

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Bulletin für angewandte Geologie |
| Herausgeber: | Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie |
| Band: | 10 (2005) |
| Heft: | 2 |
| Artikel: | Wie wichtig ist die Vorschubgeschwindigkeit beim direkten Scherversuch bindiger Böden? |
| Autor: | Bönsch, Carola |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-225570 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wie wichtig ist die Vorschubgeschwindigkeit beim direkten Scherversuch bindiger Böden? Carola Bönsch¹

Stichworte: Kastenschergerät, direkter Scherversuch, Ton, bindige Böden, Scherfestigkeit, Schergeschwindigkeit

Keywords: direct shear test, clay, cohesive soil, shear strength, shear velocity

Zusammenfassung

Da im Allgemeinen davon ausgegangen wird, dass bei bindigen Böden bei zu schneller Versuchsdurchführung im direkten Scherversuch Porenwasserdrücke an der Scherfuge entstehen und die ermittelten Festigkeiten beeinflussen, wurden an einem mittel bis ausgeprägt plastischen Ton Scherversuche mit verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 0,002 und 0,150 mm/min durchgeführt. Die Bruchspannungen im direkten Scherversuch nehmen bei Vertikalspannungen von 10, 25 und 50 kN/m² mit der Vorschubgeschwindigkeit zu, bei 100 kN/m² sind jedoch keine signifikanten Unterschiede der Bruchspannung festzustellen. Mit Ausnahme der höchsten Vorschubgeschwindigkeit der Versuchsserie nehmen der Reibungswinkel mit zunehmender Geschwindigkeit geringfügig zu und die Kohäsion ab, sofern man im Bereich zwischen 18 und 25° Reibungswinkel und 10 bis 20 kN/m² Kohäsion von signifikanten Unterschieden ausgehen kann. Allerdings liegt die Streuung der Messwerte bei statistischer Wiederholung in einer ähnlichen Größenordnung. Wassergehalt bzw. Sättigungsgrad und Bodendichte beeinflussen das Ergebnis stärker als die gewählte Abschergeschwindigkeit.

Abstract

It is the common opinion that pore water pressure at the shear splice influences the shear strength if the shear velocity is too fast referring to the water permeability of the soil. Therefore direct shear tests with shear velocities between 0,002 and 0,150 mm/min were made. The failure stress increases about linearly with the shear velocity at lower normal loads. At 100 kN/m² vertical stress there is no significant change of failure stress due to different velocities. The derived shear parameters friction angle and cohesion show a minimal dependence of their values from the shear velocity. Angle of internal friction increases from 18 to 25 degree and cohesion decreases from 20 to 10 kN/m². Certainly recurring tests under same conditions the scattering of values is in similar dimension. It became apparent that moisture content and the density have more influence on the shear strength than the shear velocity.

¹ Fachbereich Geowissenschaften Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle/Saale

1. EINLEITUNG

Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass sich bei zu schneller Durchführung des direkten Scherversuches an bindigen Böden an der Scherfuge aufbauende Porenwasserdrücke wesentlichen Einfluss auf die zu ermittelnden Scherparameter haben. Im Rahmenscherversuch ist eine direkte Messung des Porenwasserdrucks jedoch nicht möglich, so dass man durch indirekte Methoden oder durch Vergleichsmessungen im Triaxialgerät allenfalls einen Hinweis auf seine Größenordnung erhalten kann. Die Ergebnisse von Triaxialversuchen sind jedoch aufgrund der freien Ausbildung der Scherfuge im Gegensatz zum direkten Scherversuch mit seiner erzwungenen Gleitfuge nur bedingt vergleichbar. Insbesondere bei Fragestellungen auf eher niedrigem Spannungsniveau ist damit zu rechnen, dass die gerätebedingte Streuung der Versuchsergebnisse eines herkömmlichen Schergerätes auch bei sorgfältigster Probennahme und -präparation diesen Porenwasserdruckeffekt überlagert. Diese Studie geht diesen Fragen am Beispiel eines leicht überkonsolidierten, mittel bis ausgeprägt plastischen Tones, der sich durch die ausgesprochene Homogenität

seines Vorkommens auszeichnet, unter verschiedenen Versuchsbedingungen im Rahmenscherversuch nach. In dieser Arbeit soll das Hauptaugenmerk auf den Versuchen liegen, die mit natürlichem Wassergehalt unter Wasserbedeckung abgesichert worden sind. Diese Vorgehensweise entspricht den Empfehlungen der deutschen DIN-Norm 18137-3.

2. Charakterisierung des Probenmaterials

Die Proben für die Rahmenscherversuche wurden in größeren Blöcken bzw. in Stechzylindern in einer auflässigen Tongrube am Westrand von Halle/Saale in einem mächtigen homogenen Kapseltonhorizont tertiären Alters gewonnen, aus den Blöcken herauspräpariert bzw. homogenisiert (Versuche mit einem Wassergehalt an der Fließgrenze) und mit möglichst gleicher Dichte und gleichem Wassergehalt für den Scherversuch präpariert.

Der Ton muss als überkonsolidiert angesehen werden. Neben einer gewissen Sedi-

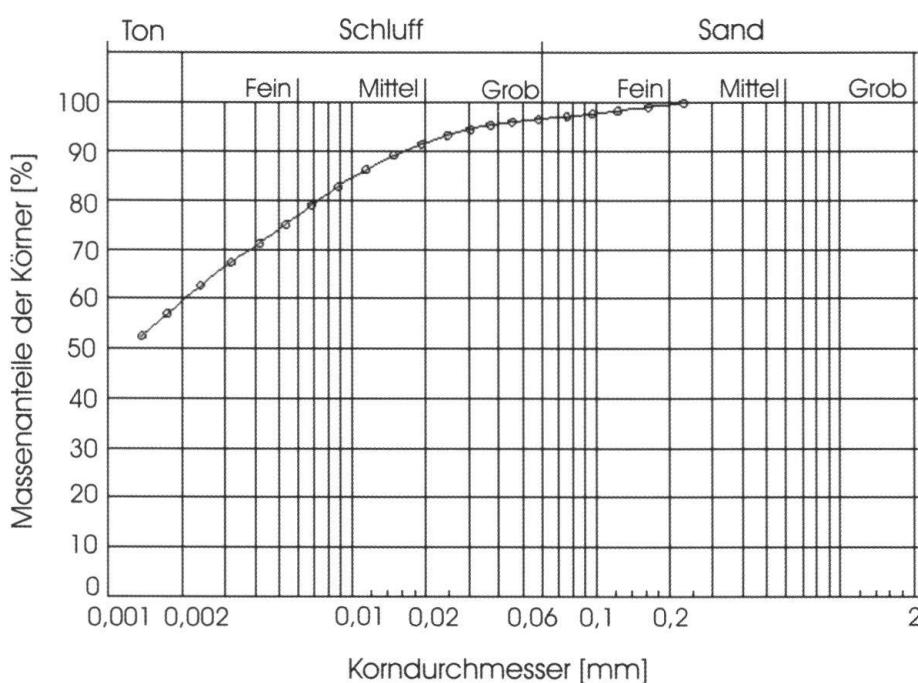


Fig. 1:
Kornverteilungskurve des Tons.

mentbedeckung im Tertiär und Quartär ist zumindest von einer mehrmaligen Eisüberdeckung während der glazialen Perioden auszugehen. Die natürliche Feuchtdichte des Tons beträgt ca. 2,0 g/cm³.

Die Korngrößenverteilung wurde mittels Aräometermethode bestimmt. Die Summenkurve ist in Fig. 1 dargestellt. Das Material hat einen Anteil von 60% mit einem Durchmesser < 2 µm. Es kann nach seiner Korngrößenverteilung als stark schluffiger Ton angesprochen werden. Seine Korndichte beträgt 2,65 g/cm³.

Die Plastizitätseigenschaften des Tons wurden nach DIN 18122 bestimmt. Die Fließgrenze liegt bei 45,5% und die Ausrollgrenze bei 25,4% Wassergehalt. Es ergibt sich eine Plastizitätszahl IP von 20,2%. Aus dem natürlichen Wassergehalt von 25,7% ergibt sich die Konsistenzzahl $I_C = 0,96$. Es handelt sich somit um einen mittelplastischen Ton, der unter natürlichen Gegebenheiten mit einem Wassergehalt im Grenzbereich zwischen steifer und halbfester Konsistenz vorkommt. Auch nach Niederschlagsereignissen übersteigt der natürliche Wassergehalt des Tons nicht 28%, was einem Sättigungsgrad von 80% entspricht.

Die Wasserdurchlässigkeit wurde mit fallendem hydraulischem Gradienten ermittelt. Dazu wurde aus einem Stechzylinder eine ungestörte Probe in einen Ödometerring mit 7,1 cm Durchmesser und 2,0 cm Höhe eingebaut und mit einer Auflast beaufschlagt, die die Quellhebungen gerade verhinderte. Der so ermittelte Wasserdurchlässigkeitsbeiwert beträgt $2,2 \times 10^{-9}$ m/s.

Die Messung der Saugspannung bzw. des Wasserrückhaltevermögens erfolgte in einer Druckmembranapparatur in einem Druckbereich zwischen 20 und 1500 kN/m², was p_F -Werten zwischen 2,3 und 4,2 entspricht. Der Wassergehalt bei einem Matrixpotential p_m bezogen auf Masse (für $d \geq 2$ mm weniger 20%) berechnet sich nach DIN-ISO 11274 nach folgender Formel:

$$w(p_m) = \{ m(p_m) - m_d \} / m_d \quad [1]$$

wobei:

$m(p_m)$: Feuchtmasse bei einem Matrixpotential p_m

m_d : Trockenmasse

Da das Wasser eine Dichte um 1 g/cm³ hat, kann aus der Wassermenge, die eine Probe unter definierten Saugspannungen enthält, auf das Porenvolumen geschlossen werden, wenn man eine kreisrunde Form der Poren mit Äquivalentdurchmesser voraussetzt. Dieses so ermittelte Porenvolumen entspricht nicht dem Gesamtporenvolumen, es repräsentiert einen Bereich eines oberen und eines unteren Grenzdurchmessers (Schlichting et al., 1995).

$$d = 0,3 / p \quad [2]$$

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in der Regel in einem Diagramm, in dem die Wassergehalte [%] gegen die p_F -Werte abgetragen werden. Je flacher der Verlauf der p_F -Kurve ist, um so bindiger und wasserhalbender ist der Boden.

Der untersuchte Ton hat eine relativ flache, mehr oder weniger gerade Saugspannungskurve (Fig. 2), was einer breiten Porenradienverteilung entspricht. Der Hauptporenanteil liegt bei Porengrößen unter 0,2 µm Durchmesser, was dem mit der verwendeten Druckmembranapparatur nicht mehr messbaren Bereich mit Saugspannungen über 1500 kN/m² entspricht. Zwischen 10 und 1000 µm gibt es ein zweites Maximum. Bei diesen Makroporen handelt es sich in erster Linie jedoch um Wurzelkanäle, da die ungestörte Probennahme für die Saugspannungsmessung in einem Schurf oberflächennah erfolgte und so die Durchwurzelung nicht vollständig auszuschließen war.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist davon auszugehen, dass die Wasserdurchlässigkeit des Tons gering genug ist, damit die Draina-

ge im direkten Scherversuch nicht schnell genug erfolgt und sich während des Versuchs Porenwasserüberdrücke einstellen, die die Festigkeit möglicherweise beeinflussen.

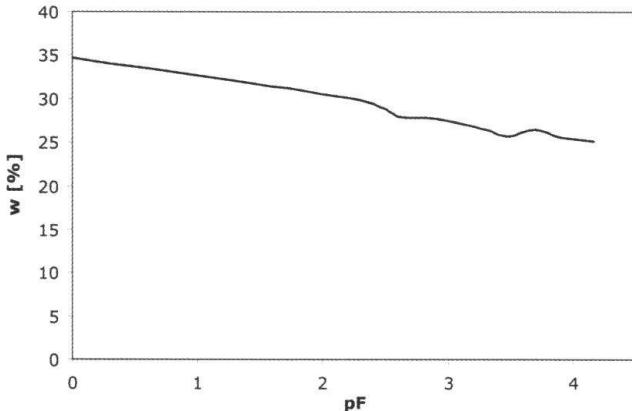


Fig. 2: p_F -Kurve des untersuchten Tones.

3. Randbedingungen für die direkten Scherversuche

Es wurde ein Rahmenschergerät mit Parallelführung des Stempels verwendet, wie in der neuen DIN 18137-3 empfohlen. Die Scherkraft verteilt sich auf die beiden Führungen (7 und 8 in Fig. 3). Der untere Rahmen ist horizontal verschiebbar und die Führungen mit der Platte starr verbunden. Im Gegensatz zu Goldscheider (2003) wurde das Gerät baulich nicht verändert, so dass der obere Scherrahmen möglicherweise durch sein Gewicht Kräfte auf die Probe übertragen konnte. Der Scherweg beträgt bei dem verwendeten Rahmenschergerät 20 mm.

Die zulässige Vorschubgeschwindigkeit v_f kann (nach DIN 18137-3) entweder aus dem Scherweg s_f und der erforderlichen Konsolidationszeit t_{kon}

$$v_f = s_f / (12 \times t_{kon}) \quad [3]$$

abgeschätzt, oder in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl (Tab. 1) angenommen werden. Entsprechend der Plastizitätszahl von 20,2% wäre nach der vorgeschlagenen Klassifizierung eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,04 mm pro Minute gerechtfertigt. Für diese Studie wurden 0,002 / 0,005 / 0,010 / 0,015 / 0,03 / 0,05 / 0,07 / 0,09 / 0,11 / 0,13 / 0,15 mm/min als Vorschubgeschwindigkeiten gewählt.

| I_p [%] | v_f [mm/min] |
|-----------|----------------|
| bis 25 | 0,040 |
| 25 bis 40 | 0,008 |
| über 40 | 0,002 |

Tab. 1: Die Vorschubgeschwindigkeit v_f im direkten Scherversuch in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl I_p (nach DIN 18137-3).

Wie sich in Vorversuchen zeigte, konnte die Konsolidierung mit dem in der DIN 18137-3 angegebenen Minimum von 30 min durchgeführt werden, so dass sich aus [3] ergibt:

$$v_f = 20 \text{ mm} / (12 \times 30 \text{ min}) = 0,056 \text{ mm/min} \quad [4]$$

Es wurden mehrere Versuchsreihen unter veränderten Randbedingungen durchgeführt. Die Versuche wurden teilweise abweichend von der DIN 18137-3 an Proben mit natürlichem Wassergehalt ohne nachträgliche Flutung sowie an künstlich aufbereiteten Proben durchgeführt. Der natürliche Wassergehalt lag etwas über dem Wassergehalt an der Ausrollgrenze. Die aufbereiteten Proben wurden mit einem Anfangswassergehalt nahe der Fließgrenze unter Wasserbedeckung abgeschert. Zur Bestimmung der effektiven Scherparameter wurden ein Teil der Proben unmittelbar nach Aufbringen der Überlagerungsspannung zur Konsolidation geflutet und unter Wasser abgeschert. Die Einzelproben wurden jeweils mit der Überlagerungsspannung konsolidiert, unter der sie später geschert wurden.

Wenn mit Kohäsion zu rechnen ist, sollen die Überlagerungsspannungen nicht zu dicht zusammen liegen, da sonst der Einfluss von Streuungen bei der Ermittlung der effektiven Scherparameter zu hoch ist (DIN 18137-3). Um die Einflüsse der Vorschubgeschwindigkeit vor allem in diesem kritischen Bereich

zu überprüfen, wurden geringe, in der Praxis wohl eher selten auftretende, Überlagerungsspannungen angewendet. Bei niedrigen Normalspannungen ist zudem der Einfluss von Probenstörungen und Gerätgereibung besonders hoch.

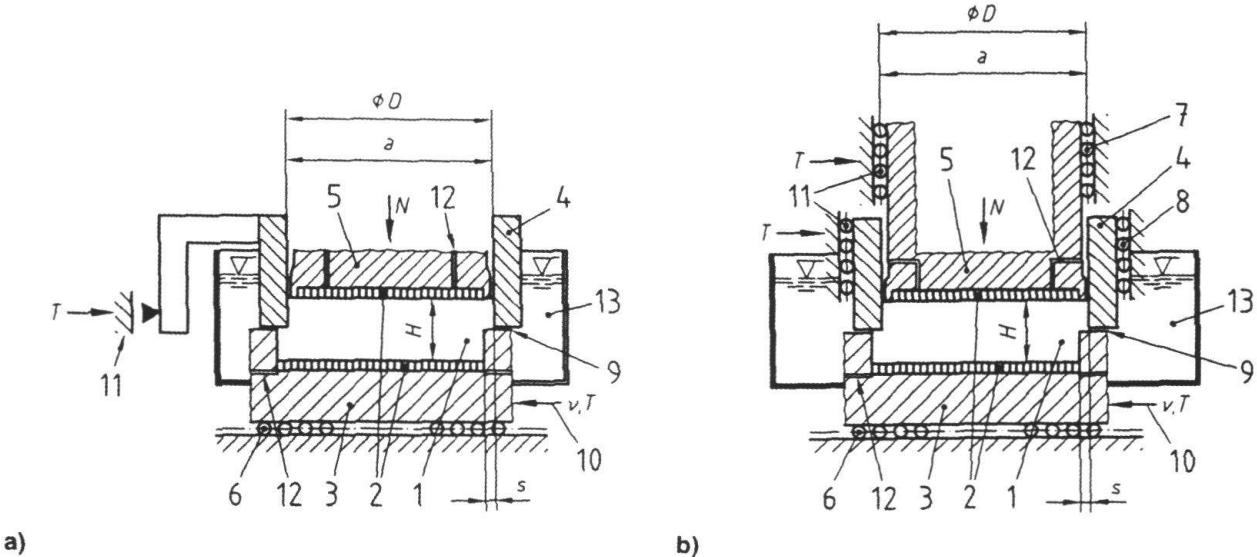


Fig. 3: Längsschnitt durch das Rahmenshergerät (DIN 18137-3)

a) Gerät mit verschiebbarer unterer Rahmen und ohne Parallelführung des oberen Rahmens und des Normalbelastungsstempels;

b) Gerät mit verschiebbarer unterer Rahmen und Parallelführung des oberen Rahmens und des Normalbelastungsstempels.

1) Probekörper,
2) Filterplatten,
3) unterer Rahmen – horizontal parallel geführt,
4) oberer Rahmen,
5) Stempel für Normalbelastung N,
6) Lagerplatte mit Horizontalführung des unteren Rahmens,
7) senkrechte Parallelführung des Stempels für Normalbelastung,
8) senkrechte Parallelführung des oberen Rahmens,
9) vertikal einstellbarer Spalt,
10) Einleitung des Vorschubs und der Scherkraft T,
11) Widerlager für die Scherkraft T am oberen Rahmen (und bei b) am oberen Stempel),
12) Dränagebohrungen,
13) Wassertank.

4. Ergebnisse

4.1 Abhangigkeit der Scherfestigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit

Die maximalen Scherkräfte der Einzelversuche nehmen mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit bei Vertikalspannungen von 10 bis 50 kN/m² mit einem mehr oder weniger linearen Trend zu. Für eine Auflastspan-

nung von 100 kN/m^2 lässt sich ein solcher Trend nicht mehr beobachten. Die Bruchkräfte sind hier bei allen Vorschubgeschwindigkeiten annähernd gleich. Die Standardabweichung von Wiederholungsversuchen bei gleichen Randbedingungen ist bei $0,15 \text{ mm/min}$ Vorschub etwas größer als bei $0,03 \text{ mm/min}$ Vorschubgeschwindigkeit. Je nie-

driger die Vertikalspannung, umso weniger reproduzierbar sind die gemessenen maximalen Scherspannungen bei gleichen Randbedingungen. Die Abweichung bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit beträgt zwischen 13 und 17% bei den niedrigen Laststufen und zwischen 3 und 6% bei 100 kN/m² Vertikalspannung (Tab. 2). Die Standardabweichung der Scherspannungen unter Einbeziehung aller Schergeschwindigkeiten ist bei ähnlichen Mittelwerten der Scherfestigkeit deutlich größer als bei Wiederholungsversuchen gleicher Geschwindigkeit. Eine Ausnahme bilden auch hier die Teilversuche mit 100 kN/m² Normalspannung. Deren Ergebnisse weichen ungeachtet der Vorschubgeschwindigkeit nicht deutlicher voneinander ab, als

bei Wiederholungsversuchen gleicher Geschwindigkeit. Dadurch ergeben sich für die Schergerade unterschiedliche Steigungen zwischen 18° und 25°. Je höher die Bruchkräfte bei den niedrigeren Vertikalspannungen sind, umso steiler wird die Schergerade. So ergeben sich tendenziell bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten höhere Reibungswinkel als bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten. Bei den schnellsten Versuchen dieser Serie ergab sich jedoch wieder ein wesentlich geringerer Reibungswinkel. Die Kohäsionskräfte verhalten sich jedoch genau umgekehrt (Fig. 4). Die Größenordnung von Reibungswinkel und Kohäsion ist für den untersuchten mittelplastischen Ton plausibel.

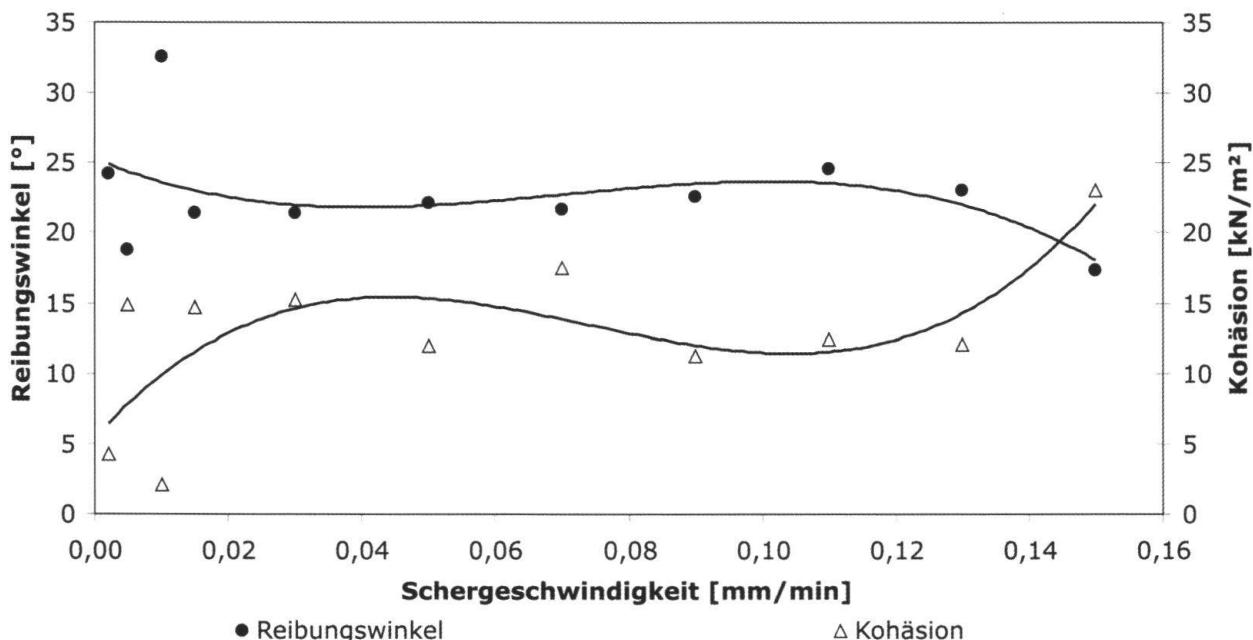


Fig. 4: Reibungswinkel und Kohäsion in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit.

| | 0,03 mm/min | | 0,15 mm/min | | gesamt | |
|-----|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| | Vertikalspannung [kN/m ²] | Mittelwert [kN/m ²] | Standard-abw. [kN/m ²] | Mittelwert [kN/m ²] | Standard-abw. [kN/m ²] | Mittelwert [kN/m ²] |
| 10 | 16,93 | 2,30 | 2,22 | 2,98 | 17,95 | 6,16 |
| 25 | 23,53 | 3,79 | 28,51 | 4,89 | 24,04 | 5,22 |
| 50 | 32,68 | 4,20 | 37,70 | 5,32 | 34,15 | 5,80 |
| 100 | 55,54 | 1,79 | 55,18 | 3,42 | 55,29 | 3,55 |

Tab. 2: Standardabweichungen der maximalen Scherspannungen.

Keinen Einfluss hat die Vorschubgeschwindigkeit auf das Volumenänderungsverhalten. Das Material verhält sich bis zum Bruch kontraktant. Bei der niedrigeren Vertikalspannung (10 und 25 kN/m²) kommt es gelegentlich zu geringfügig dilatantem Verhalten nach dem Peak der Scherspannung. Ursache hierfür sind Schleppungen von Material entlang der Scherfuge, die zu deren Aufweitung führen. Die meisten Proben zeigen jedoch auch nach dem Bruch noch eine Volumenverringerung. Zum Teil verhielten sich die Proben bei 10 kN/m² Auflast während des gesamten Versuchs volumenkonstant. Die Scherversuche bei 0,002, 0,005, 0,015, 0,050 und 0,130 mm/min Schergeschwindigkeit zeigten ausschließlich kontraktantes Verhalten. Bei den Versuchen mit 0,03, 0,07, 0,09, 0,11 und 0,15 mm/min trat bei den geringeren Vertikalspannungen nach Eintreten des Bruchs eine Volumenzunahme auf. Die absoluten Setzungsbeträge sind erwartungsgemäß deutlich zeitabhängig. Jedoch streuen die Werte von Wiederholungsmessungen bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit mit $\pm 0,25$ mm relativ stark. Interpoliert man die absoluten Setzungsbeträge in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit, so erhält man einen logarith-

mischen Zusammenhang. Daraus folgt, dass im Bereich niedriger Vorschubgeschwindigkeiten das Setzungsverhalten im Scherversuch stärker von der Schergeschwindigkeit beeinflusst wird. Ab einer Vorschubgeschwindigkeit von ca. 0,05 mm/min sind die Setzungsbeträge von der Geschwindigkeit weitestgehend unabhängig (siehe Fig. 5).

4.2 Abhängigkeit der Bruchspannung von Wassergehalt und Dichte

Natürlicher Wassergehalt und Einbaudichte sind weitestgehend voneinander unabhängig. Letztere ist durch den gestörten Einbau am stärksten beeinflusst. Der mittlere Wassergehalt war 26,1% mit einer Standardabweichung von 4,81% bei 130 präparierten Proben. Der Einbau erfolgte mit einem Sättigungsgrad zwischen 68 und 82%, was einem Wassergehalt von 23,5 bis 28,5% entspricht. Die relativ starken Schwankungen im Wassergehalt konnten nicht vermieden werden, da bei der Vielzahl der Versuche zum einen eine mehrfache Probennahme erforderlich war und zum anderen relativ lange Lagerungszeiten der Proben zustande kamen. Die sich einstellenden Ausbauwassergehalte sind in der Regel etwas höher und korrelier-

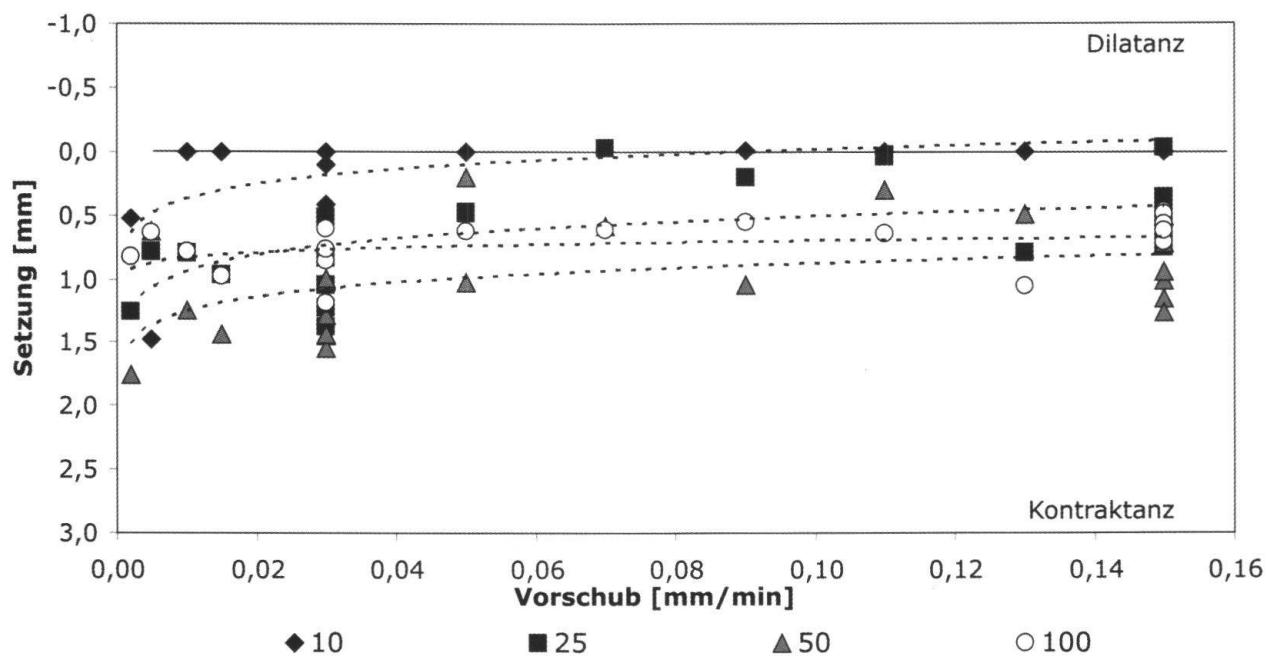


Fig. 5: Volumenänderungsverhalten: absolute Setzungsbeträge [mm] in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] bei unterschiedlichen Vertikalspannungen [kN/m²].

ren nicht mit den Einbauwassergehalten. Durch die Wasserbedeckung während des Versuchs stellte sich ein dem Spannungs niveau entsprechendes Wassergehaltsgleichgewicht ein. Die Sättigungsgrade nach Scherversuch betragen 73 bis 100%, wobei die niedrigeren Wassergehalte höheren Vertikalspannungen zuzuordnen sind. Es gibt keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen der Abschergeschwindigkeit und dem Endwassergehalt. Deshalb ist davon auszugehen, dass in allen Versuchen ausreichend Zeit war, um die den Spannungsbedingungen entsprechende Wassermenge aufzunehmen.

Die mittlere Einbaudichte betrug $2,02 \text{ g/cm}^3$. Dabei gab es Schwankungen zwischen $1,92$ und $2,17 \text{ g/cm}^3$. Diese Extremwerte bildeten jedoch die Ausnahme. Damit entsprachen die Einbaudichten der natürlichen Feuchtdichte des Tonvorkommens sehr gut. Die Standardabweichung der Dichte bei 130 gestört präparierten Proben betrug 1,87%. Bereits geringe Dichteunterschiede wirken sich gravierend auf die maximalen Scherkräfte aus. Bei langsamer Vorschubgeschwindigkeit ($0,03 \text{ mm/min}$) steigen die maximalen Scherkräfte mit zunehmender Dichte linear an. So erreicht der Versuch mit 10 kN/m^2 Vertikalspannung bei einer Dichte von $1,98 \text{ g/cm}^3$ eine Bruchspannung von

$14,66 \text{ kN/m}^2$ und bei einer Dichte von $2,11 \text{ g/cm}^3$ eine Bruchspannung von $21,14 \text{ kN/m}^2$. Ähnlich verhält es sich mit den anderen Laststufen. Die genauen Zahlenwerte sind Tab. 3 zu entnehmen. Bei den schnellen Scherversuchen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $0,15 \text{ mm/min}$ lässt sich kein so deutlicher Zusammenhang feststellen. Bei 10 kN/m^2 Vertikalspannung lassen sich keine signifikanten Unterschiede der Scherspannung in Abhängigkeit von der Dichte beobachten. Bei 25 und 50 kN/m^2 Vertikalspannung scheint die Bruchspannung mit zunehmender Dichte abzunehmen. Bei 100 kN/m^2 Vertikalspannung zeigten die Werte wieder einen leicht steigenden Trend (Tab. 3 und Fig. 6). In der graphischen Darstellung der Spannungen im Scherversuch wird außerdem erkennbar, dass die Beziehung zwischen Vertikalspannung und Scherspannung im Bereich niedriger Vertikalspannungen nicht linear ist.

4.3 Gerätebedingte Streuung

Die geräte- und probenbedingte Streuung der Bruchspannung liegt bei niedrigeren Vorschubgeschwindigkeiten ($0,03 \text{ mm/min}$) unabhängig von der beaufschlagten Vertikalspannung im Bereich von 10 kN/m^2 . Das

| $\sigma_{\text{vert}} [\text{kN/m}^2]$ | $0,03 \text{ mm/min}$ | | $0,15 \text{ mm/min}$ | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | $\rho [\text{g/cm}^3]$ | $\tau [\text{kN/m}^2]$ | $\rho [\text{g/cm}^3]$ | $\tau [\text{kN/m}^2]$ |
| 10 | 1,98 | 14,66 | 1,99 | 19,13 |
| | 2,11 | 21,14 | 2,04 | 20,06 |
| 25 | 1,99 | 24,99 | 2,01 | 37,18 |
| | 2,12 | 28,54 | 2,05 | 29,31 |
| 50 | 2,01 | 27,46 | 2,02 | 47,21 |
| | 2,04 | 32,40 | 2,06 | 35,95 |
| 100 | 2,03 | 54,06 | 1,99 | 52,15 |
| | 2,07 | 57,55 | 2,05 | 55,23 |

Tab. 3: Minimale und maximale Einbaudichten und ihre zugehörigen Bruchspannungen.

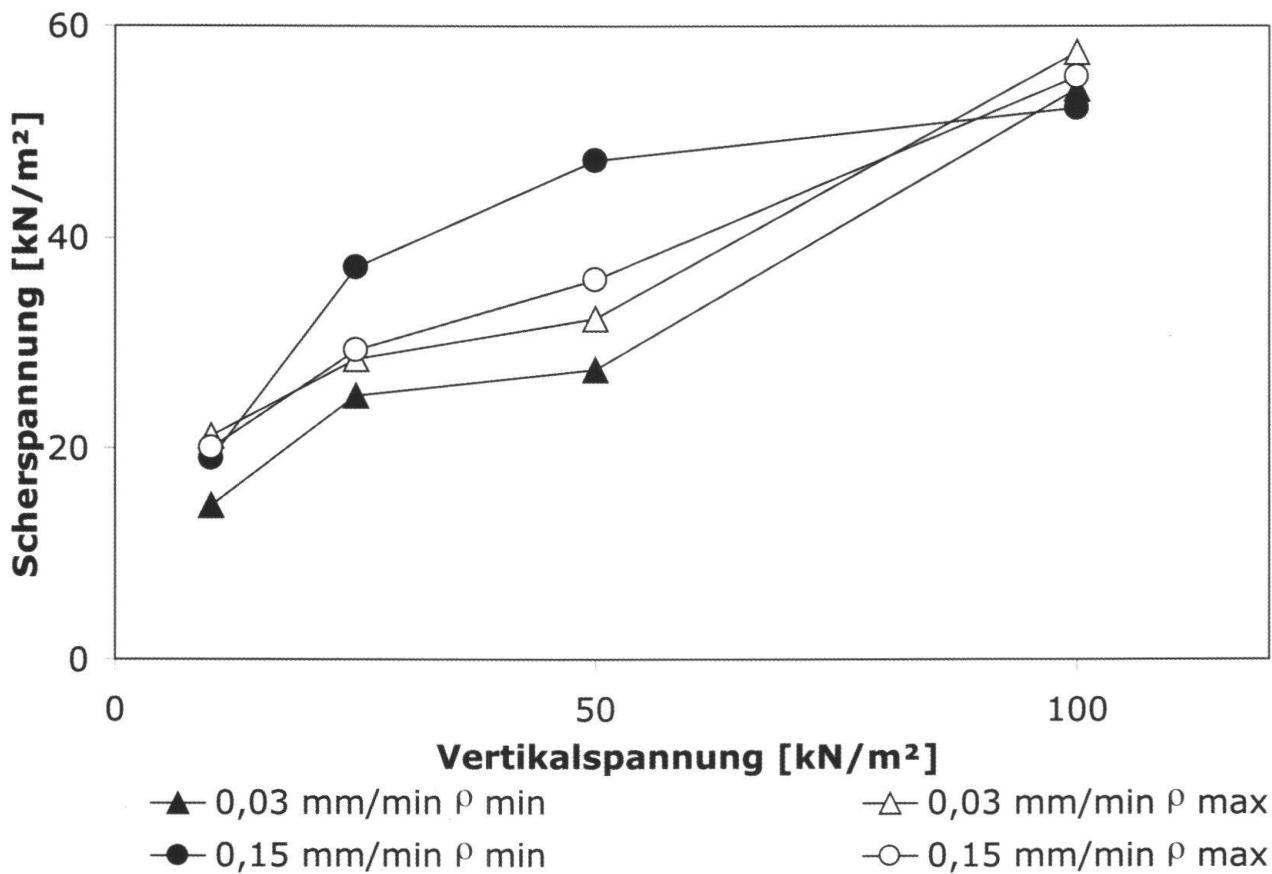


Fig. 6: Graphische Darstellung der maximalen Scherspannungen in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Einbaudichte.

bedeutet im Fall der verwendeten Überlagerungsspannungen bei der niedrigsten 100% bei der höchsten immer noch 10% der Vertikalspannung. Bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten (0,15 mm/min) wird dieser Streuwert sogar noch größer. Die Streuung äußert sich teilweise auch an einer unbefriedigenden Korrelation der Teilversuche.

Da die Streubreite unabhängig von den absoluten Spannungen ist, könnten auch Laufwiderstände der Parallelführung bzw. Schubspannungen der beiden Rahmen gegeneinander eine Rolle spielen. Des Weiteren können Reibungskräfte zwischen Probe und oberem Scherrahmen bzw. Zwängungen bei dilatanten Probenverhalten (Stoewahse & Blümel 2001) je nach verwendetem Gerät unterschiedlich ausgeprägt sein. Verschiedene Autoren beschrieben die Schubspannung der leeren Scherrahmen gegeneinander zwischen der der Messgenauigkeit des Gerätes und 3 kN/m² (Thermann et al.

2005, Goldscheider 2003). Die «Leerlaufspannung» des hier verwendeten Gerätes liegt unterhalb der Empfindlichkeit der Kraftmessseinrichtung.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die gerätebedingte Streuung der Messwerte liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die Unterschiede zwischen den Scherfestigkeiten bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten. Die Bruchspannungen steigen mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit, jedoch ergibt sich bei der Korrelation der einzelnen Teilversuche daraus kein signifikanter Unterschied der Scherfestigkeit. Niedrigere Reibungswinkel werden durch höhere Kohäsionswerte kompensiert. Abgesehen von der höchsten Vorschubgeschwindigkeit der Versuchsserie nehmen der Reibungswinkel mit zunehmender Ge-

schwindigkeit geringfügig zu und die Kohäsion ab, sofern man im Bereich zwischen 18 und 25° Reibungswinkel und 10 bis 20 kN/m² Kohäsion von signifikanten Unterschieden ausgehen kann. Angesichts der ermittelten Streuung der Messwerte und den Werten für 0,15 mm/min ist dieses Ergebnis vorsichtig zu bewerten. In wie weit die hier gemachten Beobachtungen auch auf Scherversuche mit höheren Vertikalspannungen repräsentativ sind, müssen weiterführende Versuche zeigen.

Es ist darauf zu achten, dass die gerätebedingten zusätzlichen Spannungen durch Reibung der beiden Scherrahmen gegeneinander oder Laufwiderstände der Parallelführung bei neueren Geräten etc. minimiert werden oder wenigstens so gleichmäßig auftreten, dass eine Kalibrierung möglich ist. Einen wesentlich signikanteren Einfluss als die Vorschubgeschwindigkeit haben Wassergehalt und Dichte. Unterschiedliche Dichten wirken sich bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten nicht gleichermaßen auf die Bruchkraft aus. Bei langsamem Versuchen nimmt die Scherfestigkeit mit der Dichte des Bodens wie zu erwarten zu.

Um die Wirkung des Wassergehaltes zu verstehen, gilt es zu prüfen, welche Saugspannung zum Bruchzeitpunkt wirkt. Entspre-

chend dem sich einstellenden Wassergehalt wirkt während des Schervorgangs im Porenraum eine Saugspannung, deren Verlauf nicht direkt messbar ist. Geringe Schwankungen des Wassergehaltes wirken sich wegen der flachen p_f -Kurve des Tones bezüglich der wirkenden Saugspannung gravierend aus. Unabhängig vom Einbauwassergehalt stellt sich im Scherversuch ein dem herrschenden Wasserangebot und Spannungen entsprechender Wassergehalt ein. Die mit diesem Wassergehalt bzw. Sättigungsgrad verbundene Saugspannung korreliert mit dem Spannungsverhältnis von Scherbeanspruchung und vertikaler Auflast (siehe Fig. 7). Die tatsächlich am Bruchpunkt herrschende Saugspannung ist unbekannt. Es ist davon auszugehen, dass sie höher als die am Versuchsende ist, da die Proben nach dem Bruch, der in der Regel bereits nach wenigen mm erfolgt ist, noch Wasser aufnehmen. Die Bruchspannung steigt mit zunehmender Saugspannung.

Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass der sorgfältigen Probengewinnung und -präparation deutlich mehr Bedeutung kommt, als der Wahl der Vorschubgeschwindigkeit. Es muss gewährleistet werden, dass die Wassergehalte und insbesondere die Dichte der Proben für die einzelnen Teilver-

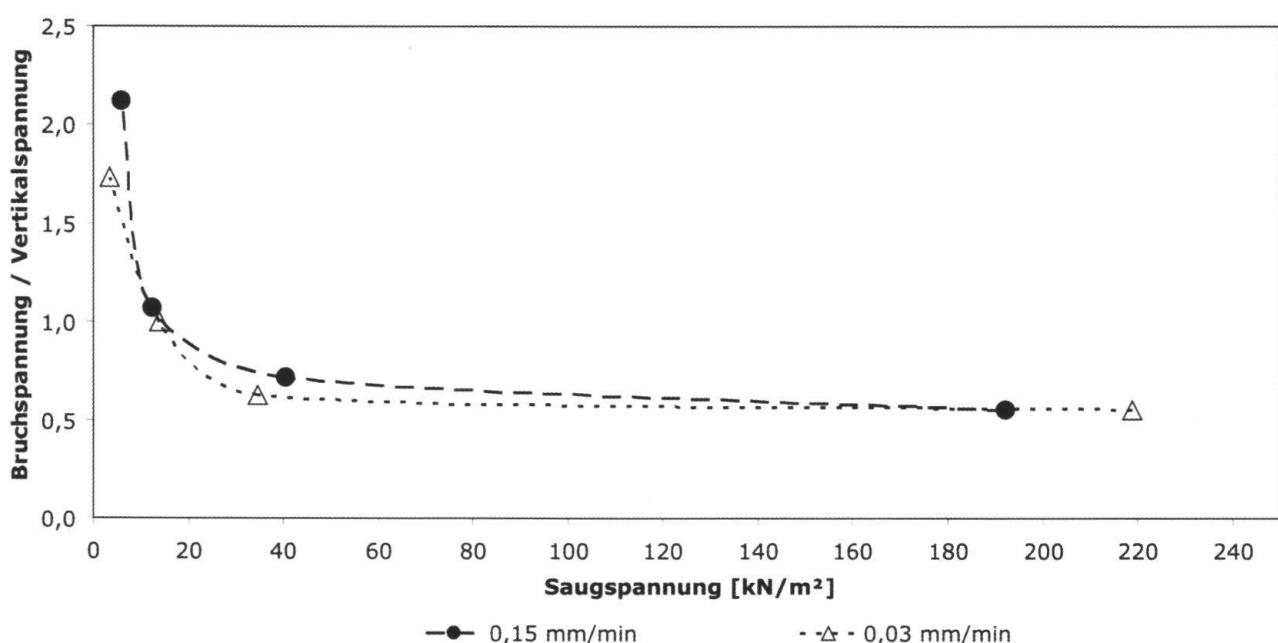


Fig. 7: Spannungen im Scherversuch.

suche nicht signifikant voneinander abweichen. Dann ist eine im täglichen Laborbetrieb sinnvolle Vorschubgeschwindigkeit wählbar, da sich in den hier durchgeführten Versuchen zwischen 0,002 und 0,150 mm/min keine signifikanten Unterschiede von Reibungswinkel und Kohäsion feststellen lassen. Die für hochplastische Tone empfohlene Vorschubgeschwindigkeit von 0,002 mm/min bedeutet, dass bei einem Scherweg von 20 mm für einen einzigen Teilversuch 7 Tage benötigt werden. Die in der Regel ungestörte Bodenprobe wird in dieser Zeit sicher ihren Wassergehalt auch in sorgfältig gelagerten und verschlossenen Stechzylindern oder Linern verändern. Die damit verbundenen Schrumpfungerscheinungen können sich auf Grund der unterschiedlichen Einbaudichten der Teilversuche, wie hier gezeigt, deutlich auf die die Scherfestigkeit auswirken.

Literatur

DIN 18122-1; Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze.

DIN 18137-3: 2002-09; Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 3: Direkter Scherversuch.

DIN-ISO 11274: 1998; Bodenbeschaffenheit: Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens – Laborverfahren.

Goldscheider, M.; 2003; Vergleichende Versuche mit einem konventionellen und einem parallel geführten Rahmenschergerät als Grundlage für DIN 18137-3; Schlussbericht Deutsches Institut für Bautechnik; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 36 S.

Schlichting, E., Blume, H.P. & Stahr, K.; 1995; Bodenkundliches Praktikum – Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und Geowissenschaftler; Blackwell Wissenschaftsverlag Berlin; 296 S.

Stoewahse, C & Blümel, W.; 2001; Einfluss der Rahmenlagerung auf die Messwerte der Scherfestigkeit im Rahmenscherversuch; 1. Siegener Symposium «Messtechnik im Erd- und Grundbau», 24./25.09.2001

Thermann, K., Gau, C. & Tiedemann, J.; 2005; Neuere Untersuchungen zum Einfluss der Rahmenlagerung von Schergeräten auf die Werte der Scherfestigkeit, Tagungsband 15. Tagung für Ingenieurgeologie 6. bis 9. April 2005 Erlangen. Hrsg.: M. Moser Universität Erlangen. S. 467-472.