

Tagungsbeitrag zur: Jahrestagung der DBG, Kom. I  
Titel der Tagung: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen  
Veranstalter: DBG, September 2011, Berlin und Potsdam  
Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation)  
<http://www.dbges.de>

## **Wirkung von Düngung auf Fließeigenschaften der Bodenlösung sowie mikroskalige Scherfestigkeit des Bodens (Rheologie)**

Holthusen, D.<sup>1</sup>, Horn, R.<sup>1</sup>, Jänicke, M.<sup>1</sup>

### **Einleitung**

Das Verhalten von Böden unter scheren den Kräften ist abhängig von attraktiven und dispergierenden Komponenten, welche gegen und mit der Scherspannung wirken: Als attraktiv gelten verbindende Substanzen wie organischer Kohlenstoff, mehrwertige Kationen und Metalloxide und -hydroxide, elektrostatische Anziehungskräfte sowie gespanntes Wasser in Form von Menisken. Dispergierend dagegen sind einwertige Salze wie Na und K sowie ungespanntes Wasser.

Düngung führt sowohl attraktiv als auch dispergierend wirkende Substanzen zu (Salze wie Ca, K und Na, organische Substanz), ergänzt um indirekte Wirkungen über gesteigerte Pflanzenproduktivität und dadurch mehr organischer Substanz sowie verstärkte Schrumpfungintensität durch erhöhten Wasserentzug der Wurzeln. Düngung erhöht darüber hinaus die Aktivität bodenbürtiger Organismen wie u. a. Regenwürmer, welche stabilisierende Bioporen schaffen bzw. über ihre Ausscheidungen Partikel verkleben.

Die Veränderung von physikalischen Eigenschaften der Bodenlösung durch Düngung wurde in der Literatur bislang wenig untersucht, könnte aber besonders hin-

sichtlich der Viskosität einen Einfluss auf viele Transportprozesse haben.

Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen war es, bodenphysikalische Stabilitätsparameter der Mikro- bzw. Mesoskala (mikroskalige Scherfestigkeit  $\tau_{\max}$  bzw. zyklische Kompressibilität  $c_n$ ) u. a. durch Veränderungen der Bodenlösungsviskosität  $\eta$  infolge von Düngung zu erklären.

### **Material und Methoden**

Für die Messungen wurden ungestörte Proben in Stechzylindern (ca. 100 und 300 cm<sup>3</sup>) aus einer Parabraunerde aus Löss von vier Varianten mit und ohne organische oder mineralische Düngung eines Dauerdüngeversuchs in der Nähe von Bonn (Dikopshof) entnommen: ungedüngt, NPKCa (mineralische Volldüngung mit ASS, TSP, 60er Kornkali und Branntkalk), Mist (Festmist) sowie NPKCa+Mist. Es wurden jeweils 200 dt Stallmist zu den Fruchtfolgegliedern Kartoffel, Zuckerrüben und Winterroggen gegeben; des weiteren wurden Perserklee und Winterweizen angebaut. Entsprechend der Kulturen ergibt sich über 5 Jahre gemittelt eine Gabe von 46 kg N, 31 kg P, 116 K und 229 kg Branntkalk je ha.

Aus den kleineren Stechzylindern wurden für die Messungen der mikroskaligen Scherfestigkeit Proben ausgestochen und nach Aufsättigung bzw. Aufsättigung und Entwässerung auf -6 kPa auf 2,5 cm Durchmesser und 4 mm Höhe getrimmt. Die Messungen erfolgten mit einem Amplitudentest im Rheometer MCR 300 der Fa. Anton Paar (Stuttgart) mit einem profilierten Platte-Platte-Messsystem nach den bei Markgraf et al. (2006) beschriebenen Einstellungen. Zur Auswertung wurde der maximale Scherwiderstand ( $\tau_{\max}$ ) während der Messung herangezogen.

Die großen Stechzylinder wurden zyklischen Belastungen nach Vorentwässerung auf -6 kPa unterworfen (Peth et al. 2010). Ein Zyklus bestand dabei aus 30 s Auflast (30 kPa) und 30 s Entlastung über 100 Zyklen in einem pneumatischen Ödometer. Zur Auswertung wurde der Steigungsparemeter  $c_n$  einer linearen Regressionsgerade durch die Porenziffer  $e$  in Abhängigkeit von der logarithmierten Zahl der Zyk-

<sup>1</sup> Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Str. 2, D-24118 Kiel.  
[d.holthusen@soils.uni-kiel.de](mailto:d.holthusen@soils.uni-kiel.de)

len  $n$  verwendet ( $e_{init}$  ist die interpolierte Ausgangsporenziffer vor Belastung):

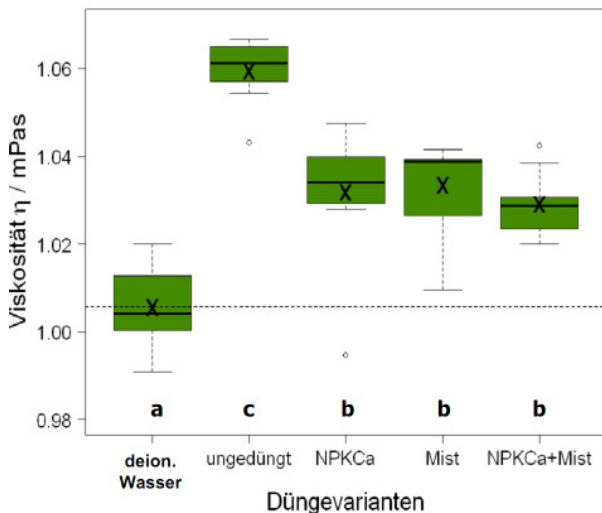
$$e = e_{init} + c_n \cdot \log n$$

Da die Porenziffer sinkt, hat  $c_n$  ein negatives Vorzeichen, zur Vereinfachung wird  $c_n$  jedoch im Folgenden als Betrag gezeigt.

Die Bodenlösung wurde gewonnen durch Herstellen eines Boden-Wasser-Gemisches entsprechend den Verhältnissen bei Sättigung (in Gewichtsprozent) und Zentrifugieren für 30 min bei 9.000 U/min nach 24 h Gleichgewichtseinstellung. Anschließend wurde der Überstand durch Filtrieren von den Schwebstoffen befreit und die Newton'sche Viskosität mittels einer Scherratenrampe von  $10^{-4}$  bis  $100 \text{ s}^{-1}$  im Rotationsmodus mit einem Kegel-Platte-System bestimmt.

### Ergebnisse

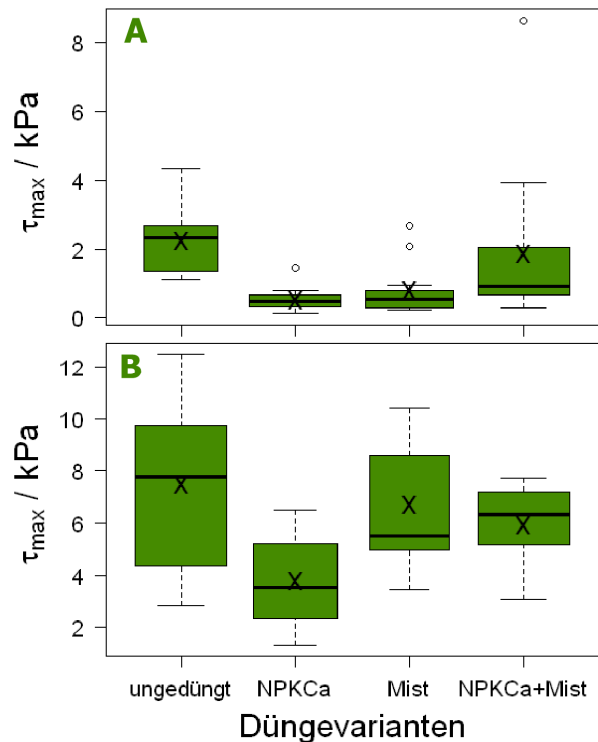
Die Bodenlösung unterschied sich hinsichtlich der Viskosität  $\eta$  deutlich von deionisiertem Wasser (Abb. 1). Im Vergleich zu deionisiertem Wasser stieg  $\eta$  der Bodenlösung eines ungedüngten Bodens um ca. 0,05 mPas auf ca. 1,06 mPas. Düngung führte wiederum zu Verringerung der Viskosität auf Werte von etwa 1,03 mPas.



**Abb. 1:** Einfluss der Düngung auf Viskosität  $\eta$  der Bodenlösung bei Sättigung (gestrichelte Linie = Mittelwert von deionisiertem Wasser, x = Mittelwert, Linie = Median,  $n = 10$ , untersch. Buchstaben zeigen statist. Unterschiede,  $p \leq 0,05$ )

Die Messungen des mikroskaligen Scherwiderstandes  $\tau_{max}$  zeigten Unterschiede in Abhängigkeit vom Vorentwässerungsgrad: Während die gesättigt gemessenen Proben (Abb. 2A) hauptsächlich Unterschiede

zwischen ungedüngten und gedüngten Proben zeigten, waren bei -6 kPa Vorentwässerung die Mist-Varianten stabiler als die NPKCa-Variante (Abb. 2B). In beiden Fällen wies die ungedüngte Probe die absolut höchsten Werte auf, welche nur erreicht wurden bei kombinierter organischer und mineralischer Düngung (NPKCa+Mist, bei 0 kPa) bzw. von den beiden mit Mist gedüngten Varianten (bei -6 kPa).

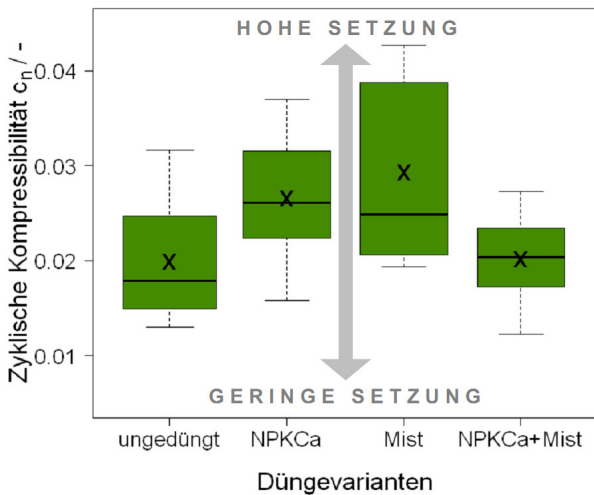


**Abb. 2:** Mikroskalige Scherfestigkeit  $\tau_{max}$  gesättigter Proben (A) und nach Vorentwässerung auf -6 kPa (B) (x = Mittelwert, Linie = Median,  $n = 8-12$ , keine statist. Unterschiede,  $p \leq 0,05$ ) (aus Holthusen et al. 2011a)

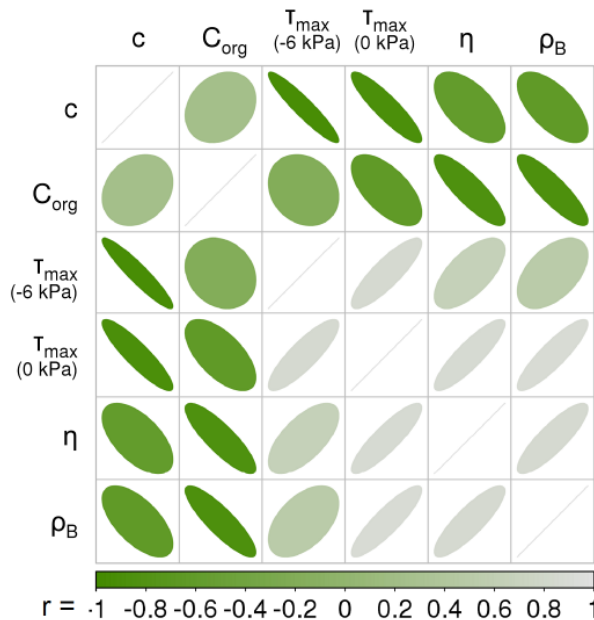
Der Mesoskalenparameter zyklische Kompressibilität  $c_n$  zeigte ein ähnliches Verhalten wie der mikroskalige Scherwiderstand  $\tau_{max}$ , wenn man berücksichtigt, dass ein hoher Wert eine geringe Festigkeit anzeigt, nämlich eine hohe Kompressibilität (Abb. 3). Auch hier waren die ungedüngte sowie die mit Mist und NPKCa gedüngte Variante am stabilsten. Allerdings ist hier bei -6 kPa Entwässerung die nur mit Mist gedüngte Variante der NPKCa-Variante unterlegen.

Um Skalenbeziehungen zwischen  $c_n$  und  $\tau_{max}$  sowie den Einflussfaktoren Lagerungsdichte  $\rho_B$  und Gehalt an organischem Kohlenstoff  $C_{org}$  und der Viskosität der Bodenlösung herzustellen, wurde ein Korrelogramm erstellt (Abb. 4). Die Färbung und

Form der Ellipsen gibt an, wie eng die Korrelationen sind (je schmaler die Ellipse, umso höher), die Lage der Ellipsen entspricht der Richtung. So zeigt  $\tau_{\max}$  bei Sättigung eine höhere Abhängigkeit von  $\eta$  als bei -6 kPa Vorentwässerung. Die ebenfalls bei -6 kPa gemessene  $c_n$  ist ähnlich gering mit  $\eta$  korreliert, dafür korreliert  $\eta$  negativ mit  $C_{\text{org}}$ , ebenso wie wie Lagerungsdichte  $\rho_B$ . Eine enge Korrelation findet sich zwischen den Parametern von Mikro- und Mesoskala,  $\tau_{\max}$  und  $c_n$ .



**Abb. 3:** Zyklische Kompressibilität  $c_n$  nach Vorentwässerung auf -6 kPa ( $x$  = Mittelwert, Linie = Median,  $n = 8$ , keine statist. sign. Unterschiede,  $p \leq 0,05$ ) (aus Holthusen et al. 2011b)



**Abb. 4:** Correlogramm von zyklischer Kompressibilität  $c_n$ , Gehalt an organischem C  $C_{\text{org}}$ , maximalem Scherwiderstand  $\tau_{\max}$  (bei 0 und -6 kPa), Viskosität der Bodenlösung  $\eta$  und Lagerungsdichte  $\rho_B$  ( $n = 4$ , keine statist. sign. Korrelationen,  $p \leq 0,05$ , Medianwerte)

Bei der Lagerungsdichte  $\rho_B$  hat die ungedüngte Variante die höchste Dichte, die mit Mist gedüngten Varianten jedoch um etwa  $0,1 \text{ g cm}^{-3}$  geringere Werte (Tab. 1). Mit Düngung erhöhte sich der Anteil an organischem Kohlenstoff  $C_{\text{org}}$ ; besonders die Mist-Varianten erreichten um etwa 0,3 bzw. 0,5 Einheiten höhere Gehalte.

**Tab. 1:** Gehalt an organischem Kohlenstoff  $C_{\text{org}}$  und Lagerungsdichte  $\rho_B$  ( $n(C_{\text{org}}) = 1$ , ( $\rho_B$ ) = 8) (aus Holthusen et al. 2011a)

Düngung	$C_{\text{org}} / \%$	$\rho_B / \text{g cm}^{-3}$
ungedüngt	0,67	1,59
NPKCa	0,86	1,51
Mist	1,03	1,47
NPKCa+Mist	1,21	1,49

### Diskussion

Es zeigte sich, dass die mikroskalige Scherfestigkeit  $\tau_{\max}$  über die zyklische Kompressibilität  $c_n$  auf die Mesoskala (hier entsprechend großen Stechzylindern von ca  $300 \text{ cm}^3$  Volumen) aufskaliert werden kann. Gemeinsamer Einflussfaktor scheint die Lagerungsdichte zu sein. So liegt im ungedüngten Boden die höchste Dichte vor, so dass hier sich eine hohe scheinbare Kohäsion aufbauen kann (Mitchell und Soga 2005). Düngung führte generell zu einer Verringerung der Dichte, zum einen aufgrund der direkt zugeführten organischen Substanz bei den Mistvarianten, zum anderen infolge des erhöhten Pflanzenwachstums und damit erhöhten Menge der organischen Substanz (Kay 1998). Düngung und damit eine Erhöhung des Anteils an organischem Kohlenstoff verringert die Zahl der Korn-Korn-Kontakte, so dass sich sowohl die Scherwiderstände zwischen einzelnen Partikeln ( $\tau_{\max}$ ) als auch die Kompressibilität eines größeren Bodenvolumens ( $c_n$ ) veränderten:  $\tau_{\max}$  verringerte sich und  $c_n$  erhöhte sich. Die Art der Düngung hatte einen deutlicheren Einfluss bei  $\tau_{\max}$ , da hier Mist trotz geringerer Lagerungsdichte eine ähnliche Scherfestigkeit hervorrief wie die durch die Dichte schärfste Variante "ungedüngt".

Die Viskosität einer Bodenlösung ist deutlich verschieden von derjenigen reinen Wassers, u. a. kann es sich dabei um eine Erhöhung der Viskosität durch gelöste Sal-

ze handeln, allerdings kann auch das Vorhandensein von feinsten Schwebeteilchen, welche durch die Zentrifugation und Filtration nicht entfernt wurden, nicht ausgeschlossen werden. Besonders in der ungedüngten Variante mit weniger verklebenden Substanzen kann das deionisierte Wasser zum Lösen von Kittsubstanzen (Salzen, organische Verbindungen) (vgl. Keren und Ben-Hur 2003) geführt haben, wodurch feinste Partikel dispergiert wurden und im Filtrat noch vorhanden waren.

Düngung und damit mehr organische Substanz bedeuten das Vorhandensein vieler organischer Säuren, welche evtl. die Viskosität herabsetzen, hierzu sind gezielte Untersuchungen an mit organischen Säuren versetztem Wasser durchzuführen. Read und Gregory (1997) fanden bei Untersuchungen der Viskosität von Mucilage eine doppelt hohe Viskosität wie von Wasser, was den hier gefundenen Ergebnissen widerspricht. Auch kann es aufgrund unterschiedlicher Boden:Wasser-Verhältnisse zu unterschiedlichen Lösungskonzentrationen gekommen sein.

### Schlussfolgerung

Organische oder mineralische Einzeldüngung führte zum Aufbau von organischer Substanz bzw. lieferte diese direkt, wodurch der Boden zunächst strukturschwächer wird, da die Dichte sich verringert. Dabei wurde der Effekt auf Scherwiderstände auf Partikelebene durch die verklebende Wirkung der organischen Substanz aufgehoben, nicht jedoch hinsichtlich zyklischer Kompressibilität.

Die Kombination von organischer und mineralischer Düngung aber lockerte den Boden, ohne die Scherfestigkeit zu reduzieren bzw. die Setzungsempfindlichkeit zu erhöhen. Je weniger der Boden entwässert war, umso mehr Bedeutung hatte dabei die Bodenlösung.

### Danksagung

Die Messungen fanden statt im Rahmen eines von der K+S KALI GmbH, Kassel, finanzierten Projektes.

### Literatur

Kay, B. D. (1998): Soil structure and organic carbon: a review, in Lal, R., Kimble, J. M., Follett, R. F., Stewart, B. A. (Eds.): Soil processes and the

carbon cycle. CRC Press, Boca Raton, pp. 169-197.

Keren, R., Ben-Hur, M. (2003): Interaction effects of clay swelling and dispersion and CaCO<sub>3</sub> content on saturated hydraulic conductivity. *Aust. J. Soil Res.* 41(5), 979-989.

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.

Mitchell, J. K., Soga, K. (2005): Fundamentals of soil behavior (3. ed.). Wiley, Hoboken, NJ, p. 577.

Peth, S., Rostek, J., Zink, A., Mordhorst, A., Horn, R. (2010): Soil testing of dynamic deformation processes of arable soils. *Soil Till. Res.* 106(2), 317-328.

Read, D. B., Gregory, P. J. (1997): Surface tension and viscosity of axenic maize and lupin root mucilages. *New Phytol.* 137(4), 623-628.

Holthusen, D., Jänicke, M., Peth, S., Horn, R. (2011a): Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: I. Mesoscale capacity and intensity parameters. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, im Druck.

Holthusen, D., Jänicke, M., Peth, S., Horn, R. (2011b): Physical properties of a Luvisol at the meso- and microscale due to different fertilization treatments: II. Physico-chemical behavior at the microscale by means of rheometry and its relation to the mesoscale parameter cyclic compressibility *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, eingereicht.