

# **EINFLUSS DER RAHMENLAGERUNG AUF DIE MESSWERTE DER SCHERFESTIGKEIT IM RAHMENSCHERVERSUCH**

**Carl Stoewahse**

**Werner Blümel**

## **1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG**

Scherparameter von Erdstoffen und Reibungsparameter, beispielsweise zwischen Erdstoffen und Geokunststoffen, werden üblicherweise experimentell ermittelt. Eine Versuchsmethode hierfür ist der Rahmenscherversuch, der trotz gewisser Kritikpunkte nicht zuletzt wegen seiner einfachen Durchführung und Anschaulichkeit weit verbreitet ist. Mit der Entwicklung des Rahmenscherversuchs haben sich verschiedene Gerätekonfigurationen herausgebildet, die sich in der Art der Lagerung der Rahmen, insbesondere des oberen, unterscheiden.

Bei der in Abb. 1 (oben links) dargestellten sogenannten "englischen Bauweise" nach SKEMPTON und BISHOP bzw. CASAGRANDE wird der obere Rahmen durch ein Punktlager gestützt, wobei die Druckkraft der Scherkraft entspricht und gemessen wird. Es handelt sich um ein statisch nicht ausreichend bestimmtes System, bei dem der obere Rahmen sich um den Auflagerpunkt (Kraftangriffspunkt) als Pol drehen kann (s. z. B. HABIB und MARCHAND, 1951). Die hierdurch bedingte Aufweitung des Spalts zwischen den beiden Rahmenhälften wurde von verschiedenen Autoren als gravierender Nachteil gesehen. Dennoch hat sich diese Gerätekonfiguration am Markt durchgesetzt und wird in vielen bodenmechanischen Labors verwendet.

Um eine gleichmäßig dicke Scherfuge bzw. Fuge zwischen den Rahmenhälften zu gewährleisten, schlugen WERNICK (1979) und KAST (1986) ein Gerät vor, bei dem der obere Rahmen vollkommen fest steht und der Laststempel nur vertikal verschieblich ist. In einem Entwurf der DIN 18137-3 "Bestimmung der Scherfestigkeit - Direkter Scherversuch" vom Oktober 1997 wurde diese Gerätekonstruktion für den bodenmechanischen Rahmenscherversuch vorgeschlagen. Die Norm befindet sich jedoch noch in der Beratungsphase und nach dem derzeitigen Kenntnisstand wird die Endfassung voraussichtlich modifizierte Gerätekonstruktionen vorschreiben.

TERZAGHI merkte bereits 1933 an: *“Die Überwindung des Scherwiderstandes soll in allen Punkten der Scherfläche gleichzeitig erfolgen. Bei Scherapparaten mit rotierendem Rahmen ist dieses aber nicht der Fall.”* Er forderte außerdem, dass *“der obere die Probe umschließende Rahmen derart gelagert oder ausbalanciert sein sollte, dass er keine Druckkräfte nach unten auf die Gleitfläche abgeben kann.”* HVORSLEV (1937) verwendete für seine Untersuchungen an bindigen Erdstoffen ein Schergerät, dessen oberer Rahmen vertikal verschieblich und verkippungsfrei gelagert war. Der Versuch wird also wie in der englischen Bauweise mit schwebendem Rahmen durchgeführt. Wegen der Vertikalführung ist aber das Kippproblem gelöst.

Für die Anwendung der Ergebnisse von Rahmenscherversuchen und die Ableitung von Bemessungswerten ist die Reproduzierbarkeit der Versuche von Bedeutung. Angaben zur Versuchsstreuung machten z. B. SCHULTZE (1975) und von SOOS (1996) für den Rahmenscherversuch sowie PHILIPP (1991) für den Kreisringscherversuch. Für Rahmenscherversuche an nichtbindigen Erdstoffen wurden je nach Korngrößenverteilung, Ungleichförmigkeit und Lagerungsdichte Variationskoeffizienten zwischen 7 und 14 % angegeben. Es fehlten allerdings Hinweise auf die verwendeten Versuchsgeräte. Von der DGGT in den Jahren 1995 und 1996 und vom CEN 1997 initiierte Vergleichsuntersuchungen an verschiedenen Geokunststoffschichtgrenzen zeigten Versuchsstreuungen, die dieses Maß deutlich überstiegen. Ähnliche Beobachtungen bei vergleichenden Rahmenscherversuchen an Erdstoffen wurden in Fachkreisen fallweise mitgeteilt, sind aber bisher kaum veröffentlicht. Die Ergebnisse der Ringanalysen an den Geokunststoffschichtgrenzen legen die Vermutung nahe, dass zumindest ein Teil der Streuungen durch die Prüfgerätetechnik bedingt ist.

Im Zusammenhang mit der Notwendigkeit, für Reibungsuntersuchungen mit Geokunststoffen und Erdstoffen größere Geräte mit Prüfflächen von rd. 0,1 m<sup>2</sup> verwenden zu müssen, ergaben sich gerätetechnische Entwicklungen, zu denen die Verfasser beitragen, indem sie unter anderem experimentelle und numerische Untersuchungen zum Einfluss der Gerätekonstruktion auf die Ergebnisse von Rahmenscherversuchen und von Reibungsversuchen durchführten. Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen lässt sich ein für die zuverlässige Ermittlung der Scher- und Reibungsparameter geeignetes Gerät für Rahmenscherversuche und für Reibungsversuche definieren.

## 2 EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN

### 2.1 Versuchsgeräte

Die innere Scherfestigkeit von Sand und einem bindigen Erdstoff sowie die Reibung in der Schichtgrenze zwischen einem Sand und einem Geotextil und zwischen zwei verschiedenen Geokunststoffen wurde in vier verschiedenen konstruierten Rahmengeräten mit einer Prüffläche von 30 cm x 30 cm ermittelt. Die verwendeten Gerätetypen entsprechen den eingangs erwähnten konstruktiven Grundprinzipien und sind in Abb. 1 dargestellt.

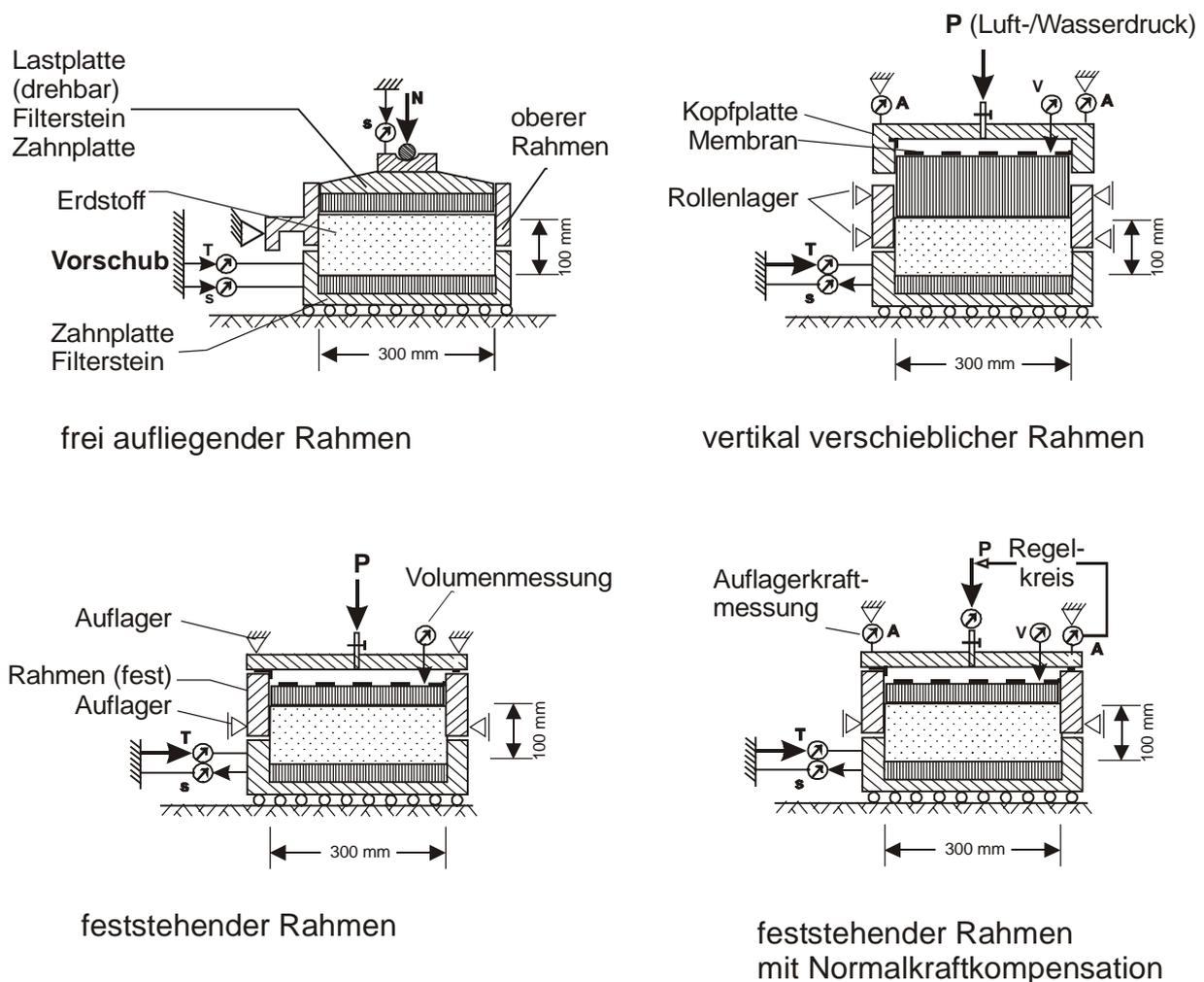


Abb. 1 Prinzipskizzen der verwendeten Rahmenschergeräte

Zwei Geräte der „englischen Bauweise“ wurden verwendet. Eines der Rahmenschergeräte befindet sich im Labor der Naue Fasertechnik GmbH & Co. KG in Espelkamp-Fiestel und wurde uns freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Das Gerät

wurde im Eigenbau hergestellt und basiert in seiner Konstruktion auf dem u. a. von GRETT (1984) am Franzius-Institut der Universität Hannover entworfenen Gerät. Die Auflastspannung wird durch Gewichte über ein Hebelsystem aufgebracht. Das zweite Gerät befindet sich im Geotechnik-Labor der Loughborough University, Großbritannien, und konnte vom erstgenannten Verfasser im Rahmen einer Forschungskoope-ration verwendet werden. Das Gerät wurde von WYKEHAM-FARRANCE in Slough, Großbritannien, hergestellt. Die Lastaufbringung erfolgt hier über eine Hydraulik und ein Joch auf die Lastplatte.

Das am IGBE vorhandene Gerät mit feststehendem Rahmen und 900 cm<sup>2</sup> großer Prüffläche wird von der Wille Geotechnik GmbH, Göttingen, hergestellt und ist in Abb. 1 (unten links) dargestellt. Die Auflastspannung wird bei diesem Gerät über ein Druckkissen aufgebracht, das über eine Kopfplatte an den festen oberen Rahmen angeschlossen ist. Das Druckkissen ist mit Luft oder Wasser gefüllt. Der obere Rahmen ist an den vier Eckpunkten aufgelagert. Die Auflager des Rahmens wirken auch als Widerlager für die Belastungseinrichtung.

In der Gerätekonfiguration mit feststehendem oberen Rahmen kann es infolge von Wandreibungseffekten zwischen dem Probekörper und dem oberen Rahmen zu Abweichungen zwischen der Auflastspannung und der tatsächlich in der Scherfuge wirkenden Normalspannung kommen. Von den Verfassern und von der Wille GeoTechnik GmbH, Göttingen, wurde ein Großrahmenschergerät mit feststehendem oberen Rahmen entwickelt, bei dem die in der Scherfuge wirkende Normalspannung indirekt gemessen und gesteuert werden kann. An den vertikalen Auflagern des Rahmens sind elektronische Kraftsensoren angeordnet, mit denen die Auflagerkräfte gemessen werden. Das Gleichgewicht der Vertikalkräfte am oberen Rahmen liefert als Summe der Auflagerkräfte die resultierende Normalkraft in der Scherfuge. Über einen Regelkreis wird die Auflast (Luft- bzw. Wasserdruck im Druckkissen) so gesteuert, dass Einflüsse aus der Wandreibung an der Rahmeninnenseite kompensiert werden und die resultierende Normalspannung in der Scherfuge dem Vorgabewert entspricht (s. Abb. 1 unten rechts).

Weiterhin wurde das Gerät mit feststehendem Rahmen so modifiziert, dass der obere Rahmen vertikal verschieblich ist (s. Abb. 1 oben rechts). Die Belastungseinrichtung wurde konstruktiv vom oberen Rahmen getrennt und über Traversen an die Kraftsensoren angeschlossen. Der obere Rahmen wurde zuerst in einem Prototyp durch PTFE-Gleitlager und in der Endversion durch Rollenlager vertikal geführt. Die unterseits gezahnte Lastplatte liegt frei drehbar auf dem Probekörper

auf. Durch eine massive Ausbildung der Lastplatte und eine Führung über Wälzlager kann eine Vertikalführung teilweise erreicht werden. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde jedoch mit verkipptbarer Lastplatte gearbeitet.

Mit dem zuletzt erläuterten Gerät waren Versuche in den Konstruktionsvarianten mit feststehendem Rahmen mit und ohne Normalkraftkompensation sowie mit vertikal verschieblichem Rahmen mit nur geringfügigem Umbauaufwand möglich.

## 2.2 Numerische Untersuchungen

Die numerischen Modellierungen von Rahmenscherversuchen an Sand liefern zusätzliche Informationen zu einzelnen versuchsspezifischen und gerätetechnischen Effekten im Zusammenhang mit der Spannungsverteilung im und am Probekörper. Hierbei steht die qualitative Darstellung dieser Aspekte im Vordergrund.

Die Berechnungen wurden für die Gerätetypen mit feststehendem und mit vertikal verschieblichem oberem Rahmen und für die Grenzfälle eines locker und dicht gelagerten Sandes durchgeführt. Auf diese beiden Gerätekonfigurationen konzentrierte sich zeitweise die Diskussion bei der Normierung des Rahmenscherversuchs. Verwendet wurde das mit der Methode der finiten Elemente (FEM) arbeitende Programmsystem PLAXIS.

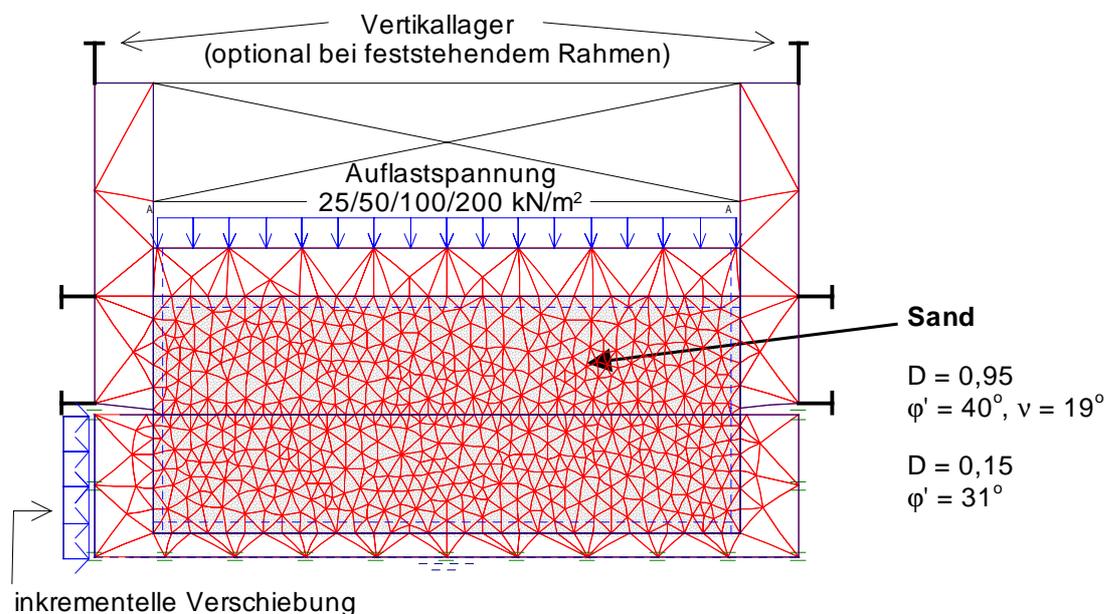


Abb. 2 Finite-Elemente-Modell des Rahmenscherversuchs

Das verwendete FE-Modell ist in Abb. 2 dargestellt. Es wird nur ein idealisierter, zweidimensionaler Zustand ohne Berücksichtigung der Rahmenseitenwände parallel zur Vorschubrichtung betrachtet. Der feststehende obere Rahmen ist durch vier horizontale und zwei vertikale Federelemente hoher Steifigkeit gelagert. Zur Simulation des vertikal verschieblichen Rahmens wurden die oberen Vertikallager entfernt. Die beiden Rahmenhälften sind durch eine Verstrebung miteinander gekoppelt, womit gleiche Verschiebungen beider Rahmenhälften gewährleistet werden. Am unteren Rahmen wurde in insgesamt 300 Schritten eine Zwangsverschiebung bis zum Bruchzustand aufgebracht.

Für den Sand bei lockerer und dichter Lagerung wurde das im Programmsystem enthaltene Hardening-Soil-Modell verwendet (s. z. B. SCHANZ et al., 1999). Die Stoffparameter wurden aus Triaxial- und Kompressionsversuchen abgeleitet. Zwischen Probekörper und Lastplatte sowie den Rahmenwänden wurden Interface-Elemente angeordnet. Hierbei wurde zur Lastplatte hin das Materialverhalten des Erdstoffs angesetzt. Das Reibungsverhalten zwischen Probekörper und Rahmenwand wurde in gesonderten Reibungsversuchen zwischen dem unterschiedlich dicht gelagerten Sand und Stahl ermittelt.

### 2.3 Materialien

Bei dem untersuchten Sand handelt es sich um CEN-Normsand gemäß DIN EN 196-1. Dies ist ein ungleichförmiger, rundkörniger fein- und mittelsandiger Grobsand mit einem Quarzanteil von mindestens 98 %. Der Sand wurde mit drei verschiedenen Lagerungsdichten in die Prüfgeräte eingebaut. Referenzwerte der Scherfestigkeit des Erdstoffs wurden bei den verschiedenen Lagerungsdichten in Triaxialversuchen ermittelt. Aus diesen Daten wurden Materialparameter für die vergleichenden FE-Berechnungen abgeleitet. Bodenmechanische Klassifikationsparameter enthält Tab. 1.

Tab. 1 Bodenmechanische Klassifikationsparameter von CEN-Normsand

U	max $\rho_d$	min $\rho_d$	$\varphi'$ bei D = 0,95	v bei D = 0,95	$\varphi'$ bei D = 0,15
[-]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[°]
6,4	1,92	1,66	40	19	31

### 3 ERGEBNISSE

Die folgenden Darstellungen beschränken sich auf Rahmenscherversuche an dicht gelagertem Sand. Die Scherspannungen werden für Vergleichszwecke auf die für die Ableitung der Scherparameter maßgebliche Auflast- bzw. Normalspannung normiert. Zu beachten ist, dass die Belastungen in den Geräten unterschiedlich angesteuert wurden. Während in den Gerätekonfigurationen mit frei aufliegendem, vertikal verschieblichem und festem oberem Rahmen die Bezugsgröße die oben auf die Proben aufgebrauchte Auflastspannung  $p$  ist, wird im Gerät mit festem Rahmen und Normalkraftkompensation die mittlere Normalspannung in der Scherfuge  $\sigma_{\text{Fuge}}$  als Bezugsgröße genommen. Diese Spannungen werden üblicherweise auch zur Festlegung der Grenzbedingung verwendet. Es wird dabei nicht zwischen der oben auf die Probe aufgebrauchten Auflastspannung und der Normalspannung in der Scherfuge differenziert. Für die folgende Auswertung der Versuchsergebnisse wird daher hier von der nominellen Normalspannung  $\sigma_{\text{nom}}$ , die für die Versuchsdurchführung vorgesehen ist, ausgegangen. Die nominelle Normalspannung  $\sigma_{\text{nom}}$  ist also entweder die Auflastspannung  $p$  oder die Normalspannung in der Scherfuge  $\sigma_{\text{Fuge}}$ .

In Abb. 3 sind die normierten Scherspannungs-Verschiebungslinien für die Versuche an dicht gelagertem Sand dargestellt. Mit zunehmender Einschränkung der kinematischen Freiheitsgrade des oberen Rahmens zeigen die Scherspannungs-Verschiebungslinien größere Abweichungen der normierten Scherspannungen. Besonders deutlich wird dieses bei den Versuchen an dicht gelagertem Sand im Gerät mit festem Rahmen (Abb. 3 unten links).

Die Auswertung der im Gerät mit feststehendem Rahmen ermittelten Versuchsdaten mit der COULOMBschen Grenzbedingung würde unter Ansatz der nominellen Normalspannung zu fiktiven Kohäsionswerten führen, die nicht materialspezifisch sind und die in den Referenzversuchen im Triaxialgerät für diesen Erdstoff nicht ermittelt wurden. Diese fiktiven Kohäsionswerte müssen daher durch andere, zusätzliche Kraftwirkungen im Gerät bedingt sein. Da wegen des trockenen Erdstoffs Effekte infolge von Kapillarkohäsion und auch Verkittung ausgeschlossen werden können, wird im Weiteren von zwängungsbedingten Widerständen ausgegangen. Mit zunehmender Lagerungsdichte des Sandes und damit abhängig von der Dilatanz des Erdstoffs werden die Zwängungseffekte deutlicher. Die Versuche im Gerät mit feststehendem Rahmen ergeben für dicht gelagerten CEN-Normsand im Bruchzustand eine fiktive Kohäsion in der Größenordnung von rd. 50 kN/m<sup>2</sup>.

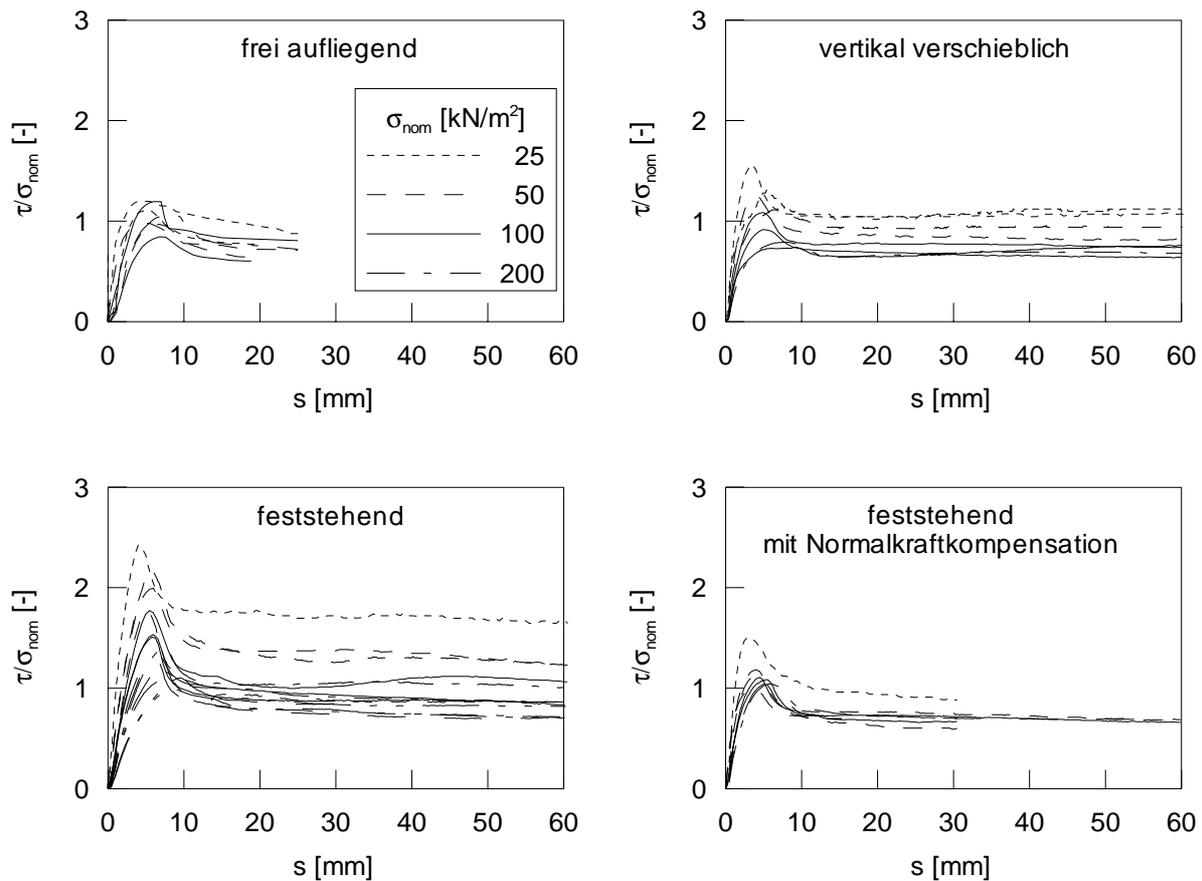


Abb. 3 Normierte Scherspannung von CEN-Normsand mit  $D = 0,95$ , abhängig von der Verschiebung, gemessen in Rahmenschergeräten mit  $900 \text{ cm}^2$  großer Prüffläche

Eine Lösung des Problems durch Vernachlässigung dieser „fiktiven Kohäsion“ nach ingenieurpraktischen Erwägungen ist nur begrenzt zielführend, da sich die gerätebedingten Zwängungseffekte nicht nur auf den rechnerischen Achsenabschnitt, sondern auch auf die Steigung der Ausgleichsgeraden auswirken. In Abb. 5 sind deshalb die durch lineare Regressionen berechneten inneren Reibungswinkel abhängig von der Porenzahl aufgetragen. Die übliche Darstellung eines Sekantenreibungswinkels abhängig von der Porenzahl bei einer definierten Normalspannung ist wegen der Zwängungseffekte nicht sinnvoll. Trotz einer gewissen Streubreite ist festzustellen, dass die im Gerät mit feststehendem Rahmen ermittelten Reibungswinkel fast immer größer sind als die übrigen. Würden sich die Zwängungskräfte nur auf die fiktive Kohäsion auswirken, so hätte dieses eine Parallelverschiebung der die Grenzbedingung kennzeichnenden Schergeraden zur Folge und die Zwängungskräfte wären auflast- bzw. scherkraftunabhängig.

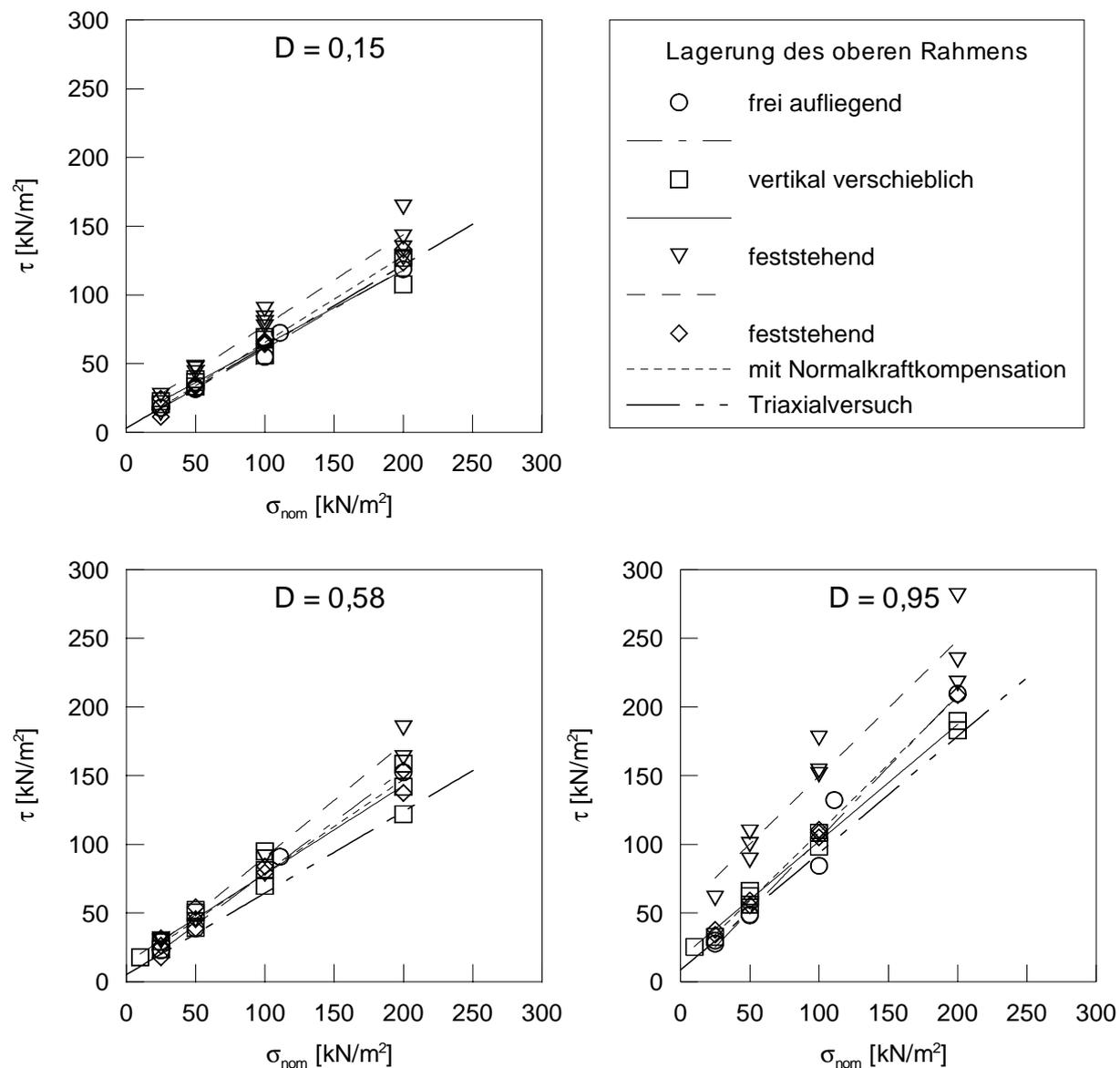


Abb. 4 Grenzbedingungen für CEN-Normsand bei verschiedenen Lagerungsdichten ermittelt in Rahmenscherveräten mit 900 cm<sup>2</sup> großer Prüffläche

Zum Vergleich sind in Abb. 5 auch die im triaxialen Druckversuch ermittelten Reibungswinkel eingetragen. Sie sind in den meisten Fällen etwas kleiner als die in den ebenen Rahmenscherversuchen ermittelten Werte. Die beste Übereinstimmung ergibt sich mit den Messwerten aus dem Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen. Die grundsätzlich gleichen Effekte wurden auch in Reibungsversuchen zwischen Sand und Geotextil beobachtet.

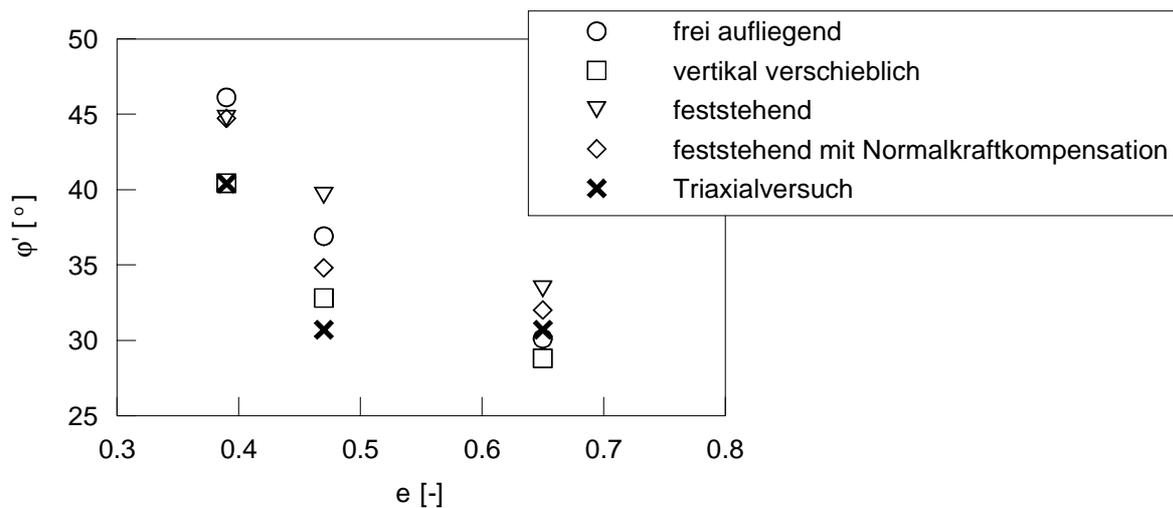


Abb. 5 Reibungswinkel  $\phi'$  abhängig von der Porenzahl  $e$

#### 4 ANALYSE DER KRÄFTE UND SPANNUNGEN IM PROBEKÖRPER

Die Einschränkung der kinematischen Freiheit des oberen Rahmens führt zu Zwängungskräften, die größere Normalspannungen in der Scherfuge bewirken. Experimentelle Untersuchungen von DYER (1985) zeigen, dass ein wesentlicher Anteil der durch die Verschiebung des unteren Rahmens im oberen Proben teil hervorgerufenen Horizontalkräfte an den Probenrändern über die Stirnseite des oberen Rahmens abgetragen wird und nur ein kleinerer Anteil über die Lastplatte. Dieses zeigen auch die in den FE-Simulationen für beide Gerätekonfigurationen berechneten Hauptspannungsrichtungen im Probekörper (Abb. 6). In die Darstellungen sind zusätzlich die, im Zusammenhang mit der Verschiebung wichtigen, äußeren Kräfte eingetragen und die Hauptspannungsrichtungen in der Probenmitte hervorgehoben. Für den Versuchsaufbau mit feststehendem Rahmen ist zu erkennen, dass die Spannungstrajektorien an der Rahmenwand geneigt sind und dort somit eine zusätzliche vertikale Kraftkomponente im Probekörper wirkt. Allerdings sind bei der Ergebnisbewertung und auch bei den folgenden Gleichgewichtsbetrachtungen die in Kap. 2.2 genannten Vereinfachungen in der Modellierung zu beachten.

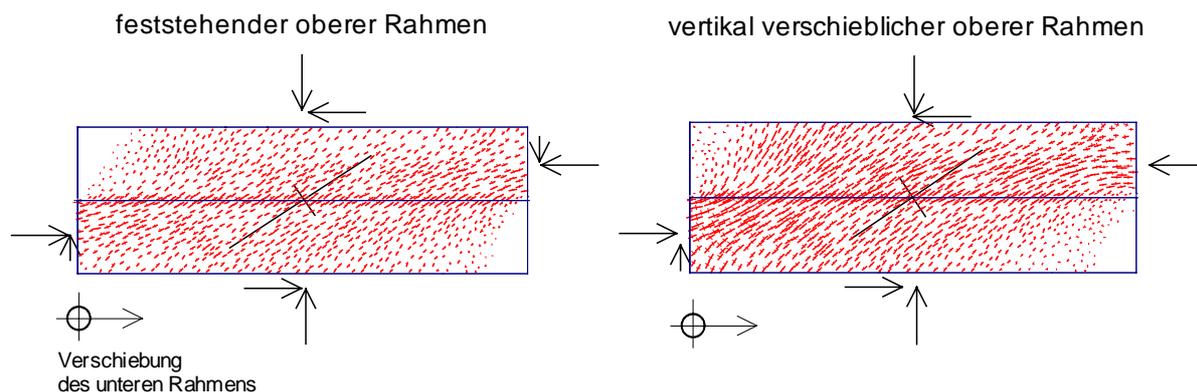


Abb. 6 Hauptspannungsrichtungen im Probekörper

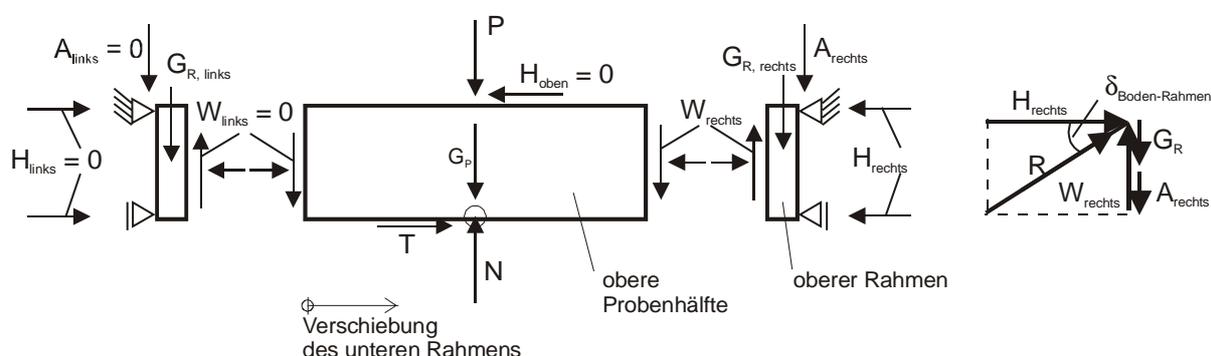


Abb. 7 Vereinfachter Kräfteansatz am oberen Teilsystem im Gerät mit feststehendem oberem Rahmen bei vertikaler Belastung an der Probenoberseite und Scherbeanspruchung

Die Größe der Zwängungskräfte kann für den feststehenden Rahmen bei Schnittführung durch die Scherfuge am oberen Teilsystem abgeschätzt werden. Die am Probekörper wirkenden Kräfte sind in Abb. 7 schematisch dargestellt. Vereinfachend wird angenommen, dass zwischen Lastplatte und Probenoberseite keine Horizontalkräfte übertragen werden und somit auch nicht zwischen Lastplatte und Rahmen ( $H_{\text{oben}} = 0$ ). Da sich der starre Probekörper an der „Zugseite“ vom Rahmen ablöst, wirken keine Kräfte zwischen der linken Rahmenwand und Probe ( $W_{\text{links}} = 0$ ,  $H_{\text{links}} = 0$ ). Ebenso werden die an der linken Rahmenhälfte wirkenden Auflagerkräfte wegen der räumlichen Koppelung der Rahmenhälfte vernachlässigt ( $A_{\text{links}} = 0$ ). Horizontale Auflagerkräfte  $H_{\text{rechts}}$  sind nur an der rechten Rahmenhälfte („Druckseite“) angetragen. Die Wirkungslinie der resultierenden Rahmeneigengewichtskraft  $G_R$  liegt in der Probenmitte. Die Neigung der resultierenden Wandreaktionskraft gegen die Normale ist maximal gleich dem Reibungswinkel zwischen Probekörper und Wandmaterial. Aus den Kräftegleichgewichtsbedingungen  $\Sigma V = 0$  und  $\Sigma H = 0$  und der Bedingung für den Grenzzustand des Gleitens an der Rahmenwand ergibt sich dann:

$$P + G_P + W_{rechts} = N$$

$$A_{rechts} + G_R = W_{rechts} = R \cdot \sin \delta_{Boden-Rahmen}$$

$$T = H_{rechts} = R \cdot \cos \delta_{Boden-Rahmen}$$

Damit ergibt sich bei Vernachlässigung des Probeneigengewichts  $G_P$  die Wandreibungskraft bzw. Zwängungskraft zu:

$$W_{rechts} = T \cdot \tan \delta_{Boden-Rahmen}$$

Für den Fall des vertikal verschieblichen Rahmens entfallen die vertikalen Auflagerreaktionen  $A_{links}$  und  $A_{rechts}$  und die Gleichgewichtsbedingungen liefern:

$$T = H_{rechts} \quad \text{und} \quad W_{rechts} = G_R$$

Die Zwängungskräfte lassen sich experimentell indirekt über die Ermittlung der Normalspannung in der Schichtgrenze mit Hilfe der Einrichtung zur Normalkraftkompensation erfassen. Bei einer konstanten Auflastspannung von  $100 \text{ kN/m}^2$  wurden Versuche u. a. an dicht gelagertem Sand durchgeführt. Das linke Diagramm in Abb. 8 zeigt die Scherkräfte  $T$  abhängig von der Verschiebung  $s$ . Wie in Abb. 3 ergeben sich im Gerät mit feststehendem Rahmen die größeren Scherkräfte. Im rechten Diagramm sind die für beide Gerätetypen gemessenen resultierenden Normalkräfte  $N$  in der Scherfuge sowie die konstante Auflastkraft von  $P = 9 \text{ kN} = 100 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,09 \text{ m}^2$  eingetragen.

Für das Gerät mit feststehendem Rahmen ist für die Belastungsphase vor der Verschiebung festzustellen, dass die Normalkraft in der Schichtgrenze infolge von Wandreibungseffekten kleiner ist als die Auflastkraft. Dieses ist durch die Messwerte vor Beginn des Vorschubs gekennzeichnet. Mit zunehmender Verschiebung und damit mit steigender Scherkraft übersteigt die Normalkraft in der Scherfuge die Auflastkraft infolge von Zwängungen erheblich. Die Differenz zwischen den Normalkräften in der Scherfuge im Bruchzustand und während der Belastungsphase entspricht der Wandreibungskraft  $W_{rechts} = T \cdot \tan \delta_{Boden-Rahmen}$ .

Im Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen wurden derartige Effekte hingegen nicht beobachtet. Die Normalkraft  $N$  blieb während des gesamten Schervorgangs annähernd konstant in der Größenordnung der Auflastkraft  $P$ .

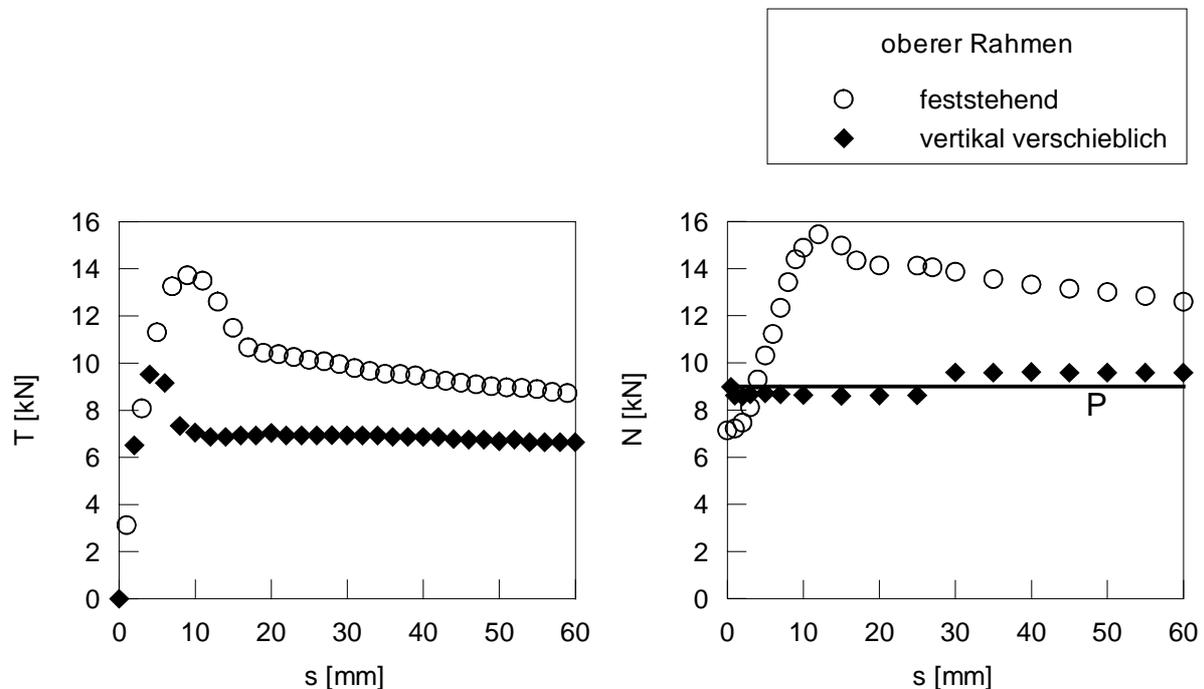


Abb. 8: Normalkraft  $N$  in der Scherfuge und Scherkraft  $T$  abhängig von der Verschiebung  $s$  für eine Auflastkraft von  $P = 9$  kN ( $\sigma_{nom} = 100$  kN/m<sup>2</sup>)

Grundsätzlich gleiche Effekte ergaben sich auch in den Versuchen mit locker gelagertem Sand und in den Reibungsversuchen zwischen Sand und Geotextil. Die FE-Berechnungen ergaben zudem für den Fall des feststehenden Rahmens Normalspannungen in der Scherfuge, die die Auflastspannung lokal erheblich überstiegen, während sich im Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen eine gleichmäßigere Spannungsverteilung über die Scherfuge ergibt. Ausführliche Informationen hierzu, zur Spannungsverteilung im Probekörper sowie zur Scherfugebildung gibt STOEWAHSE (2001).

Die Differenz zwischen Auflastspannung und Normalspannung in der Scherfuge führt bei der üblichen Auswertung der Grenzbedingung wie in Kap. 3 und Abb. 4 für Rahmenscherversuche mit feststehendem Rahmen bereits erläutert zu Fehleinschätzungen der Scherfestigkeit und der Scherparameter.

## **5 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN ZUR VERSUCHS- TECHNIK**

Maßgebend für die fachlich richtige Interpretation und Auswertung von Rahmenscher- und Reibungsversuchen ist die Kenntnis der in der Scherfuge wirkenden mittleren Normalspannung. Diese Spannung ist im Gerät mit vertikal verschieblichem bzw. frei aufgelagertem Rahmen wegen der statisch eindeutigen Randbedingungen ausreichend genau abschätzbar. Die Kipptendenz des oberen Rahmens ist für das Gerät mit frei aufliegendem Rahmen allerdings nachteilig zu werten.

Aus der numerischen Analyse der Versuchsaufbauten und den experimentellen Beobachtungen ergaben sich für die Gerätekonfigurationen mit feststehendem Rahmen gegenüber der Auflastspannung um bis zu rd. 50 % erhöhte mittlere Normalspannungen in der Scherfuge. Bei dieser Versuchseinrichtung mögliche Zwängungskräfte sind abhängig von den Festigkeitseigenschaften der untersuchten Erdstoffe sowie der Größe der Reibung zwischen Probenmaterial und Rahmen. Sie sind nur ansatzweise abschätzbar. Da die Auflagerbedingungen im Gerät mit feststehendem oberen Rahmen und Normalkraftkompensation identisch zum vorgenannten Gerät sind und nur die Auflast anders geregelt wird, ergeben sich für diese Gerätekonfiguration analoge Hauptspannungstrajektorien und Spannungszustände im Probekörper sowie qualitativ vergleichbare Normalspannungsverteilungen in der Scherfuge. Beide Geräte mit feststehendem Rahmen werden daher für die Ermittlung der Scherfestigkeit nichtbindiger Erdstoffe als weniger geeignet eingestuft.

Die Gerätekonfiguration mit vertikal verschieblichem Rahmen weist weder den Nachteil des verkippten Rahmens und der damit verbundenen unkontrollierbaren Verformungsvorgänge im Probekörper noch den Nachteil der am feststehenden Rahmen auftretenden Zwängungskräfte auf. Die statischen Auflagerbedingungen und die damit verbundenen Kräfteverteilungen und Spannungszustände sind einfacher zu ermitteln. Die mit diesem Gerät ermittelten Scherparameter stimmten für den untersuchten Sand sehr gut mit den Referenzwerten aus den Triaxialversuchen überein. Dieses Gerät wird als ein Standardprüfgerät für Rahmenscherversuche und für Reibungsversuche empfohlen.

## 6 LITERATUR

- Dyer, M. R. 1985 „Observation of the stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement“, PhD Thesis, University of Oxford
- Grett, H.-D. 1984 „Das Reibungsverhalten von Geotextilien in bindigem und nichtbindigem Boden“, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 59
- Habib, M. P. 1951 „L'essai de cisaillement rectiligne“, Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics“, H. 195
- Marchand, M. R.
- Hvorslev, J. 1937 „Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden“, Ingeniørvidenskabelige Skrifter, H. 45, Danmarks Naturvidenskabelige Samfund
- Kast, K. 1986 „Geführte direkte Scherversuche an bindigen Erdstoffen“, Bautechnik, H. 8, S. 271 - 278
- Philipp, H. 1991 „Zur Meßunsicherheit im Labor ermittelter bodenphysikalischer Kennwerte“, Geotechnik 14, S. 184 - 189
- Schanz, T. 1999 „The hardening soil model: Formulation and verification“, Proc. „Beyond 2000 in computational geotechnics - 10 years of PLAXIS“, Balkema, Rotterdam
- Vermeer, P. A.
- Bonnier, P. G.
- Schultze, E. 1975 „Some aspects concerning the application of statistics and probability to foundation structures“, Proc. 2. International Conference Application of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Aachen
- Soos, P. von 1996 „Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor“, in Grundbau-Taschenbuch, Teil 1, 5. Aufl., U. Smolczyk (Hrsg.), Ernst & Sohn, Berlin
- Stoewahse, C. 2001 „Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen und Erdstoffen im Rahmenschergerät“, Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover, Heft 56, Eigenverlag
- Terzaghi, K. 1933 „Die Prüfung von Baumaterialien für gewalzte Erddämme“, 1. Congrès des Grand Barrages, Vol. III, Stockholm
- Wernick, E. 1979 „Bestimmung von Bodenkenwerten mit einem parallelgeführten direkten Schergerät“, Die Bautechnik, H. 9, S. 307 - 313

STOEWAHSE, Carl, Dr.-Ing.  
Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik mbH  
Am Hafen 22  
38112 Braunschweig  
vormals wissenschaftlicher Mitarbeiter am IGBE

BLÜMEL, Werner, Prof. Dr.-Ing.  
Universität Hannover  
Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE)  
Appelstraße 9 A  
30167 Hannover