

GERÄTEEINFLÜSSE BEI DER ERMITTLUNG DES REIBUNGSVERHALTENS VON GEOKUNSTSTOFFEN UND ERDSTOFFEN IM RAHMENSCHERGERÄT

Dr.-Ing. Carl STOEWAHSE

Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. Werner BLÜMEL

Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover

KURZFASSUNG: Für die Berechnung der Standsicherheit von Konstruktionen mit Geokunststoffen sind die Reibungseigenschaften in den Schichtgrenzen zwischen Geokunststoffen und Erdstoffen zu ermitteln. Dieses geschieht experimentell in modifizierten Rahmenschergeräten. In dem Beitrag werden Ergebnisse von Reibungsversuchen in unterschiedlich konstruierten Großrahmenschergeräten für eine Schichtgrenze zwischen einem nicht bindigen Erdstoff und einem Geotextil dargestellt. Es zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Lagerung und Führung des oberen Rahmens und damit verbundener Zwängungseffekte auf die Versuchsergebnisse bei verschiedenen Lagerungsdichten des Erdstoffs. Aus einer vergleichenden FE-Analyse zweier Versuchsaufbauten sind zusätzliche Aussagen zu den Auswirkungen der Zwängungseffekte und zur Spannungsverteilung im Erdstoffkörper ableitbar. Ausgehend von den Ergebnissen der experimentellen und numerischen Untersuchungen wird eine für die zuverlässige Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen geeignete Gerätekonfiguration empfohlen. Hinweise zur Auswertung und Beurteilung von Versuchsergebnissen werden gegeben.

1 EINLEITUNG

Für die Analyse der Standsicherheit geotechnischer Konstruktionen ist die Kenntnis der Scherfestigkeit von Erdstoffen sowie der Interaktion zwischen Erdstoffen und anderen Konstruktionsmaterialien, also des Reibungsverhaltens, unabdingbar. Durch den zunehmenden Einsatz von Geokunststoffen, z. B. in geschichteten Abdichtungssystemen, kommt der zuverlässigen Ermittlung des Reibungsverhaltens dieser Baustoffe eine besondere Bedeutung zu. Die den Versagenszustand kennzeichnenden Reibungsparameter werden üblicherweise experimentell ermittelt. Eine geeignete Versuchsmethode ist der Rahmenscher Versuch, der sich insbesondere für die Ermittlung der Reibung zwischen Erdstoffen und Geokunststoffen eignet.

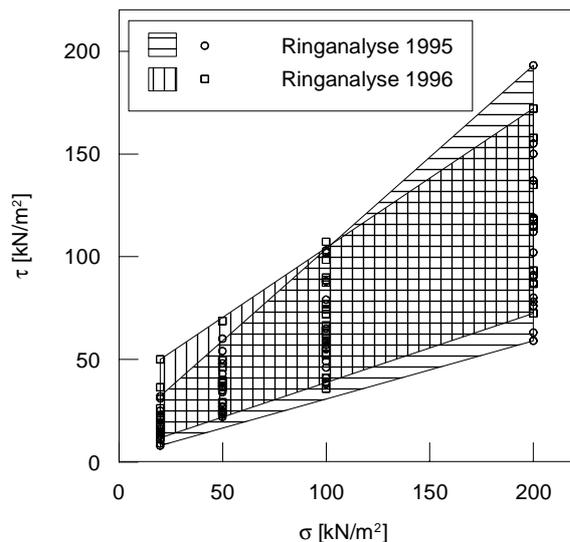


Abbildung 1-1 Ergebnisse von Ringanalysen für den Reibungsversuch zwischen Sand ($D \approx 0,6$) und Vlies unter Vergleichsbedingungen

In den Jahren 1995 und 1996 wurden anlässlich der Erarbeitung der Empfehlung E 3-8 von der Untergruppe 1 des AK5.1 Ring-

analysen zur Ermittlung des Reibungsverhaltens in Schichtgrenzen mit Geokunststoffen initiiert. An den Ringanalysen nahmen jeweils bis zu 20 Prüfinstitute teil. Die Streubreite der Ergebnisse dieser Ringanalysen sind in Abbildung 1-1 dargestellt. Trotz vereinheitlichter Prüfmethodik in der zweiten Versuchsreihe waren nach wie vor inakzeptabel große Abweichungen der Versuchsergebnisse aus verschiedenen Prüfinstitutionen zu verzeichnen. Ähnliche Beobachtungen wurden auch bei Rahmenscher Versuchen an Erdstoffen gemacht. Die Ergebnisse der Ringanalysen legten die Vermutung nahe, dass ein Teil der Versuchsstreuungen gerätetechnisch bedingt ist.

Während in der Bodenmechanik für den direkten Scherversuch in DIN 18137-3 Angaben zur Art und Ausbildung der Prüfgeräte vorgesehen wurden, sind in dem für Geokunststoffe maßgebenden Entwurf der DIN EN ISO 12957-1 vom April 1998 und in der GDA-Empfehlung E 3-8 keine Festlegungen zur Gerätetechnik enthalten. Am IGBE wurden experimentelle und numerische Untersuchungen zum Einfluss der Gerätekonstruktion mit vier unterschiedlich konstruierten Großrahmenschergeräten durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war vorrangig die Entwicklung einer geeigneten Gerätekonfiguration zur Ermittlung der Reibung in Schichtgrenzen zwischen Erdstoffen und Geokunststoffen sowie zwischen verschiedenen Geokunststoffen. Zudem sollte die verbesserte Versuchstechnik auch für Rahmenscherversuche an Erdstoffen gut geeignet sein.

2 VERSUCHSPROGRAMM UND MATERIALIEN

2.1 Versuchsprogramm

Das Untersuchungsprogramm gliederte sich in einen experimentellen und einen numerischen Teil.

Im experimentellen Teil wurden in verschiedenen Gerätekonfigurationen (s. Abschn. 2.3) Rahmenscherversuche an einem Sand und einem Ton und Reibungsversuche für die Schichtgrenzen zwischen dem Sand und einem mechanisch verfestigten Vlies sowie zwischen einem Geotextil und einer Kunststoffdichtungsbahn durchgeführt. Referenzwerte für die Scherfestigkeit der Erdstoffe wurden in Triaxialversuchen ermittelt. Dieser Beitrag behandelt sich nur mit den Reibungsversuchen zwischen Sand und Vlies. Detaillierte Angaben zu den weiteren Untersu-

chungen und den daraus resultierenden Erkenntnissen liefert STOEWAHSE (2001).

Im numerischen Teil wurden Versuche in den Gerätekonfigurationen mit feststehendem Rahmen und mit vertikal verschieblichem Rahmen mit locker und dicht gelagertem Sand und einem starren Reibpartner mit dem Finite-Elemente-Programm PLAXIS simuliert. Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen liefern ergänzende Erkenntnisse zur Verteilung der Spannungen am und im Probekörper.

2.2 Materialien

Der verwendete Sand ist ein Normsand nach EN 196-1. Es handelt sich um einen ungleichförmigen, rundkörnigen, fein- und mittelsandigen Grobsand mit einem Quarzanteil von mindestens 98 %. Die bodenmechanischen Klassifikationsparameter enthält Tabelle 2-1. Der Sand wurde mit Lagerungsdichten von $D = 0,15$, $D = 0,58$ und $D = 0,95$ in die Prüfgeräte eingebaut. Die Scherparameter des Sandes bei diesen Lagerungsdichten wurden in Triaxialversuchen ermittelt. Diese Daten dienen als Referenzwerte für die Scherfestigkeit des Sandes und als Eingangsparameter für die FE-Berechnungen. Die Auflastspannungen in den Reibungsversuchen betragen 25/50/100/200 kN/m².

Tabelle 2-1 Bodenmechanische Parameter von CEN-Sand

U	max ρ_d	min ρ_d	φ' bei D = 0,95	v bei D = 0,95	φ' bei D = 0,15
[-]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[°]	[°]	[°]
6,4	1,92	1,66	40	19	31

Die Schichtgrenze zu dem Sand bildet ein mechanisch verfestigtes PEHD-Vlies der Naue Fasertechnik GmbH & Co. KG, Lübbecke. Das Flächengewicht des Vlieses beträgt rd. 300 g/m². Diese Materialkombination wurde für eine Lagerungsdichte des Sandes von $D \approx 0,6$ auch in den Ringanalysen des AK5.1 der DGGT untersucht.

2.3 Verwendete Geräte

Die Gerätekonfigurationen lassen sich anhand der kinematischen Freiheit des oberen Rahmens unterscheiden. Bei den Geräten der sogenannten „englischen Bauweise“ (Abb. 2-1 a) wird der obere Rahmen durch ein Punktlager horizontal gestützt. Die Auflagerkraft entspricht der resultierenden Reibungskraft in der Schichtgrenze. Bei diesem System kann sich der obere Rahmen um den Auflagerpunkt als Pol drehen. Der Spalt zwischen den beiden Rahmenhälften kann sich also während des Versuchs aufweiten.

Diese Effekte treten bei der Gerätekonfiguration mit feststehendem Rahmen (Abb. 2-1 c) konstruktionsbedingt nicht auf. Daher wurde nach Untersuchungen von WERNICK (1979) und KAST (1986) davon ausgegangen, dass sich in diesen Rahmenschergeräten bei Erdstoffen eine gleichmäßig dicke Scherfuge ausbildet. Wegen der geometrisch eindeutigen Randbedingungen und der einfachen Befestigung von Geokunststoffen wird diese Gerätekonfiguration häufig für Reibungsversuche mit Geokunststoffen eingesetzt. Bei dem für die hier dargestellten Untersuchungen verwendeten Gerät wird die Auflast über Luft- bzw. Wasserdruck in einem Druckkissen aufgebracht. Die Belastungseinrichtung ist dabei an den oberen Rahmen gekoppelt.

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 Schichtgrenze wirkenden Normalspannung kommen. Von den Verfassern und von der Wille GeoTechnik GmbH, Göttingen, wurde das Großrahmenschergerät mit feststehendem oberen Rahmen so weiterentwickelt, dass 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 Schichtgrenze. Über einen Regelkreis wird die Auflast so gesteuert, dass Einflüsse aus der Wandreibung an der Rahmeninnenseite kompensiert werden und die resultierende Normalspannung in der Scherfuge dem Vorgabewert entspricht (Abb. 2-1 d).

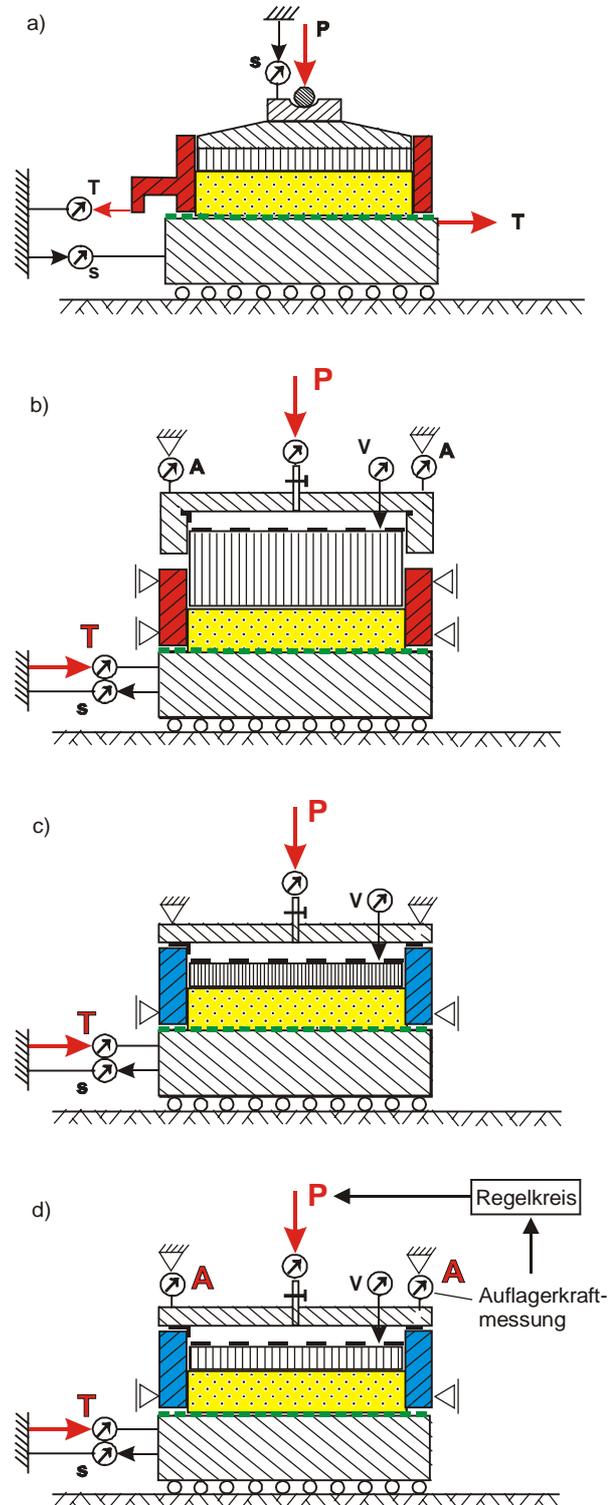


Abbildung 2-1 Verwendete Versuchsaufbauten
a) frei aufliegender Rahmen
b) vertikal verschieblicher Rahmen
c) feststehender Rahmen
d) feststehender Rahmen mit Normalkraftkompensation

Wandreibungseffekte und die damit verbundenen Differenzen zwischen Auflast und resultierender Normalkraft in der Scherfuge bzw. Schichtgrenze treten bei Systemen mit „schwebendem“ oberem Rahmen nicht auf. Das bestehende Gerät mit feststehendem Rahmen wurde von den Verfassern weiter modifiziert und der obere Rahmen in Rollenlagern vertikal verschieblich gelagert. Eine Rotation des Rahmens wie bei dem Gerät mit frei aufliegendem Rahmen ist nicht möglich. Das Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen ist in Abbildung 2-1 b) dargestellt. Das Gerät ist so konstruiert, dass mit nur geringfügigen Umbauten auch Versuche mit feststehendem Rahmen gemäß Abbildung 2-1 c) und d) möglich sind.

2.4 Numerische Modellierung

Die numerischen Modellierungen der Rahmenscherversuche mit Sand und der Reibungsversuche für die Schichtgrenze zwischen Sand und einem starren Reibpartner 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 vertikal verschieblichem oberem Rahmen und für die Grenzfälle des locker und dicht gelagerten Sandes mit den Finite-Elemente-Programm PLAXIS durchgeführt.

Das für die Reibungsversuche verwendete Modell ist in Abbildung 2-2 dargestellt. 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. Die Auflastspannungen betragen wie in den Versuchen 25/50/100/200 kN/m². Am unteren Rahmen wurde in insgesamt 300 Schritten eine Zwangsverschiebung bis zum Bruchzustand aufgebracht.

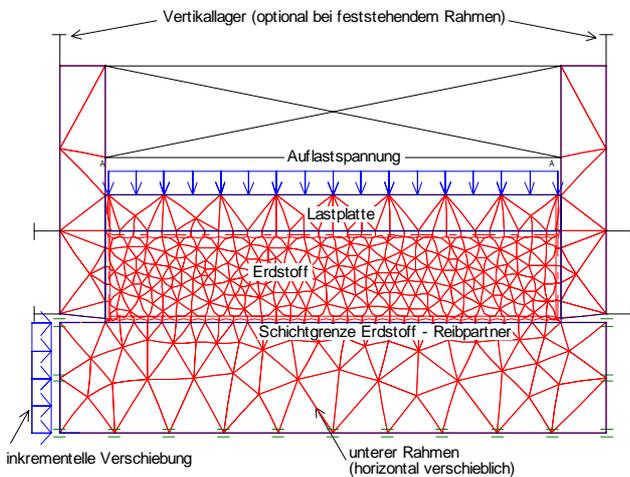


Abbildung 2-2 Finite-Elemente-Modell des Reibungsversuchs

Für den Sand bei lockerer und dichter Lagerung wurde das im Programmsystem enthaltene Hardening-Soil-Modell verwendet. Die Stoffparameter wurden aus den o. g. Triaxialversuchen abgeleitet.

In den experimentellen Untersuchungen zur Scherfestigkeit von Sand und zur Reibung in der Schichtgrenze zwischen Sand und Geotextil wurde kein wesentlicher Unterschied im Spannungs-Verschiebungsverhalten und im Dilatanzverhalten beobachtet. Daher ist anzunehmen, dass sich die Scherzone zumindest teilweise in den Erdstoff verlagert. Für die Schichtgrenze zwischen Sand und Geotextil kann das Materialverhalten des

Sandes in guter Näherung angesetzt werden. Die Dicke und Zusammendrückbarkeit des Geotextils und geokunststoffspezifische Eigenschaften wie z. B. Relaxation oder ein Auflösen des Faserverbundes wurden mit dieser Modellierung nicht erfasst.

Zur Simulation der Reibung zwischen dem Erdstoff und den Rahmenwänden wurde ein elastisch-plastisches Stoffgesetz gewählt. Der Wandreibungswinkel wurde für beide Lagerungsdichten in Sonderversuchen zu rd. 23° ermittelt.

Rahmenscherversuche an Erdstoffen konnten mit diesem Modell mit entsprechenden Modifikationen ebenfalls simuliert werden.

3 VERSUCHSERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Reibungsversuche für die Schichtgrenze zwischen Sand und Vlies sind in Abbildung 3-1 und 3-2 als Reibungsspannungs-Verschiebungslinien dargestellt.

Die Charakteristiken der Reibungsspannungs-Verschiebungslinien sind für beide Gerätekonfigurationen grundsätzlich vergleichbar. Bei dichter Lagerung des Sandes ergeben sich im Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen allerdings deutlichere Maxima der Reibungsspannungen. Die Messwerte des Reibungswiderstands bei größeren Verschiebungen sind in diesem Gerät annähernd konstant, während sie im Gerät mit feststehendem Rahmen nach dem Erreichen des Bruchzustands teilweise weiter ansteigen.

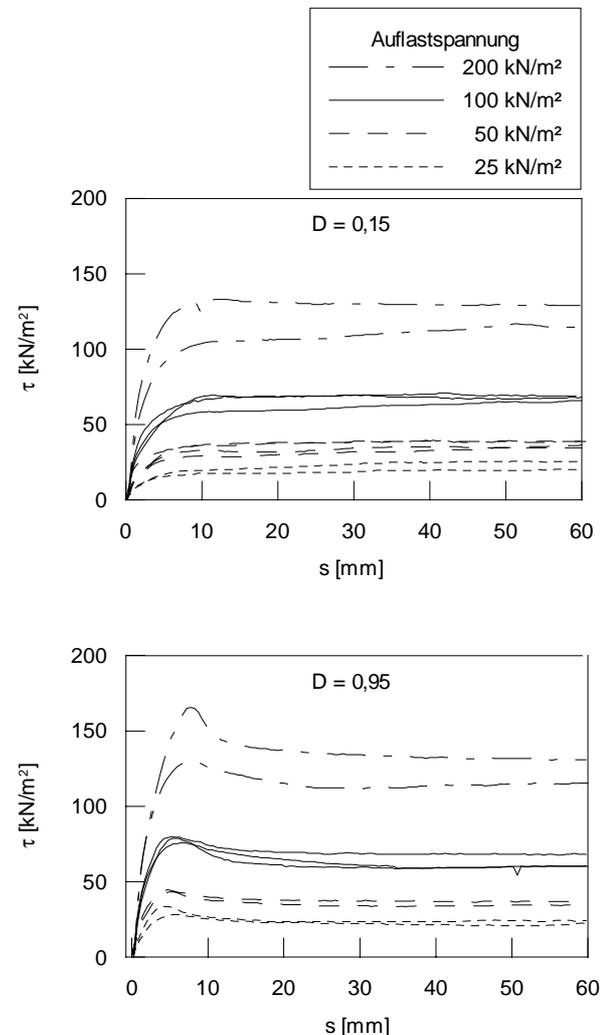


Abbildung 3-1 Ergebnisse der Reibungsversuche im Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen bei lockerer und dichter Lagerung des Sandes

Im Gerät mit feststehendem Rahmen werden bei beiden Lagerungsdichten des Sandes und bei allen Auflastspannungen größere Reibungswiderstände gemessen als in den anderen Gerätekonfigurationen. Die Ursache hierfür sind Zwängungskräfte am oberen Rahmen.

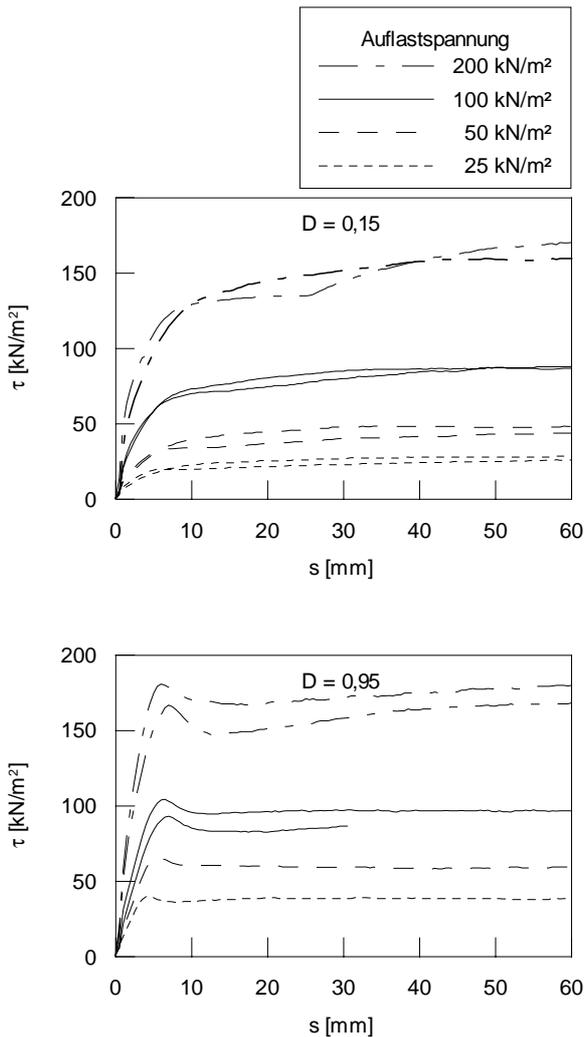


Abbildung 3-2 Ergebnisse der Reibungsversuche im Gerät mit feststehendem Rahmen bei lockerer und dichter Lagerung des Sandes

4 KRÄFTE UND SPANNUNGEN IM PRÜFSYSTEM

Die in den Gerätevarianten mit vertikal verschieblichem und mit feststehendem Rahmen am Probekörper wirkenden Kräfte und Spannungen werden im folgenden näher betrachtet. Der Probekörper wird hierfür vereinfachend als Starrkörper idealisiert.

Diese Betrachtungen werden anschließend durch experimentelle Sonderversuche ergänzt. Die Finite-Elemente-Modellierung dieser zwei Gerätekonfigurationen liefert schließlich weitere Informationen über die Spannungsverteilungen im und am Probekörper und in der Schichtgrenze zum Reibpartner.

4.1 Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen

Für diese Gerätekonfiguration sind in Abbildung 4-1 die am oberen Teilsystem wirkenden Kräfte dargestellt. Die in der Schichtgrenze angreifende Scherkraft T wird am Probekörper an der Stirnseite der Probe, also über die dortige Rahmenwand abgetragen. Vereinfachend wird angenommen, dass zwischen Lastplatte und Probenoberseite keine Horizontalkräfte übertragen werden und somit auch nicht zwischen Lastplatte und Rahmen. Ebenso

wird davon ausgegangen, dass sich der „starre“ Probekörper an der „Zugseite“ vom Rahmen ablöst und somit keine Kräfte zwischen der linken Rahmenwand und der Probe wirken. Ebenso werden die an der linken Rahmenhälfte wirkenden Auflagerkräfte wegen der räumlichen Koppelung mit der rechten Rahmenhälfte nur an der rechten Rahmenhälfte („Druckseite“) angetragen. Schließlich wurden räumliche Effekte infolge der Rahmenseitenwände nicht berücksichtigt.

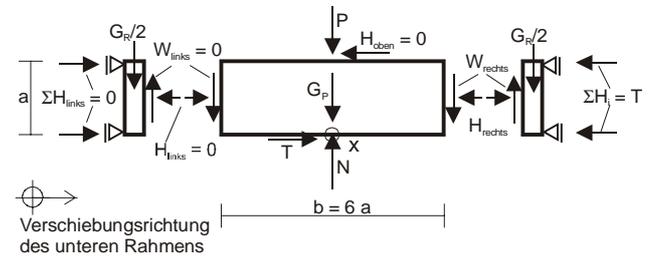


Abbildung 4-1 Kräfte am Probekörper im vertikal verschieblichen Rahmen

Aus den Kräftegleichgewichtsbedingungen ergibt sich dann:

$$\sum V = 0 :$$

$$G_R = W_{rechts}$$

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

$$\sum H = 0 :$$

$$H_{rechts} = T$$

Während der Versuchsdurchführung im Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen wurde bei größeren Auflastspannungen und somit größeren Reibungsspannungen beobachtet, dass sich der obere Rahmen geringfügig anhub. Um diese Hebung des oberen Rahmens zu bewirken, muss also am Rahmen eine Vertikalkraft angreifen. Bei reibungsfreier äußerer Lagerung des oberen Rahmens kann die Vertikalkomponente dieser an der Rahmenwand wirkenden resultierenden Kraft nicht größer als das Eigengewicht G_R des Rahmens sein. Das heißt, dass sich mit größer werdender Horizontalkomponente die Hauptspannungstrajektorien in zunehmendem Maße normal zur Rahmenwand ausrichten.

Andererseits ergibt sich ein schwebender Rahmen erst, wenn die Summe der vertikalen Wandreaktionskräfte W_{rechts} größer oder gleich dem Rahmeneigengewicht G_R ist. Ist sie kleiner, kann sich der obere Rahmen nicht heben und ist als feststehend zu betrachten. Aus dieser Forderung ergibt sich auch eine eingeschränkte Anwendbarkeit des „schwebenden“ Rahmens bei sehr kleinen Auflastspannungen.

Aus dem Momentengleichgewicht um den Punkt x in der Mitte der Probenunterseite kann die Lage der Wirkungslinie der Normalkraft in der Schichtgrenze abgeschätzt werden. Die Horizontalkraft H_{rechts} erzeugt ein linksdrehendes Moment um den Punkt x . Das Gleichgewicht kann durch die vertikale Wandreaktionskraft $W_{rechts} = G_P$ nicht gehalten werden. Die Wirkungslinien der Auflastkraft A oder der Normalkraft N müssen sich so verlagern, dass sie rechtsdrehende Momente um den Punkt x ausüben. Verstärkt wird dieser Effekt, wenn die Kraft H_{oben} ungleich Null ist.

4.2 Gerät mit feststehendem Rahmen

Im Gerät mit feststehendem Rahmen ist die vertikale Wandreaktionskraft W_{rechts} nicht durch die Größe der Rahmeneigenwichtskraft beschränkt, sondern nur durch die zwischen Probekörper und Rahmen übertragbaren Wandreibungskräfte. Zusätzlich zum Rahmeneigenwicht wirken hier die vertikalen Auflagerreaktionen A_i , wobei analog zu den Betrachtungen in Abschn. 4.1 die Schnittgrößen und Auflagerkräfte an der „Druckseite“ des oberen Rahmens angesetzt werden. Die am System wirkenden Kräfte sind in Abbildung 4-2 dargestellt.

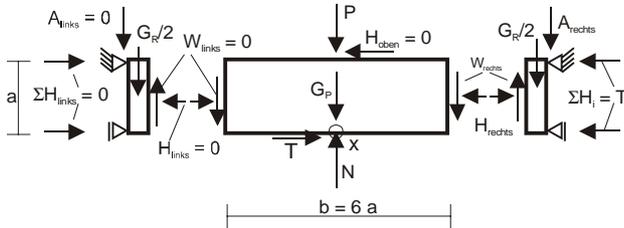


Abbildung 4-2 Kräfte am Probekörper im feststehenden Rahmen

Die größtmögliche Neigung der resultierenden Wandreaktionskraft gegen die Normale ist abhängig vom Wandreibungswinkel zwischen Probekörper und Wandmaterial. Mit den oben getroffenen Annahmen ergeben sich für den Grenzzustand aus den Gleichgewichtsbedingungen folgende Zusammenhänge, wobei R die unter dem Wandreibungswinkel $\delta_{Boden-Rahmen}$ geneigte Reaktionskraft an der Rahmendruckseite im Grenzzustand ist:

$$\sum V = 0 :$$

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

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

$$\sum H = 0 :$$

$$T = H_{rechts}$$

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

und damit:

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

Für diesen Rahmen ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht um den Punkt x , dass sich die Lage der Wirkungslinie von N nach rechts verschiebt. Die Wandreaktionskraft W_{rechts} ist im feststehenden Rahmen proportional zur Scherkraft T . Das daraus resultierende rechtsdrehende Moment um den Punkt x kann alleine durch die Horizontalkraft H_{rechts} nicht kompensiert werden, da ihr Hebelarm durch die Probenhöhe beschränkt ist. Neben einem infolge der Horizontalkraft H_{oben} möglichen linksdrehenden Moment ist ein weiteres linksdrehendes Moment am Probekörper infolge einer Ausmitte der Normalkraft N erforderlich.

4.3 Experimentelle Überprüfung der Zwängungskräfte

Die Zwängungskräfte lassen sich experimentell indirekt über die Ermittlung der Normalspannung in der Schichtgrenze mit Hilfe der Einrichtung zur Normalkraftkompensation erfassen. In Abbildung 4-3 sind die Scherkräfte T und die Normalkräfte in

der Schichtgrenze N für beide Gerätekonfigurationen abhängig von der Verschiebung dargestellt.

Die Versuche wurden bei einer konstanten Auflastspannung von 100 kN/m^2 durchgeführt. Das obere Diagramm in Abbildung 4-3 zeigt die Scherkräfte abhängig von der Verschiebung. Wie in Abbildung 3-1 und 3-2 ergeben sich im Gerät mit feststehendem Rahmen die größeren Scherkräfte.

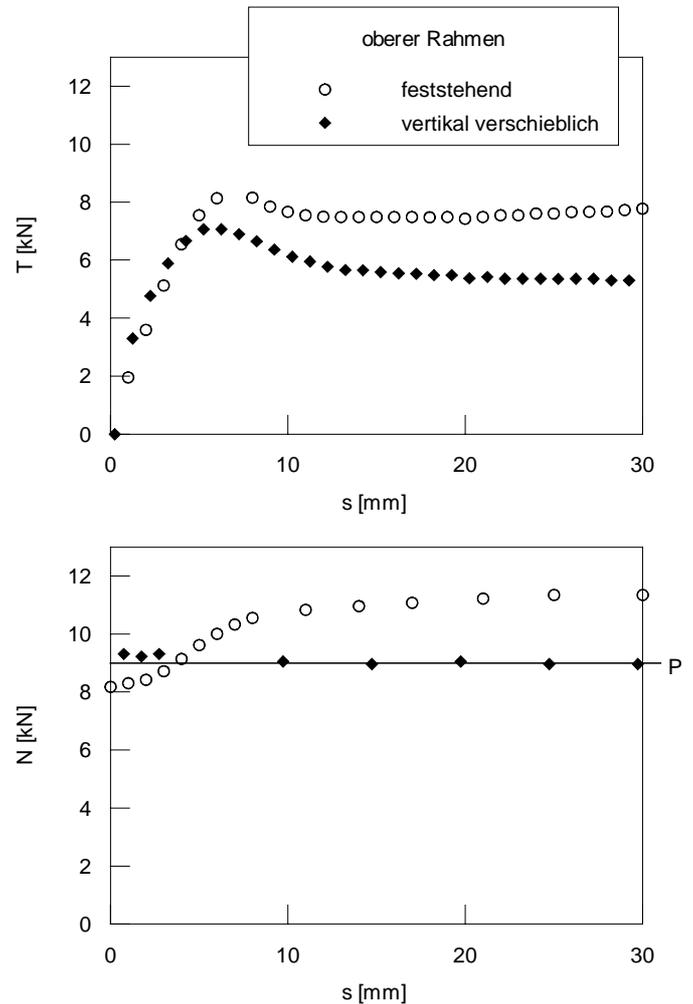


Abbildung 4-3 Normalkraft in der Schichtgrenze N , Auflastkraft P und Scherkraft T abhängig von der Verschiebung s

Im unteren Diagramm sind die für beide Gerätetypen gemessenen resultierenden Normalkräfte in der Schichtgrenze N sowie die konstante Auflastkraft von $P = 9 \text{ kN}$ eingetragen.

Für das Gerät mit feststehendem Rahmen ist für die Konsolidierungsphase 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 Schichtgrenze bei 30 mm Verschiebung und während der Konsolidierungsphase 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 .

Erkenntnisse über die Vertikalkräfte an der „Druckseite“ des Probekörpers liefern auch die Ergebnisse der FE-Berechnungen. Abbildung 4-4 zeigt für beide Gerätetypen die Hauptspannungsrichtungen im Probekörper und die Verteilung der vertikalen Randspannungen am Erdstoff. Für die Probenoberseite und die Schichtgrenze sind dies die Normalspannungen und für die Seiten des Probekörpers die Schubspannungen. Die Berechnungen wurden wie die experimentellen Untersuchungen zur Quantifizierung der Zwängungskräfte mit einer konstanten Auflastspannung von 100 kN/m^2 durchgeführt.

An der „Zugseite“ wurden für beide Gerätetypen keine nennenswerten Schub- und Normalspannungen zwischen Erdstoff und Rahmen berechnet. Für das Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen ergaben sich auch an der „Druckseite“ nur Vertikalkräfte in der Größe des Rahmeneigengewichts. Die Hauptspannungsrichtungen sind hier annähernd normal zur Rahmenwand.

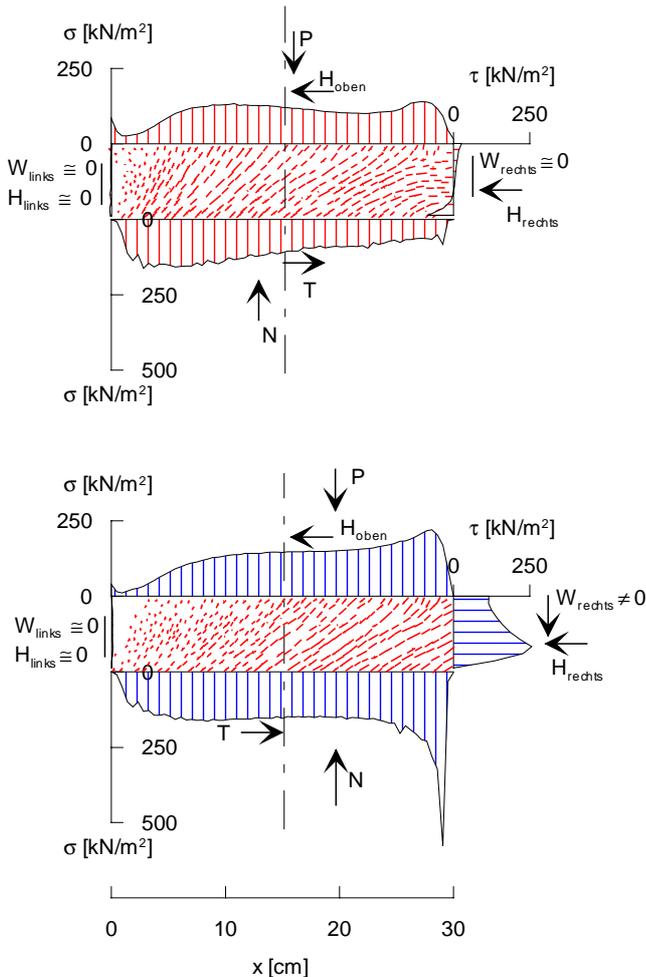


Abbildung 4-4 Vertikale Randspannungen am Probekörper, Lage der Wirkungslinien der resultierende Normalkräfte und Hauptspannungsrichtungen im Erdstoff (überhöhte Darstellung)
oben: vertikal verschieblicher Rahmen
unten: feststehender Rahmen

Dem gegenüber wurden für das Gerät mit feststehendem Rahmen an dieser Stelle ausgeprägte Vertikalspannungen berechnet. Diese Vertikalspannungen bewirken andere Spannungstrajektorien an der Rahmenwand und im Probekörper und zudem eine deutlich andere Verteilung der Normalspannungen in der Schichtgrenze mit einem ausgeprägten lokalen Maximum. Die maximale Normalspannung in der Schichtgrenze übersteigt die Auflastspannung um ein Vielfaches. Die Integration dieser Spannungsverteilung über die Länge der Schichtgrenze ergibt eine mittlere Normalspannung in der Schichtgrenze von unge-

fähr dem 1,5-fachen der Auflastspannung. Für die FE-Simulation des Reibungsversuchs im Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen entspricht die berechnete resultierende Normalkraft in der Schichtgrenze der Auflastkraft.

In Abbildung 4-4 sind zusätzlich zu den Randspannungen auch die daraus resultierenden Kräfte mit der ungefähren Lage ihrer Wirkungslinie eingetragen.

4.4 Konsequenzen für die Versuchsauswertung

In der üblichen Auswertung von Reibungsversuchen wird die durch Zwängungskräfte erhöhte Normalspannung in der Schichtgrenze nicht berücksichtigt, da die Reibungsspannungen im Bruchzustand im allgemeinen auf die Auflastspannung bezogen werden. Zudem kann die resultierende Normalspannung in der Scherfuge im allgemeinen experimentell nicht gesondert erfasst werden.

Die in den vier untersuchten Gerätekonfiguration ermittelten Grenzbedingungen sind in Reibungsspannungs-Normalspannungsdiagrammen in Abbildung 4-5 und 4-6 für die lockere Lagerung des Sandes zusammengestellt. Eine gute Übereinstimmung zeigen die Messwerte der beiden Geräte mit schwebendem Rahmen.

Die infolge der Zwängungskräfte erhöhten Messwerte führen bei der Auswertung der Versuche mit einer linearen Grenzbedingung für die Gerätekonfiguration mit feststehendem Rahmen zu fiktiven Adhäsionswerten, die nicht durch adhäsive Wechselwirkungen oder Effekte infolge von Kapillarkräften begründet sind, da der Sand keine Kohäsion aufweist und trockene Materialien verwendet wurden. Formschlusseffekte, die bei Schichtgrenzen zwischen verschiedenen Geokunststoffen adhäsionsartige Effekte bewirken können, sind hier wegen der makroskopisch annähernd ebenen Oberflächen ebenfalls vernachlässigbar. Sofern zwischen dem Sand und dem Geotextil eine Art Formschluss oder Stoffschluss besteht, z. B. indem Sandkörner in das Geotextil eindringen, verlagert sich die Bruchfuge in den Sand und die Materialeigenschaften des Sandes werden maßgebend.

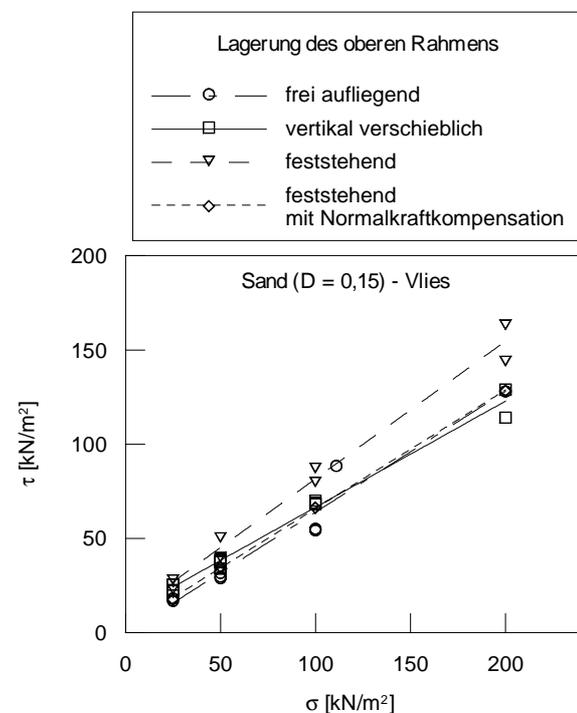


Abbildung 4-5 Ergebnisse der Reibungsversuche zwischen Sand ($D = 0,15$) und Vlies im Reibungsspannungs-Normalspannungsdiagramm

Wird hingegen - wie im Gerät mit feststehendem Rahmen und Normalkraftkompensation - die mittlere Normalspannung in der Schichtgrenze als Bezugsspannung herangezogen, ergeben sich Reibungsparameter, die mit den in den Geräten mit schwebendem Rahmen ermittelten Werten vergleichbar sind. Zu beachten ist allerdings, dass auch bei dieser Art der Auflaststeuerung eine ungleichmäßige Verteilung der Normalspannungen in der Scherfuge analog zu Abbildung 4-4 (unten) vorhanden sein dürfte.

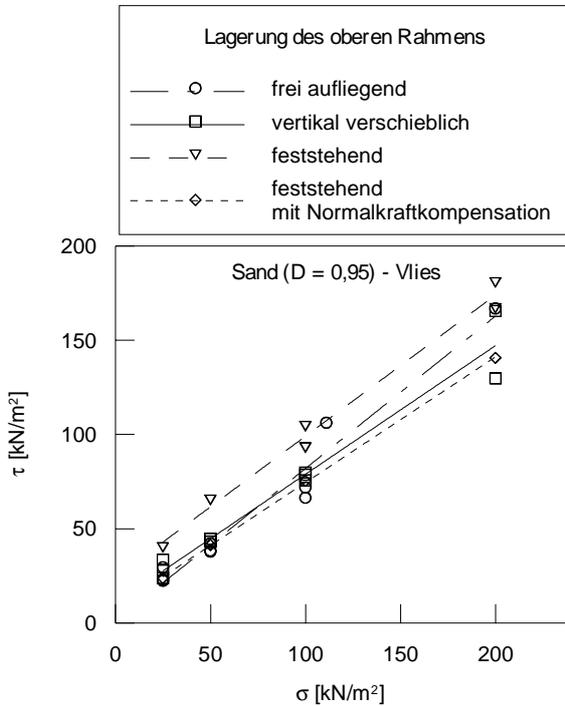


Abbildung 4-6 Ergebnisse der Reibungsversuche zwischen Sand (D = 0,95) und Vlies im Reibungsspannungs-Normalspannungsdiagramm

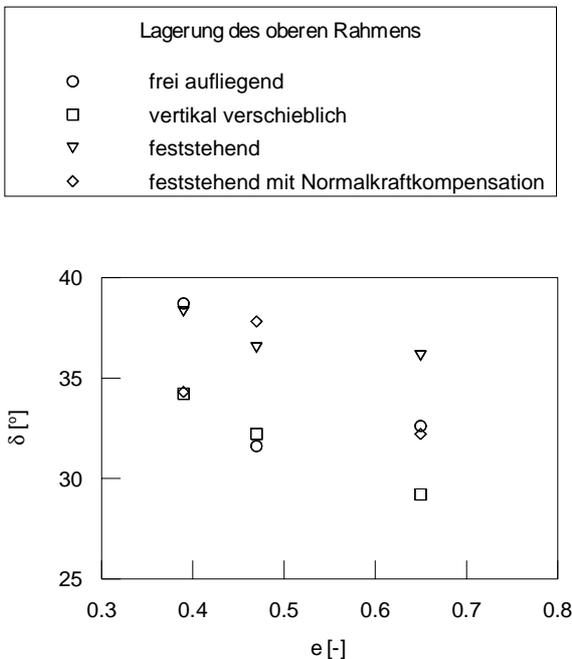


Abbildung 4-7 Reibungswinkel abhängig von der Einbauporenzahl im Reibungsversuch zwischen Sand und Vlies

In Abbildung 4-7 sind die in den verschiedenen Gerätekonfigurationen ermittelten Reibungswinkel abhängig von der Einbauporenzahl des Sandes aufgetragen. Die Reibungswinkel wurden für lineare Grenzbedingungen ermittelt. Trotz einer gewissen Streubreite ist festzustellen, dass die im Gerät mit feststehendem Rahmen ermittelten Reibungswinkel fast immer größer sind als die übrigen. Dieser Effekt folgt aus den Wandreibungseffekten und Zwängungskräfte.

Für die Versuche im Gerät mit vertikal verschieblichem Rahmen errechneten sich bei allen Lagerungsdichten die kleinsten Reibungswinkel. Dieses stimmt mit den Feststellungen aus Ergebnissen von hier nicht dargestellten Rahmenscherversuchen an dem Sand überein. In diesen Versuchen ergab sich bezüglich der Scherparameter eine gute Übereinstimmung mit den Referenzdaten aus den Triaxialversuchen.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Zusammenfassend ist für die hier dargestellten experimentellen und numerischen Untersuchungen folgendes festzustellen:

Gerätetechnisch bedingte Zwängungskräfte im Rahmenschergerät mit feststehendem Rahmen beeinflussen die Messwerte der Reibung in Schichtgrenzen zwischen nicht bindigen Erdstoffen und Geokunststoffen. Hieraus können sich bei Ansatz der üblichen Grenzbedingungen physikalisch nicht zutreffende Adhäsionswerte und zu große Reibungswinkel ergeben.

Dieses kann zur unsicheren Bemessung von Konstruktionen mit Geokunststoffen führen. Wegen derartiger der Geräteeinflüsse auf die Ergebnisse von Reibungsversuchen sind deshalb genaue Angaben zur Gerätekonfiguration in Prüfberichten unerlässlich, um eine ausreichende Interpretation der Versuchsergebnisse und eine sichere Bemessung von Geokunststoffkonstruktionen zu gewährleisten.

Die Darstellung in Abbildung 4-7 zeigt, dass gerätetechnische Einflüsse auf die Werte der Reibungsparameter durch Verzicht auf den Ansatz von Adhäsionswerten nur teilweise berücksichtigt werden. Auch bei der Festlegung der charakteristischen Werte und der Bemessungswerte für den Reibungswinkel sind diese Effekte zu beachten. Sofern Reibungsparameter aus Versuchen in Geräten mit feststehendem Rahmen für Standsicherheitsberechnungen verwendet werden, empfehlen wir daher vorsorglich aus den Messdaten erhaltene Adhäsionswerte grundsätzlich nicht in Standsicherheitsberechnungen anzusetzen und Rechenwerte des Reibungswinkels mit höheren Sicherheitsbeiwerten zu ermitteln. Ebenso sollte vom direkten Ansatz der Reibungsparameter bzw. eines aus den Messdaten mit den üblichen Sicherheitsbeiwerten ermittelten Ersatzreibungswinkels in Standsicherheitsnachweisen abgesehen werden.

Aufgrund der hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse mit verschiedenen Lagerungen des oberen Rahmens der Versuchsgärte wird die Variante mit vertikal verschieblich geführtem oberem Rahmen als Standardprüfgerät für Reibungsversuche empfohlen. Für Rahmenscherversuche an Erdstoffen ist diese Gerätekonfiguration in der DIN 18 137-3 „Direkter Scherversuch“ vorgesehen. Die GDA-Empfehlung E 3-8 „Reibungsverhalten von Geokunststoffen“ ist entsprechend zu ergänzen.

6 LITERATUR

- Kast, K. 1986. „Geführte direkte Scherversuche an bindigen Erdstoffen“, Bautechnik, H. 8, S. 271 - 278
- Stoewahse, C. 2001. „Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen und Erdstoffen im Rahmenschergerät“, Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover, Heft 57, Eigenverlag
- UG1 AK5.1. 1995 und 1996. „Ergebnisse der Rundversuche“, unveröffentlichte Arbeitsunterlagen
- Wernick, E. 1979. „Bestimmung von Bodenkennwerten mit einem parallelgeführten direkten Schergerät“, Die Bautechnik, H. 9, S. 307 - 313