

**Tagungsbeitrag zu:**

Jahrestagung der DBG, Kommission I

**Titel der Tagung:**

Böden – Lebensgrundlage und Verantwortung

**Veranstalter:** DBG**Termin und Ort der Tagung:** 7. – 12. September 2013, RostockBerichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation); <http://www.dbges.de>**Analyse und Bewertung der Uferstabilität im Bereich der Tideelbe anhand rheologischer Untersuchungen**Stoppe, N.<sup>1</sup>, Baumgarten, W.<sup>1</sup>, Schmidt-Wygasch, C.<sup>2</sup>, Horn, R.<sup>1</sup>**Zusammenfassung**

Anhand rheologischer Untersuchungen soll die Uferstabilität an der Tideelbe quantifiziert werden. Die durchgeführten Amplitudentests (AST) zeigen eine Zunahme der mikrostrukturellen Stabilität mit abnehmendem Matrixpotential durch Meniskenkräfte. Dieser stabilisierende Effekt durch Menisken ist in feinkörnigeren/tonigeren Substraten größer als in sandigem Material. Im Gegensatz dazu steigt die Erodierbarkeit bei Wassersättigung mit zunehmendem Tongehalt. Die Bodenmikrostruktur wird neben dem Wassergehalt zusätzlich von Textur und Gehalt an organischer Substanz beeinflusst.

*Stichworte: Rheologie, Mikromechanik, Uferstabilität*

**Einleitung**

Die Tideelbe, die sich von Geesthacht bis Cuxhaven erstreckt, unterliegt einer Vielzahl von Nutzungskonflikten (Ökonomie vs. Ökologie vs. Soziales), weshalb eine nachhaltige Entwicklung dieses Natur- und Wirtschaftsraumes notwendig ist. Dem Bestreben, die Untere Elbeniederung durch teilweisen Rückbau der Uferbefestigung insgesamt in einen naturnäheren und ökologisch

besseren Zustand zu versetzen, steht die hydro-mechanische Belastung der uferbildenden Böden, Watten und Sedimente durch Maßnahmen zum Erhalt der Schiffbarkeit, Wellenschlag, zunehmenden Schiffsverkehr sowie einem natürlichen Salinitätsgradienten gegenüber.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen zur Charakterisierung von Bodensuspensionen anhand rheologischer Untersuchungen durchgeführt (Ghezzehei & Or 2001, Markgraf 2006, Holthusen 2010, Baumgarten et al. 2013 u.a.), da sie Informationen über die innere Struktur von Bodensuspensionen liefern sowie über die Wechselwirkungen, die zwischen Partikeln stattfinden. Ferner werden dadurch makroskopische Eigenschaften von Bodensuspensionen durch mikroskopische Interaktionen erklärbar (Baumgarten et al. 2012). Somit ist die Rheometrie eine geeignete Methode, um anhand mikro-mechanischer Parameter eine Bewertung der kolloidalen Stabilität (Markgraf & Horn 2009) und eine Charakterisierung des Scherverhaltens der uferbildenden Böden bei hydro-mechanischer Belastung zu ermöglichen.

**Material und Methodik**

Untersucht wurden die Oberböden von Wattprofilen zwischen mittlerem Tide-niedrigwasser (mTnw) und mittlerem Tidehochwasser (mThw) sowie Marschböden oberhalb mThw. Das analysierte Bodenmaterial wurde an Standorten oberhalb der gemittelten Brackwassergrenze zwischen Geesthacht und Glückstadt als Beutelprobe entnommen und variiert hinsichtlich Textur, organischem Kohlenstoffgehalt sowie weiterer physiko-chemischer Parameter (z.B. pH, KAK).

Die rheologischen Untersuchungen wurden als Amplitudentests (AST) im Oszillationsmodus mit Deformationsvorgabe nach Markgraf et al. (2006) im Rheometer MCR 300 (Anton Paar, Ostfildern) durchgeführt. Zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften wurde

<sup>1</sup> Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Str. 2, D-24118 Kiel

<sup>2</sup> Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz

das auf < 2 mm gesiebte, homogenisierte Bodenmaterial bei einer Lagerungsdichte von  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  in kleine Zylinder ( $45 \text{ cm}^3$ ) gefüllt und durch kapillaren Aufstieg von unten mit destilliertem Wasser aufgesättigt. Ein Teil der präparierten Zylinder wurde anschließend in einer Unterdruckapparatur vorentwässert, so dass die Messungen sowohl im quasi-gesättigten Zustand (0 kPa) als auch bei einem Matrixpotential von -15 kPa durchgeführt wurden. Die Bedienung des Rheometers und die Generierung der rheologischen Parameter finden durch die Software Rheoplus/32 V3.21 statt.

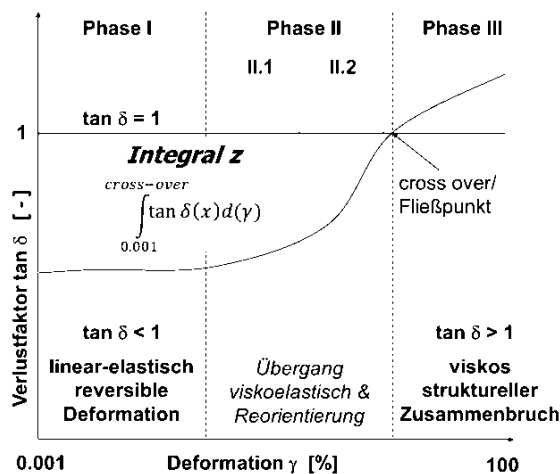


Abb. 1: Schematische Ergebnisdarstellung eines Amplitudentests (verändert nach Baumgarten et al. 2013).

Abbildung 1 zeigt eine schematische Ergebnisdarstellung eines AST. Das Verhältnis von Verlust- zu Speichermodul ( $G''/G'$ ; Pa) entspricht dem Verlustfaktor  $\tan \delta$  [-], welcher das rheologische Verhalten als elastisch, viskoelastisch oder viskos charakterisiert. Zusätzlich kann der dimensionslose Parameter *Integral z* aus  $\tan \delta(\gamma) \lim_{\gamma \rightarrow 0,001} = 0,001$  zu  $\lim_{\gamma \rightarrow \text{cross-over/Fließpunkt}} \tan \delta = 1$  als „cross over“/Fließpunkt mit  $\tan \delta = 1$  als definiertem Limit auf der y-Achse berechnet und somit die mikrostrukturelle Stabilität quantifiziert werden (Markgraf & Horn 2009).

### Ergebnisse

Das rheologische Verhalten und der Festigkeitsparameter *Integral z* werden durch Wassergehalt, Textur und organi-

schen Kohlenstoffgehalt beeinflusst. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Amplitudentests im quasi-gesättigten Zustand und bei einem Matrixpotential von -15 kPa für einen schwach lehmigen Sand (SI2) und einen mittel tonigen Lehm (Lt3) dargestellt.

Unter quasi-gesättigten Bedingungen findet in beiden Substraten ein allmählicher Abbau der mikrostrukturellen Steifigkeit statt. In beiden Fällen wird der Fließpunkt, welcher durch den Schnittpunkt mit der  $\tan \delta = 1$ -Linie gekennzeichnet wird, erreicht. Allerdings weist die feinkörnigere Textur (Lt3) eine weniger stabile Mikrostruktur auf, was sich in einem kleineren z-Wert (Tab. 1) und einem früheren Schnittpunkt mit der  $\tan \delta = 1$ -Linie, d.h. bei kleineren Deformationen, widerspiegelt.

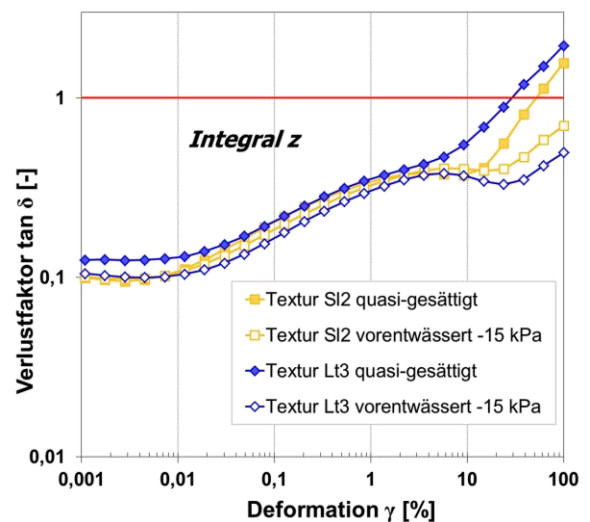


Abb. 2: Kurvenverläufe zweier Oberböden mit sandiger (SI2, gelb) bzw. tonig-lehmiger Textur (Lt3, blau). ASTs wurden im quasi-gesättigten Zustand (gefüllte Symbole) und bei einem Matrixpotential von -15 kPa (ungefüllte Symbole) durchgeführt.

Wird das Material vorentwässert (-15 kPa), wird der Fließpunkt in beiden dargestellten Oberböden nicht mehr erreicht. Durch abnehmendes Matrixpotential kommt es zu einer Stabilisierung der Bodenmikrostruktur. Diese steifere Mikrostruktur wird auch durch die Zunahme der z-Werte deutlich (Tab.1), wobei der stabilisierende Effekt durch Meniskenkräfte für die lehmig-sandige Textur kleiner ausfällt.

Tab. 1: Physiko-chemische Parameter und z-Werte der in Abbildung 3 dargestellten Oberböden.

Textur	Humus [Masse-%]	z-Wert quasi-gesättigt	z-Wert -15 kPa
SI2	2,9 ± 0,01	20,8 ± 0,8	47,5 ± 1,9
Lt3	7,4 ± 0,05	10,0 ± 2,5	60,2 ± 1,5

Die Abhängigkeit des Festigkeitsparameters *Integral z* bei verschiedenen Matrixpotentialen von der Textur ist in Abbildung 3 dargestellt. Im quasi-gesättigten Zustand wird der z-Wert kleiner je toniger die Bodenart wird. Demzufolge ist die mikrostrukturelle Stabilität bei Wassersättigung in tonigen Böden geringer als in sandigen Böden, wodurch die Erodierbarkeit bei hydro-mechanischer Belastung wie z.B. Wellenschlag zunimmt.

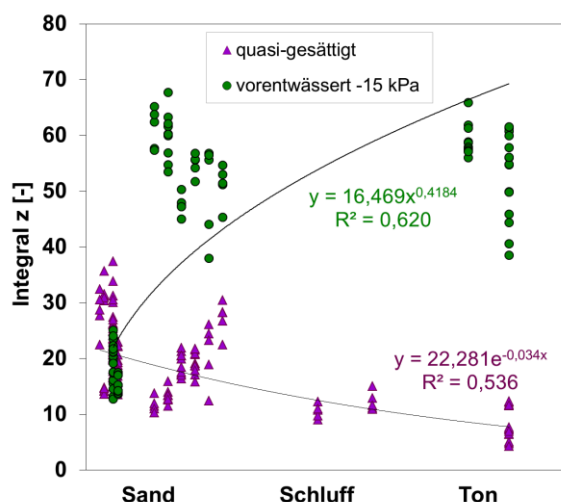


Abb. 3: Korrelation zwischen Bodenart und dem Festigkeitsparameter *Integral z* [-] bei unterschiedlichen Matrixpotentialen.

Im Gegensatz dazu nimmt der z-Wert bei einem Matrixpotential von -15 kPa mit zunehmendem Tongehalt zu, wobei der durch Meniskenkräfte auftretende stabilisierende Effekt schon bei geringen Tongehalten deutlich hervortritt.

## Diskussion

Als erste Erklärung der gewonnenen Ergebnisse dient die Kenntnis, dass das Scherverhalten auf Mikroebene zunächst von Partikelgröße und -form abhängt (Santamarina & Shin 2009). Während rundliche Partikel ein turbulentes Scherverhalten aufweisen, was auf Mak-

roebene zu hohen Restreibungswinkeln führt, zeigen plättchenförmige Partikel ein gleitendes Scherverhalten mit niedrigen makroskopischen Restreibungswinkeln (Smith & Reitsma 2002).

Allerdings ist der Einfluss, den die Tonfraktion auf die Scherfestigkeit hat, nicht allein auf die Partikelgröße und -form zurückzuführen, was einer rein physikalischen Einflussnahme gleichkommen würde, sondern im Besonderen auf die chemischen Eigenschaften der Fraktion < 2 µm. Diese sind im Wesentlichen eine Funktion der interpartikulären Kräfte, die von Oberflächenladung also der Mineralogie der Tonpartikel, der Wertigkeit der austauschbaren Kationen, der Ionenkonzentration im Porenwasser sowie vom pH der Bodenlösung abhängen. Unterschiede in Kanten- und Flächenladungen resultieren in unterschiedlichen Konfigurationen von Tonplättchen (Lagaly 1993), die unterschiedlich auf Scherbeanspruchung reagieren. Santamarina & Shin (2009) zeigten, dass Kartenhausstrukturen bei Scherung kollabieren und die Partikel sich nachfolgend ausrichten, was eine Abnahme der Scherfestigkeit bewirkt.

Letztendlich erhöhen im quasi-gesättigten Zustand adsorbierte Wasserschichten um Partikel deren Mobilität und wirken wie ein Schmierfilm. Je mehr Wasserschichten an einem Partikel adsorbieren, desto größer wird der Abstand zwischen den Partikeln. Folglich werden die elektrostatischen Wechselwirkungen zwischen den Partikeln reduziert und der Kapillarsog geht bei vollständiger Wassersättigung verloren (Al-Shayea 2001). Zusätzlich können sich angelagerte Wassermoleküle freier bewegen, wodurch die Scherfestigkeit der Wassermoleküle abnimmt (Santamarina & Shin 2009).

Durch die Entwässerung auf ein Matrixpotential von -15 kPa kommen die Kapillarkräfte, die durch Wassersättigung verloren gegangen sind, wieder zum Tragen und Meniskenkräfte tragen zur Stabilisierung der Mikrostruktur bei. Au-

ßerdem werden die um die Partikel adsorbierten Wasserfilme bei Austrocknung dünner. Dies führt zu einer geringeren Mobilität der Wassermoleküle und zu einer höheren Scherfestigkeit der Wasserfilme. Denn je dichter die Wassermoleküle sich an der Oberfläche der Partikel befinden, desto stärker werden sie adsorbiert und dementsprechend hoch ist ihre Viskosität. Durch den verringerten Abstand zwischen den Partikeln werden auch elektrostatische Wechselwirkungen wieder verstärkt (Santamarina & Shin 2009).

Da die untersuchten Oberböden aus dem Bereich oberhalb der gemittelten Brackwassergrenze stammen, konnte ein dispergierender Effekt durch Salzgehaltsänderungen bislang nicht festgestellt werden. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass mit abnehmender Entfernung zur Elbmündung und zunehmender Ionenkonzentration im Bodenwasser die Scherwiderstände zwischen den Partikeln abnehmen, da eine Zunahme der Ionenkonzentration eine Vergrößerung der diffusen Doppelschicht nach sich zieht und somit die Abstoßung zwischen den Partikeln vergrößert wird. Dies ist nicht nur bei höheren Ionenkonzentrationen der Fall, sondern auch, wenn vermehrt einwertige austauschbare Kationen vorliegen (Kaya 2009), wie beispielsweise Natrium aus dem Meerwasser.

### Schlussfolgerung

Die an Oberböden von Watt- und Marschböden durchgeführten AST zeigen, dass die Festigkeit der Mikrostruktur tidebeeinflusster Böden durch das *Intergral*  $z$  quantifiziert werden kann und dessen Betrag um so größer wird, je stabiler bzw. elastischer das Bodenmaterial ist. Bei abnehmendem Matrixpotential wird die mikrostrukturelle Stabilität durch Mensikenkräfte gestärkt. Im Gegensatz dazu steigert Wassersättigung die Erodierbarkeit, d.h. das uferbildende Substrat ist anfälliger gegenüber hydro-mechanischer Belastung wie z.B. Wellenschlag. Der stabilisierende Effekt

durch Menisken bzw. die destabilisierende Wirkung von Wasser ist in feinkörnigeren/tonigeren Substraten größer als in sandigem Material. Es konnte gezeigt werden, dass die Bodenmikrostruktur neben dem Wassergehalt außerdem von Textur und Gehalt an organischer Substanz beeinflusst wird.

### Literatur

- AL-SHAYEA, N.A. (2001). Engineering Geology **62**: 319 - 342.
- BAUMGARTEN, W., DÖRNER, J., HORN, R. (2013). Soil Till. Res. **129**: 48 - 60
- BAUMGARTEN, W., NEUGEBAUER, TH., FUCHS, E., HORN, R. (2012). Soil Till. Res. **125**: 80 - 88.
- GHEZZEHEI, T.A. & OR, D. (2001). Soil Sci. Soc. Am. J. **65 (3)**: 624 - 637.
- HOLTHUSEN, D., PETH, S., HORN, R. (2010). Soil Till. Res. **111**: 75 - 85.
- KAYA, A. (2009). Engineering Geology **108**: 252 - 258.
- LAGALY, G. (1993). In: JASMUND, K., LAGALY, G. (Hrsg.): Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt. Kapitel 3, 89 – 167. Steinkopff Verlag, Darmstadt.
- MARKGRAF, W. & HORN, R. (2009). In: Gragg, L.P., Cassell J.M. (Hrsg.): Progress in Management Engineering. Kapitel 9, 237 - 279. Nova Science Publishers, Hauppauge, NY.
- MARKGRAF, W., HORN, R., PETH, S. (2006). Soil Till. Res. **91**: 1 – 14
- SANTAMARINA, J.C. & SHIN, H. (2009). In: HATZOR, Y.H., SULEM, J., VARDOULAKIS, I. (Hrsg.): Meso-Scale Shear Physics in Earthquake and Landslide Mechanics. Kapitel 15, 159 – 190. CRC Press.
- SMITH, D.W. & REITSMA, M. G. (2002). In: VULLIET, L., LALLOUI, L., SCHREFLER, B. (Hrsg.): Environmental Geomechanics. S. 27 – 44. EPFL – Centre Midi, Lausanne, Schweiz.