgerungen

Anhand der gezeigten Daten konnte erneut die Relevanz rheologischer Untersuchungen in der Bodenmikromechanik demonstriert werden. Eine Klassifikation nach unterschiedlichen Einflussfaktoren wie Textur, Tonmineralogie und Wassergehalt liefert einen Ausgangspunkt für weitere Aspekte mikrostruktureller Veränderungen. Weitere denkbare Ansätze liegen dabei in der Düngemittelapplikation, dem Einfluss organischer Substanz, deren Bestandteile, der Aggregation durch Wurzelexudate oder Schleimstoffe (Regenwürmer). Eine Ergänzung durch Messungen wie z.B. die des Redoxpotentials stellen darüber hinaus eine Verknüpfung zu Prozessen in Aussicht, die auf höher skaligem Niveau stattfinden („Upscaling“: Redoxprozesse in Aggregaten – im Pedon; als Link zu  $pCO_2$  und „Climate Change“). In diesem Zusammenhang kann Rheologie als „linking tool“ betrachtet werden.

## 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.

## Weiterführende Literatur

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

Markgraf, W., Horn, R. (2006b). 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. Kumulative 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.

**Kontakt:**

Dr. Wibke Markgraf

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Institut für Pflanzenernährung und  
Bodenkunde  
Olshausenstr. 40  
24098 Kiel

**email: [w.markgraf@soils.uni-kiel.de](mailto:w.markgraf@soils.uni-kiel.de)**