

## E 3-8 Reibungsverhalten von Geokunststoffen

August 2015

### 1 Allgemeines

Zur Untersuchung der Reibung in den Schichtgrenzen zwischen verschiedenen Geokunststoffen sowie zwischen Geokunststoffen und Erdstoffen werden Reibungsversuche in Rahmenschergeräten mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit als Standardmethode empfohlen. Wenn in Sonderfällen nur die Größe der Reibung im Grenzzustand bestimmt werden soll, sind anstelle weggesteuerter Reibungsversuche auch Versuche mit stufenweiser Steigerung der Schubkraft geeignet. Derartige kraftgesteuerte Reibungsversuche sind nicht Gegenstand dieser Empfehlung.

Diese Empfehlung gibt Hinweise zur Definition der Reibung, zum Gerät, zu den Randbedingungen, zur Durchführung und zur Auswertung der Versuche sowie zur Dokumentation der Ergebnisse. Die Ableitung von Bemessungswerten aus den Versuchswerten sowie für deren Anwendung im Nachweis der Gleitsicherheit werden in GDA 2-7 behandelt.

Zur Ermittlung der Scherfestigkeit von Erdstoffen wird auf DIN 18137, hier insbesondere auf Teil 3 „Direkter Scherversuch“, verwiesen. Zur allgemeinen Ermittlung der Reibungskenngrößen von Geokunststoffen – beispielsweise zu Vergleichs- oder Orientierungszwecken – wird auf DIN EN ISO 12957-1 hingewiesen, worin ein Indexprüfverfahren für Geokunststoffe im Kontakt mit einem Normsand erläutert wird. Der Schiefe-Ebene-Versuch wird in DIN EN ISO 12957-2 beschrieben. Die Ermittlung der inneren Scherfestigkeit von Verbundstoffen wird in dieser Empfehlung nicht behandelt.

### 2 Grundsätzliche Erläuterungen zur Reibung

Physikalische Grundlage für die Reibungsfestigkeit (kurz Reibung genannt) zwischen zwei ebenen Oberflächen in geschichteten Systemen ist das Reibungsgesetz von Coulomb. Danach ist die Reibungskraft  $F_R$  proportional der Normalkraft  $F_N$ , mit der die beiden Flächen gegeneinander gedrückt werden. Der Proportionalitätsfaktor  $\mu = \tan \delta$  heißt Reibungszahl oder Reibungskoeffizient,  $\delta$  ist der Reibungswinkel. Er hängt im Wesentlichen von den Materialien und von deren Oberflächenbeschaffenheit ab.

Der Anteil des Scherwiderstandes, der unabhängig von der Normalkraft mobilisiert werden kann ( $F_N = 0$ ), wird Adhäsion genannt (Adhäsionskraft  $F_a$  bzw. Adhäsionsspannung  $a$ ). Dem Begriff Adhäsion wird in der Werkstoffkunde nicht nur die spezifische oder thermodynamische Adhäsion zugeordnet, die im Wesentlichen durch elektrochemische Anziehungskräfte zwischen zwei in Kontakt befindlichen Materialien bewirkt wird, sondern auch die so genannte mechanische Adhäsion, mit der Verhakungs- und Formschlusseffekte erfasst werden, die dann entstehen, wenn zum Beispiel ein Material in das andere punktuell eindringt. Derartige Effekte werden durch Druckspannungen begünstigt.

Die Coulomb'sche Grenzzustandsgleichung lautet:

$$F_R = F_a + F_N \cdot \tan \delta \quad (3)$$

bzw.

$$\tau = a + \sigma \cdot \tan \delta \quad (4)$$

Die Reibungsspannung setzt sich in dieser Grenzbedingung additiv aus einem spannungsabhängigen Anteil ( $\sigma \cdot \tan \delta$ ) mit dem Reibungswinkel  $\delta$  als Parameter und einem spannungsunabhängigen Anteil, der Adhäsion  $a$ , zusammen. Die Reibungsparameter für den Bruchzustand werden mit dem Index „f“ ( $\delta_f$ ,  $a_f$ ) und die für den Gleitzustand mit dem Index „r“ ( $\delta_r$ ,  $a_r$ ) gekennzeichnet.

Der Zusammenhang von Normalspannung und Reibungsspannung kann bei einigen Geokunststoffsichtgrenzen und hierbei insbesondere im niedrigeren Normalspannungsbereich auch nichtlinear sein. Für geotechnische Gleitsicherheitsanalyse kann ein solcher nichtlinearer Zusammenhang in der Regel durch eine nach Spannungsbereichen aufgeteilte, abschnittsweise Anwendung der linearen Coulomb'schen Grenzbedingung näherungsweise beschrieben werden. Zur genaueren Beschreibung des Grenzzustandes – insbesondere bei stark nichtlinearem Zusammenhang zwischen Normal- und Reibungsspannung – kommen alternativ auch nichtlineare Ansätze oder der Ansatz des Gesamtreibungswinkels in Betracht (vgl. Abschn. 6 und BLÜMEL U. HEINEMANN).

### 3 Prüfmateriale

#### 3.1 Geokunststoffe

Die Geokunststoffproben für Reibungsversuche sind aus den für die Baumaßnahme vorgesehenen Produkten zu entnehmen. Die Probestücke müssen frei von Falten, Verunreinigungen, Oberflächenveränderungen und sonstigen Beschädigungen sein. Die Abmessung einer auf die Geokunststoffe aufgetragenen Struktur ist maßgebend für die Mindestgröße der Nennreibungsfäche. Die Länge der Nennreibungsfäche im Reibungsversuch soll mindestens das Sechsfache der maximalen Abmessung der

Struktur betragen. Die Größe der Probestücke richtet sich nach dem Prüfgerät und der Lage im Gerät (vgl. Abschn. 4).

Folgende Angaben zum Geokunststoff sind der Prüfinstitution zur Verfügung zu stellen:

- die Produktbezeichnung und das zugehörige Technische Datenblatt
- die Produktionsrichtung, die Verlegerichtung und die Prüfrichtung
- die zu prüfende Seite.

Vor allem folgende Kennwerte müssen bei Anlieferung der Geokunststoffe seitens der Prüfinstitution kontrolliert und dokumentiert werden:

- die flächenbezogene Masse von Geotextilien,
- die Dicke der Geokunststoffe.

Es sind Rückstellproben aufzubewahren.

### **3.2 Erdstoffe**

Es sind Proben der für die Baumaßnahme vorgesehenen Erdstoffe zu verwenden. Die bodenmechanischen Kennwerte sind zu ermitteln, wobei im Deponiebau auch E 3-1 zu beachten ist. Der Korndurchmesser  $d_{85}$  des Erdstoffs (Korndurchmesser bei 85 Gew. % Siebdurchgang) ist maßgebend für die Mindestgröße der Nennreibungsfäche. Die Länge der Nennreibungsfäche im Reibungsversuch (Fläche bei Versuchsbeginn) soll mindestens das Fünfzehnfache dieses Korndurchmessers betragen. Die Probenmenge ist mit der Prüfinstitution abzustimmen.

Folgende Angaben zum Erdstoff sind der Prüfinstitution zur Verfügung zu stellen oder im Zuge der Prüfung zu ermitteln:

- die Körnungslinie,
- die Zustandsgrenzen,
- die Proctorkurve,
- der Wassergehalt bzw. der zulässige Bereich des Wassergehalts beim Einbau,
- die Feuchtdichte bzw. der zulässige Bereich der Feuchtdichte beim Einbau,
- die Scherparameter.

Seitens der Prüfinstitution sind der Wassergehalt und die allgemeinen Angaben zum Erdstoff beispielsweise mit den in EN ISO 14688-1 erläuterten Verfahren zum Beschreiben und Benennen von Bodenarten zu überprüfen. Falls sich bei der Überprüfung Zweifel hinsichtlich der Zuordnung des Erdstoffs zu den vorgenannten schriftlichen Angaben ergeben, sind bodenmechanische Kontrollversuche durchzuführen.

## 4 Prüfeinrichtung und Messgrößen

Die Prüfeinrichtung ist ein Rahmenschergerät, wie es auch in der bodenmechanischen Prüfpraxis zur Bestimmung der Scherfestigkeit von Erdstoffen verwendet wird. Es besteht aus zwei übereinander angeordneten Rahmen, zwischen denen sich ein Spalt befindet, dessen Höhe variiert werden kann. Durch die horizontale translatorische Verschiebung eines Rahmens wird im Spalt eine Gleitfläche erzwungen. Die Prüffläche kann während des Versuchs konstant bleiben oder abnehmen. Weitere Angaben zur Geräteausbildung sind in DIN EN ISO 12957-1 und DIN 18137-3 enthalten.

Für Prüfungen nach dieser Empfehlung sind nur die in der DIN 18137-3 angegebenen Geräteausbildungen geeignet. Feste obere Rahmen können zu unkontrollierbaren Zwängungsspannungen führen [STOEWAHSE, 2001].

Die Nennreibungsfläche des Rahmenschergeräts soll mindestens 900 cm<sup>2</sup> betragen. Das Standardgerät hat eine konstant bleibende quadratische Nennreibungsfläche von rund 30 cm x 30 cm. Bei nicht oder sehr fein strukturierten Geokunststoffen und feinkörnigen Erdstoffen (siehe auch Abschnitt 3) können Geräte mit kleinerer Nennreibungsfläche ausreichend sein. Die Geräte dürfen jedoch eine Nennreibungsfläche von rd. 100 cm<sup>2</sup> nicht unterschreiten. Wenn Untersuchungen mit sehr großen Normalspannungen durchzuführen sind, die in Standardgeräten aus gerätetechnischen Gründen nicht möglich sind, dürfen hilfsweise Geräte mit kleineren Nennreibungsflächen benutzt werden. Die Eignung dieser Geräte mit kleineren Reibungsflächen ist durch vergleichende Untersuchungen im niedrigen Lastbereich vorab nachzuweisen.

Im Standardgerät mit konstant bleibender Reibungsfläche soll die Länge des unteren Rahmens bzw. der Unterlage mindestens das 1,3-fache der Länge des oberen Rahmens betragen ( $\geq 390$  mm). Der maximal verfügbare Vorschubweg soll mindestens 1/5 der Länge der Nennreibungsfläche betragen ( $\geq 60$  mm).

Der Vorschub des beweglichen Rahmens wird über einen Motor mit Getriebe erzeugt. Die Auflast bzw. Normalkraft kann beispielsweise über ein Hebelsystem mit Gewichten, über einen Druckstempel oder über ein Druckkissen aufgebracht werden. Letzteres begünstigt eine gleichmäßige Verteilung der Normalspannung. Das verwendete System ist zu kalibrieren. Die Lastabtragung im System ist je nach Prüfgerät und Versuchsaufbau unterschiedlich. Zur Überprüfung der Lastabtragung und der Spannungsverteilung in der zu untersuchenden Schichtgrenze können Kalibrierversuche mit zusätzlichen Messeinrichtungen, z.B. Druckaufnehmern, erforderlich werden, um z.B. Mantelreibungseffekte an den Innenseiten der Rahmenwände zu erfassen und zu berücksichtigen. Es ist anzustreben, die aufgebrachte Normalspannung in der Höhe der Scherfuge mit Druckmessdosen zu überprüfen bzw. einzustellen.

Von den Messgrößen Normalspannung bzw. Normalkraft, Schubspannung bzw. Reibungskraft, Verschiebungsweg und Vertikalverformung (Setzung bzw. Hebung)

des Prüfkörpers werden in der Regel die Normalspannung bzw. die Normalkraft und eine konstante Vorschubgeschwindigkeit vorgegeben. Aus der Vorschubgeschwindigkeit kann der Verschiebungsweg abhängig von der Zeit ermittelt werden. Die Reibungskraft wird mit einem Kraftaufnehmer gemessen. Bei der Ermittlung der Reibungsspannung muss die Gerätereibung (Lagerreibung) berücksichtigt werden. Hierzu sind gerätespezifisch Kalibrierversuche durchzuführen. Auf die Messung der Setzung bzw. Hebung des Prüfkörpers abhängig vom Verschiebungsweg kann verzichtet werden, wenn Dickenänderungen des Prüfsystems abhängig vom Verschiebungsweg vernachlässigbar klein sind, z.B. bei Reibungsversuchen zwischen steifen Geokunststoffen.

## **5 Versuchsrandbedingungen und Versuchsdurchführung**

### **5.1 Allgemeines**

Es sind mindestens drei Einzelprüfungen mit unterschiedlichen Normalspannungen durchzuführen. In der Regel sollen die Angleichung der Messproben und die Prüfung bei Normalklima gemäß ISO 554 erfolgen, d.h. bei einer Temperatur von  $20 \pm 2$  °C und bei einer relativen Luftfeuchte von  $65 \% \pm 2 \%$ . In Einzelfällen ist die Untersuchung bei höheren Temperaturen erforderlich. Dies kann in situ beispielsweise bei Böschungen mit starker Sonneneinwirkung oder bei Deponaten, die aufgrund von biologischen Abbauprozessen oder chemischen Reaktionen das Dichtungssystem mit höheren Temperaturen beanspruchen, der Fall sein. Von den Projektverantwortlichen ist dies zu prüfen, und es sind ggf. Untersuchungen bei entsprechend erhöhter Temperatur zu veranlassen und zu bewerten. Der im Versuch gewählte Normalspannungsbereich muss die im Bauwerk auftretenden Normalspannungen enthalten.

Der im Reibungsversuch untersuchte Schichtenaufbau und die Versuchsrandbedingungen sind den im Bauwerk zu erwartenden Randbedingungen anzupassen. Wenn im Bauwerk eine Durchfeuchtung der Schichtgrenze zu erwarten oder prinzipiell möglich ist, welche die übertragbaren Reibungsspannungen in der Schichtgrenze reduzieren, wie beispielsweise bei einer glatten Kunststoffdichtungsbahn im Kontakt mit einem Geokunststoff, sind die Reibungsversuche unter Wasser durchzuführen. Wenn in situ zunächst kein Wasser in der betrachteten Schichtgrenze zu erwarten ist, und wenn die Wassereinwirkung zu höheren übertragbaren Reibungsspannungen führt als ohne Wasser, muss auch die Prüfung ohne Wasser erfolgen. Dies kann beispielsweise bei Kunststoffdichtungsbahnen mit einer Oberflächenstruktur im Kontakt mit einem Vliesstoff der Fall sein. Entsprechende Angaben sind vom Auftraggeber in Abstimmung mit dem Entwurfsbearbeiter gegenüber der Prüfinstitution zu machen.

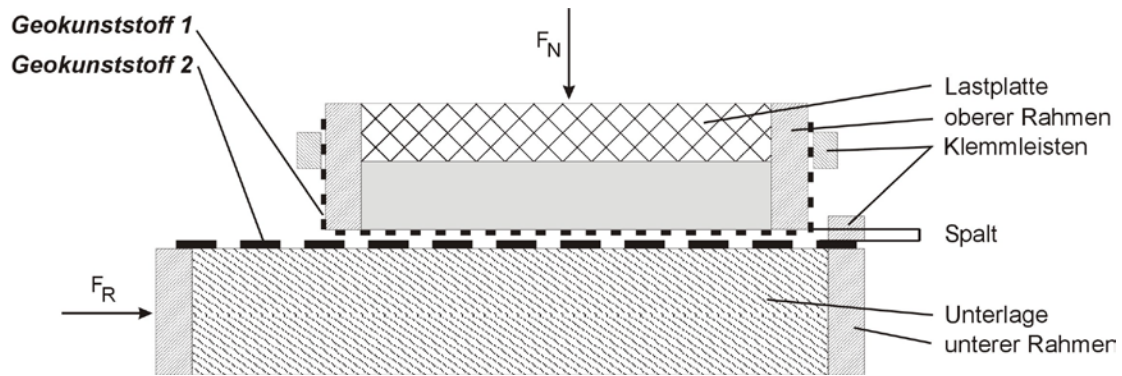


Bild 3-8.1: Versuchsaufbau für die Prüfung des Reibungsverhaltens zwischen zwei Geokunststoffen

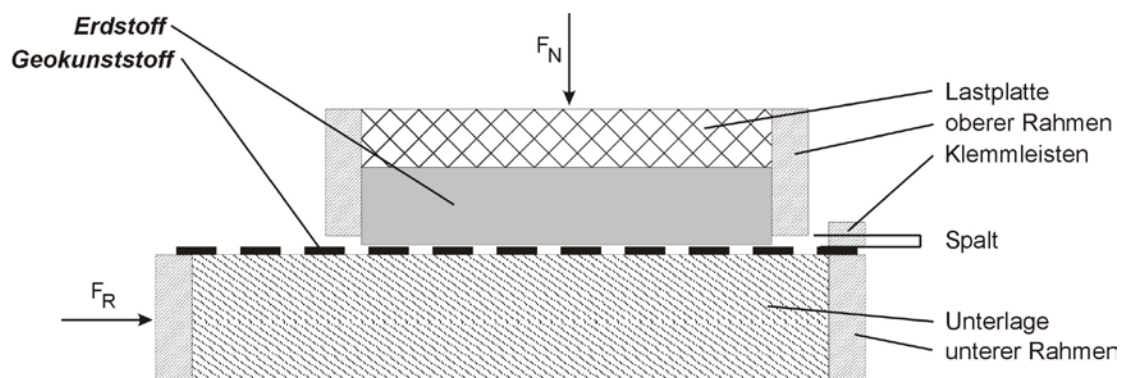


Bild 3-8.2: Versuchsaufbau für die Prüfung des Reibungsverhaltens zwischen Geokunststoffen und Erdstoffen

Die Bilder 3-8.1 und 3-8.2 zeigen Prinzipskizzen empfohlener Versuchsaufbauten für die Prüfung des Reibungsverhaltens zwischen zwei Geokunststoffen sowie zwischen Geokunststoffen und Erdstoffen.

## 5.2 Spalteinstellung

Die maximale Höhe des Spalts wird durch die verwendeten Stoffe bestimmt. Die Prüffläche muss sich im Spalt befinden. Der Spalt darf nicht so groß sein, dass die Gleitfläche beispielsweise in den angrenzenden Erdstoff verlagert werden kann. Sind am unteren Rahmen Geokunststoffe befestigt, so ist die lastabhängige Zusammendrückung der Geokunststoffe bei der Spalteinstellung zu berücksichtigen. Der Spalt darf jedoch auch nicht so klein sein, dass am oberen Rahmen befestigte Geokunststoffe zwischen den Rahmenwänden gezwängt werden.

Angaben zur Spalthöhe im Prüfbericht müssen eindeutig sein. Für Schichtgrenzen zwischen Erdstoff und Geokunststoff ist z.B. der Abstand zwischen der Unterkante des oberen Rahmens und einem definierten Oberflächenpunkt des Geokunststoffs anzugeben.

## 5.3 Einbau von Erdstoffen

Es wird empfohlen, die nach E 3-1 geprüften Erdstoffe in den oberen Rahmen

einzubauen. Der Erdstoffzustand im Versuch soll dem im Bauobjekt zu erwartenden Erdstoffzustand entsprechen. Zur Verminderung der Reibung zwischen Erdstoff und Rahmenwandung wird empfohlen, den Erdstoff in einer möglichst geringen Schichtdicke einzubauen und die Innenseiten der Rahmenwände zur Reibungsminderung mit einer Gleitschicht auszukleiden. Zur gleichmäßigen Verteilung der Reibungsspannung im Erdstoffkörper ist eine mit Zähnen oder Schneiden versehene Lastplatte oberhalb des Erdstoffs anzuordnen.

Bindige Erdstoffe sind mit den Werten der Feuchtdichte und des Wassergehaltes, die für den Einbau- und Endzustand maßgebend sind, in das Versuchsgerät einzubauen. Basierend auf den Angaben gemäß E 3-1 über zulässige Bereiche des Wassergehaltes und der Feuchtdichte im Einbauzustand, ist der Erdstoff mit den für die Reibung ungünstigeren Werten einzubauen. Wenn der Erdstoff in situ mit einem auf der trockenen Seite der Proctorkurve liegenden Wassergehalt eingebaut werden soll, sind im Falle mit strukturierten Kunststoffdichtungsbahnen als Kontaktpartner zum Erdstoff auch Versuche bei diesem Wassergehalt erforderlich, da sich eine kleinere Reibung als im feuchteren Erdstoffzustand ergeben kann. Bindige Erdstoffe sind mindestens 24 Stunden vor der Prüfung auf den vorgegebenen Wassergehalt einzustellen. Beim Einbau in das Prüfgerät ist der Wassergehalt zu überprüfen.

Bei Reibungsversuchen für die Schichtgrenze zwischen bindigen Erdstoffen und Geokunststoffen dürfen bindige Erdstoffe nicht auf Geokunststoffen verdichtet werden, da die infolge der Verdichtung in der Schichtgrenze wirkenden Spannungen die Prüfspannungen überschreiten können. Der Erdstoff ist für derartige Untersuchungen außerhalb des Geräts auf einer starren Unterlage zu verdichten.

Besteht die Möglichkeit, dass im bindigen Boden an der Schichtgrenze zum Geokunststoff Aufweichungs- und Entfestigungseffekte auftreten, z.B. infolge von Wasserzutritt unter geringen Auflasten, müssen die Prüfbedingungen dies berücksichtigen. Diesem kann z.B. durch eine längere Standzeit vor dem Versuchsbeginn oder durch einen von vornherein größer gewählten Wassergehalt im Versuch Rechnung getragen werden.

Nichtbindige Erdstoffe sind mit der Trockendichte, die sie im Einbau- und Endzustand aufweisen sollen, in das Versuchsgerät einzubauen.

## **5.4 Befestigung von Geokunststoffen**

### **5.4.1 Geokunststoffe am unteren Rahmen**

Als Auflager für Geokunststoffe ist in der Regel eine starre Unterlage zu wählen. Geokunststoffe sind auf der Unterlage so zu befestigen, dass sie sich durch die auftretenden Reibungskräfte nicht dehnen. Schubverformungen der Geokunststoffe sind durch eine zusätzliche Randeinspannung an der im Versuch in Verschiebungsrichtung des unteren Rahmens weisenden Seite einzuschränken.

Die Art der Befestigung richtet sich nach dem jeweiligen Geokunststoff und dem

Prüfgerät. Als Befestigungsmittel für Geokunststoffe auf der Unterlage sind beispielsweise doppelseitige Klebefolien, Klettklebebänder, Klebstoffe, Nagelplatten und raue Unterlagen aus Sandpapier geeignet. Bei dünnen Geotextilien ist darauf zu achten, dass die Oberflächenstrukturen der Unterlage (z.B. Nägel einer Nagelplatte) nicht die Eigenschaften der Prüfseite des Geotextils beeinflussen. Der Klebstoff darf nicht in die zu prüfenden Materialien eindringen und deren Eigenschaften verändern. Bei Versagen der Befestigung des Geokunststoffs auf der Unterlage ist die Versuchsreihe mit einer verbesserten Befestigungstechnik zu wiederholen. Für eine flächige schubfeste Fixierung von Kunststoffdichtungsbahnen eignen sich auch starre Platten mit einer darüber aufgeklebten rd. 3 mm dicken Elastomerplatte der Härte  $50 \pm 5$  Shore A.

Werden in Sonderfällen Unterlagen aus Erdstoff verwendet, muss die Lage der Wirkungslinie der Reibungskraft in der Fläche zwischen den zu untersuchenden Materialien auch bei Zusammendrückung der Unterlage gewährleistet bleiben. Die Spannungen infolge der Reibung dürfen im Erdstoff der Unterlage keine nennenswerten Verformungen hervorrufen. Bei Verwendung von Erdstoff als Unterlage in Prüfeinrichtungen mit konstanter Reibungsfläche sind Zugrisse in der Unterlage bzw. Aufwölbungen und damit verbundene "Erdwiderstände vor Kopf" ein Indiz für unzulässige Verformungen und Bruchvorgänge im Erdstoff.

#### 5.4.2 Geokunststoffe am oberen Rahmen

Die Geokunststoffe sind einseitig am oberen Rahmen mit einer Klemmleiste quer zur Verschiebungsrichtung zu befestigen, so dass bei gegenseitiger Verschiebung der beiden Rahmen die resultierende Reibungskraft des oberen Geokunststoffes als Zugkraft in den Rahmen übertragen werden kann. Darüber ist das im Bauwerk vorgesehene Material in den oberen Rahmen einzubauen. Dieses ist insbesondere dann notwendig, wenn durch den Einfluss dieses "benachbarten Materials" mechanische Adhäsion infolge von Formschlusseffekten etc. zwischen den zu prüfenden Stoffen zu erwarten sind. Liegen keine Angaben über das "benachbarte Material" vor, oder werden diese Formschlusseffekte als unbedeutend eingestuft, so ist oberhalb des Geokunststoffs eine Schicht aus Normsand gemäß DIN EN 196-1 oder eine relativ starre Platte mit den in Abschn. 5.4.1 genannten Befestigungsmitteln in den oberen Rahmen einzubauen.

### 5.5 Konsolidierung und Vorbelastungszeit

Rahmenschergeräte eignen sich vorzugsweise zur Untersuchung dräniertes Zustände von Erdstoffen. Die Reibungsparameter  $\delta$  und  $a$  können daher nur durch konsolidierte, dränierte Versuche bestimmt werden. Die undränierte Scherfestigkeit von Erdstoffen oder auch die undränierte Reibungsfestigkeit von Geokunststoff-Erdstoff-Systemen können im Rahmenscherversuch nicht oder nur unzureichend erfasst werden. Bei bindigen Erdstoffen müssen infolge der Normalspannungen auftretende Porenwasserüberdruckspannungen vor Beginn des Vorschubs abgeklungen sein. Bei überverdichteten bindigen Erdstoffen müssen Quellvorgänge abgeschlossen sein.



Das Ende der Konsolidierung oder Quellung wird in der Regel durch Messungen der Vertikalverformung bestimmt. Bei Reibungsversuchen für die Schichtgrenze zwischen bindigen Erdstoffen und Kunststoffdichtungsbahnen ist zu beachten, dass der Konsolidierungsvorgang bei einseitiger Entwässerung des Erdstoffs mehrere Tage in Anspruch nehmen kann.

Bei Reibungsversuchen für die Schichtgrenze zwischen zwei Geokunststoffen und zwischen nichtbindigen Erdstoffen und Geokunststoffen wird eine Vorbelastungszeit von 15 Minuten empfohlen.

Geosynthetische Tondichtungsbahnen sind vor Beginn des Vorschubs 24 Stunden vorzuquellen, wobei die vom Hersteller für den Quellvorgang vorgegebene Mindestauflast zu berücksichtigen ist. Es wird empfohlen, Reibungsversuche mit geosynthetischen Tondichtungsbahnen unter Wasser durchzuführen. Weitere Angaben zur Untersuchung der inneren Scherfestigkeit und der Kontaktscherfestigkeit von Bentonitmatten (geosynthetischen Tondichtungsbahnen) enthält Abschnitt 6.3 der Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen (EAG-GTD).

## 5.6 Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeiten müssen so gewählt werden, dass keine das Ergebnis beeinflussenden Porenwasserüberdrücke auftreten. Die Vorschubgeschwindigkeit, bei der noch kein Porenwasserüberdruck auftritt, ist abhängig vom Erdstoff, den Abmessungen der Probekörper, dem zu prüfenden Geokunststoff-Erdstoff-System und den Entwässerungsbedingungen im Gerät.

Folgende Richtwerte für Vorschubgeschwindigkeiten werden abhängig von den Reibparametern empfohlen:

- |  |                          |
|--|--------------------------|
| - Geokunststoff – Geokunststoff:               | $v = 10$ bis $60$ mm/h   |
| - Geokunststoff – nichtbindiger Erdstoff:      | $v = 10$ bis $60$ mm/h   |
| - Geotextil – bindiger Erdstoff:               | $v = 10$ mm/h            |
| - Kunststoffdichtungsbahn – bindiger Erdstoff: | $v = 0,3$ bis $1,0$ mm/h |

Für Sonderfragen (z.B. Bauzustände, plötzliche Belastungen, aufgeprägte Verformungen) können zur Erfassung teildränkter Zustände bei bindigen Erdstoffen auch Versuche mit größeren Vorschubgeschwindigkeiten notwendig werden.

## 5.7 Versuchsende

Der Versuch kann beendet werden, wenn die Reibungsspannung bei weiter zunehmendem Verschiebungsweg konstant bleibt (Gleitzustand). Eine auch nach größeren Verschiebungswegen weiter ansteigende Reibungsspannung kann ein Indiz für versuchstechnische Mängel sein. Es sind in diesen Fällen weitere Versuche unter Wiederholbedingungen durchzuführen und die Ergebnisse vergleichend zu

analysieren; ggf. ist der Versuchsaufbau zu modifizieren.

Sofern sichtbare Materialveränderungen eingetreten sind, ist der Zustand der Geokunststoffe nach dem Ausbau der Probekörper aus dem Prüfgerät visuell, ggf. auch unter einem Mikroskop, zu untersuchen und fotografisch zu dokumentieren.

## 6 Auswertung

Die Reibungsspannung  $\tau$  wird für jeden Teilversuch abhängig vom Verschiebungsweg  $s$  aufgetragen. Aus dieser Auftragung können die Reibungsspannungen im Bruchzustand  $\tau_f$  und im Gleitzustand  $\tau_r$  ermittelt werden. Falls die Reibungsspannungs-Verschiebungsweglinien keinen Bruchzustand erkennen lassen und die Reibungsspannungen auch mit zunehmendem Verschiebungsweg keinen konstanten Wert annehmen, sind für weitere Auswertungen Messwerte der Reibungsspannungen bei Verschiebungswegen anzusetzen, die unter Beachtung der Bauwerksverträglichkeit ausgewählt wurden. Zur Ermittlung der Reibungsspannung  $\tau$  und der Normalspannung  $\sigma$  ist die Nennreibungsfläche  $A$  anzusetzen. Die Reibungsspannung  $\tau$  ergibt sich aus der Messgröße Reibungskraft  $F_R$ , abzüglich eventueller Gerätereibung, dividiert durch die Nennreibungsfläche  $A$ . Sofern keine verfeinerten Kenntnisse über die Lastabtragung und Spannungsverteilung im System vorliegen (siehe auch Abschnitt 4), wird für die Auswertung als Normalspannung die auf die Nennreibungsfläche  $A$  bezogene aufgebrauchte Normalkraft  $F_N$  angesetzt.

Zur Ermittlung der Reibungsparameter werden die Reibungsspannungen im Bruchzustand  $\tau_f$  und im Gleitzustand  $\tau_r$  gegenüber den zugehörigen Normalspannungen  $\sigma$  aufgetragen. Die Reibungsparameter Adhäsion  $a_f$  und/oder  $a_r$  sowie Reibungswinkel  $\delta_f$  und/oder  $\delta_r$  für den Bruch- und/oder den Gleitzustand bzw. für ausgewählte Verschiebungswege analog zur Coulomb'schen Grenzbedingung können nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden (Bilder 3-8.3 und 3-8.4). Der Korrelationskoeffizient ist anzugeben. Bei nichtlinearem Zusammenhang zwischen  $\tau$  und  $\sigma$  kann der Ansatz der linearen Coulomb'schen Grenzbedingung zu große Werte für die Adhäsion ergeben. Wenn sich im Falle der Wahl der linearen Grenzzustandsgleichung rechnerisch ein negativer Adhäsionswert ergibt, darf dieser nicht vernachlässigt, also zu Null gesetzt werden, da hierdurch die Reibungsfestigkeit überschätzt wird. Die Parameter Reibungswinkel und Adhäsion sind daher immer im Zusammenhang zu betrachten, ggf. kann als Grenzbedingung ein mehrparametriger oder ein abschnittsweise linearer Ansatz gewählt werden.

Es kann auch zweckmäßig sein, an Stelle von Versuchen mit unterschiedlichen Normalspannungen, mehrere Versuche mit der im Bauwerk auftretenden Normalspannung durchzuführen und daraus die Winkel der Gesamtreibungsfestigkeit (Ersatzreibungswinkel, Bild 3-8.5) im Bruchzustand  $\delta_{sf}$  und im Gleitzustand  $\delta_{sr}$  zu ermitteln [BLÜMEL, W. & HEINEMANN, M., 2004]. Dabei sind folgende Bedingungen einzuhalten:

- Anwendung nur für die Reibung zwischen Geokunststoffen
- Durchführung von 3 Versuchen mit der in situ wirkenden Normalspannung und von jeweils einem weiteren Versuch mit einer kleineren und einer größeren Normalspannung. Für den Fall der Ermittlung des Winkels der Gesamtreibungsfestigkeit zusätzlich bzw. nachträglich zu einer bereits durchgeführten Reibungsuntersuchung mit drei unterschiedlichen Normalspannungen sind 2 weitere Einzelversuche mit der in situ maßgebenden Normalspannung ausreichend,
- Beschränkung der Vorgehensweise auf Normalspannungen bis 60 kPa

Bei dieser Vorgehensweise kommt es besonders darauf an, dass die Versuchsrandbedingungen möglichst genau auf die Gegebenheiten im Bau- und Betriebszustand abgestimmt werden.

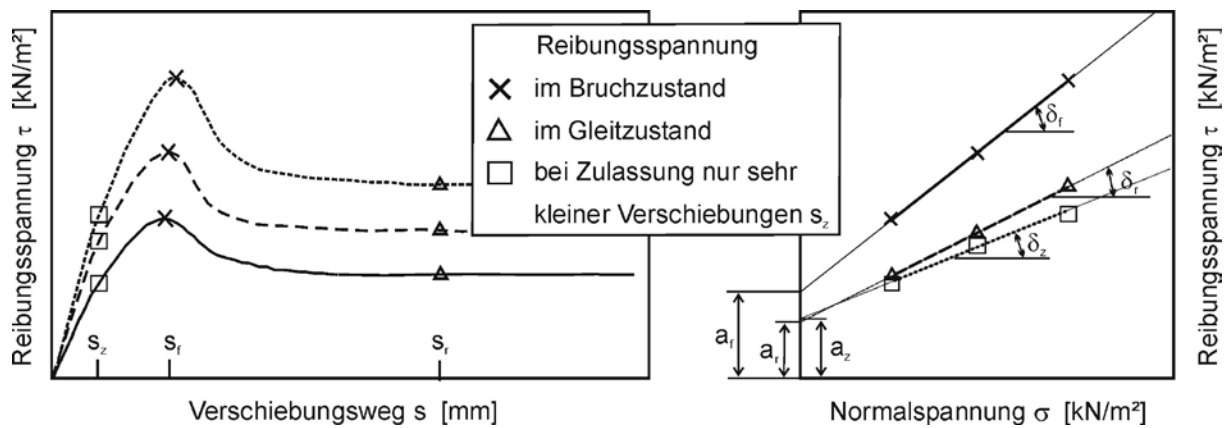


Bild 3-8.3: Reibungsspannungs-Verschiebungsweglinien und Grenzbedingungen für den Bruch- und den Gleitzustand

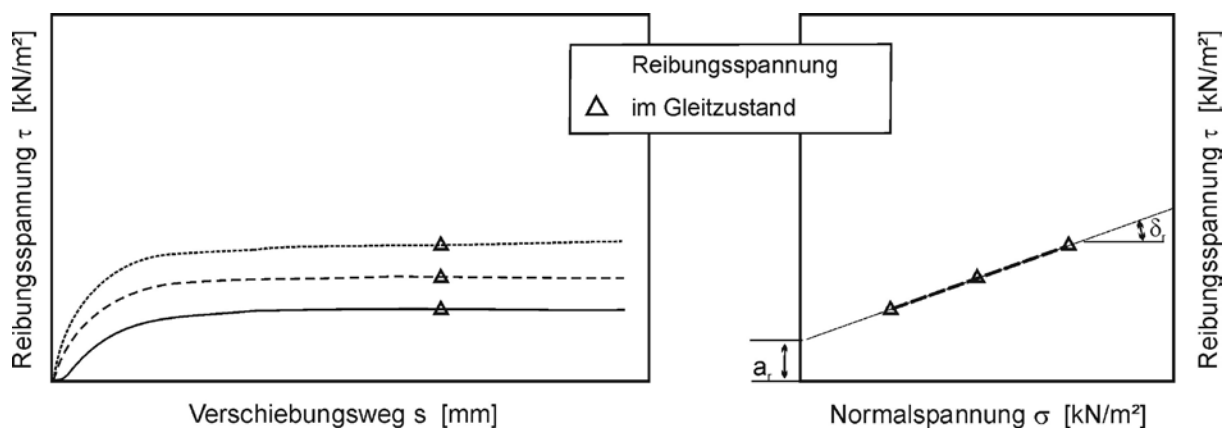


Bild 3-8.4: Reibungsspannungs-Verschiebungsweglinien und Grenzbedingungen für den Gleitzustand

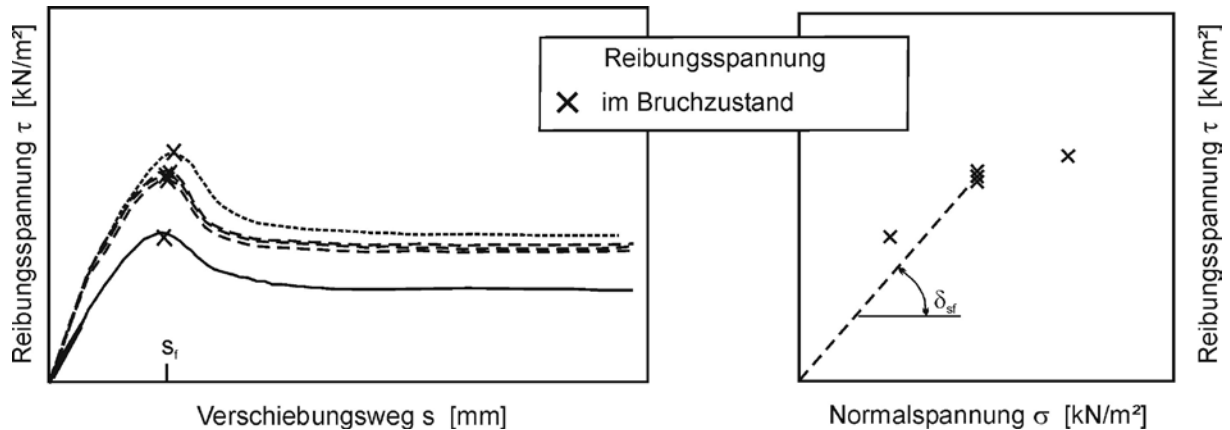


Bild 3-8.5: Reibungsspannungs-Verschiebungsweglinien und Grenzbedingung im Bruchzustand für eine Normalspannung (Ersatzreibungswinkel)

## 7 Prüfbericht

Zur vollständigen Darstellung der Versuchsergebnisse im Prüfbericht gehören folgende Angaben:

- Auftraggeber
- Art und Bezeichnung der geprüften Materialien (vgl. Abschnitt 3)
- Prüfgerät und Anordnung des Prüfsystems (mit Prinzipskizzen), Art der Reibungsfläche, Reibungsrichtung und Prüfkörpermaße sowie weitere Versuchsrandbedingungen (Temperatur etc.)
- Einbauverfahren der Geokunststoffe und hierfür relevante Eigenschaften der Geokunststoffe
- Einbauverfahren der Erdstoffe sowie Einbauparameter und Körnung der Erdstoffe
- Konsolidationszeiten, Normalspannungen und Vorschubgeschwindigkeiten
- Verfahren zur Erfassung der Messwerte der Kräfte, Spannungen, Verschiebungen und Verformungen
- Messwerte der Einzelversuche im  $\tau$ - $s$ -Diagramm mit Eintragung der gewählten Bruch- und/oder Gleitwerte
- Bruch- und/oder Gleitwerte mit den zugehörigen Grenzbedingungen für den Bruch und/oder für den Gleitzustand im  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm
- Reibungsparameter im Bruchzustand ( $a_f$ ,  $\delta_f$ ) und/oder im Gleitzustand ( $a_r$ ,  $\delta_r$ ) bei ausgewählten Verschiebungen einschl. Korrelationskoeffizienten
- Oberflächen- oder Strukturveränderungen der Geokunststoffe wie Materialabrieb bei Kunststoffdichtungsbahnen, Umlagerung von Fasern bei Geotextilien und Erdstoffrückstände am Geokunststoff (ggf. mit Fotos, Skizzen oder Probenmustern)
- Besondere Beobachtungen während des Versuchs und nach Versuchsende, beispielsweise zur Verlagerung der Gleitfläche in den Erdstoff
- ggf. Bewertung der Versuchsergebnisse und Hinweise zu deren Verwendung

## 8 Bewertung und Verwendung der Versuchsergebnisse

Der Entwurf von Ingenieurbauten mit Geokunststoffen erfordert unter anderem geotechnische Modellbildungen (mit vereinfachter Geometrie, Schichtung des Baugrunds, Struktur des Systems etc.) und rechnerische Standsicherheitsnachweise nach erdstatischen Methoden. Vor der endgültigen Festlegung von Bemessungswerten nach GDA E 2-7 ist vom geotechnischen Entwurfsbearbeiter zu prüfen, wie die Ergebnisse der Reibungsversuche auf den Anwendungsfall zu übertragen sind. Es ist u. a. auf folgende Punkte zu achten:

- Besonders bei nichtlinearen Zusammenhängen zwischen Reibungsspannungen und Normalspannungen sind die für die einzelnen Bauzustände und den Endzustand maßgebenden Auflasten im Versuch sorgfältig zusammenzustellen und die Prüflasten darauf abzustimmen.
- Reibungsparameter sind verschiebungsabhängig. Die notwendigen Verschiebungen zur Aktivierung der Reibungswiderstände müssen mit dem System verträglich sein.
- Es sind alle kritischen Fälle zu erfassen, indem die möglichen Belastungsfälle, Bauzustände, Materialveränderungen etc. analysiert werden. Wenn beispielsweise bindige Erdstoffschichten im Bereich der Schichtgrenze durch Wasserkontakt aufweichen können, muss dieser Fall im Versuch erfasst oder die Rechen- und Bemessungswerte müssen auf geeignete Weise abgemindert werden.

Zur Interpretation der Prüfergebnisse im Hinblick auf den Anwendungsfall sind ggf. Rücksprachen des Entwurfsbearbeiters und des Sachverständigen für Geotechnik mit den Prüfinstitutionen erforderlich.

Der Entwurfsbearbeiter und der Sachverständige für Geotechnik entscheiden unter Berücksichtigung der Konstruktion des Bauwerks, der zulässigen Größe von Verformungen des Bauwerks sowie der zulässigen Relativverschiebungen von Bauelementen im Gebrauchszustand und der möglichen Verschiebungen im Grenzzustand, für welche erdstatischen Berechnungen von den Bruchwerten der Reibungsparameter ausgegangen werden darf, in welchen Fällen von den Gleitwerten der Reibungsparameter ausgegangen werden muss oder ob Zwischenwerte gewählt werden dürfen.

Bei Geokunststoffen können über sehr lange Zeiträume Materialveränderungen (Alterungseffekte) eintreten. Damit können auch Veränderungen der mechanischen Eigenschaften verbunden sein, die durch Abminderungsfaktoren berücksichtigt werden können. Gegebenenfalls muss durch geeignete Kontrollen die Funktionstüchtigkeit der betreffenden Materialien in regelmäßigen Abständen überprüft werden. Art und Umfang der Kontrollen sowie ein Konzept eventuell erforderlicher Sicherungs- und Reparaturmaßnahmen sind von den zuständigen Behörden abhängig vom Bauwerk und den möglichen Gefährdungen festzulegen.

Wenn abhängig von der Zeit mit spannungsbedingten Materialentfestigungen,

Kriechverformungen, dem Auftreten von Porenwasserüberdruckspannungen oder ähnlichen Vorgängen in bindigen Erdstoffen zu rechnen ist, darf nur von reduzierten Werten für den Gleitzustand ausgegangen werden, analog zu den in der Boden- und Felsmechanik verwendeten Werten der Restscherfestigkeit.

Von dem für die Standsicherheit verantwortlichen geotechnischen Sachverständigen sind auf der Basis der Versuchswerte die charakteristischen Werte  $a_k$  und  $\delta_k$  festzulegen. Hierzu sowie zum generellen Vorgehen beim Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen wird auf die GDA Empfehlung 2-7 hingewiesen.

## Literatur

BLÜMEL, W. & HEINEMANN, M., 2004: Zur Berücksichtigung von Adhäsion In Standsicherheitsnachweisen für geneigte Oberflächenabdichtungen mit Geokunststoffen. Fachtagung "Die sichere Deponie", Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (Hrsg.), Würzburg

STOEWAHSE, C., 2001: Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen und Erdstoffen im Rahmenschergerät. Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover, Heft 57

## Regelwerke:

DIN EN 196-1:2005-05: Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit

DIN 18137-1:2010-07: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 1: Begriffe u. grunds. Versuchsbedingungen

DIN 18137-2:2011-04: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 2: Triaxialversuch

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

DIN EN ISO 12957-1:2005: Geokunststoffe - Bestimmung der Reibungseigenschaften - Teil 1: Scherkastenversuch

DIN EN ISO 12957-2:2005: Geokunststoffe - Bestimmung der Reibungseigenschaften - Teil 2: Schiefe-Ebene-Versuch

DIN EN ISO 14688-1:2013-12: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1:

### Benennung und Beschreibung

EAG-GTD, 2002: Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen. DGGT e.V. (Hrsg.), Ernst & Sohn Verlag Berlin

Ansprechpartner: Univ. Prof. Dr. Ing. Karl Josef Witt  
Bauhaus-Universität Weimar  
Coudraystr. 11c  
99425 Weimar  
E-mail: [kj.witt@uni-weimar.de](mailto:kj.witt@uni-weimar.de)

Bearbeiter: M. Heinemann, Hannover  
K. J. Witt, Weimar