

H Zur Berücksichtigung von Adhäsion in Standortsicherheitsnachweisen für geneig- te Oberflächenabdichtungen mit Geo- kunststoffen

Prof. Dr.-Ing. Werner Blümel,
Dipl.-Ing. Maik Heinemann, Hannover

1 Einleitung und Grundlagen

Im Zuge der Sicherung und Stilllegung von Deponien sind Abdichtungen ihrer Oberfläche auch auf Böschungen dauerhaft dicht und standsicher herzustellen. Hohe Böschungen sind häufig bei Hügel- und Hangdeponien vorhanden. Diese Böschungen sind bei Einlagerung scherfesten Abfalls zwecks Erhöhung der Deponiekapazität relativ steil hergestellt worden (Abb.1). Neigungen von etwa 1 : 2, also Böschungswinkel in der Größenordnung von 25° bis 30° sind keine Seltenheit. Die Neigung des Abdichtungssystems entspricht in der Regel der Neigung der Abfallböschung, sofern keine Umprofilierung vorgenommen wird. Damit das aus mehreren Schichten bestehende System der Oberflächenabdichtung auf steilen Böschungen nicht abrutscht, müssen die als Komponenten verwendeten Erdstoffe und Geokunststoffe eine entsprechend hohe innere Scherfestigkeit aufweisen. Zudem muss in den Kontaktflächen zwischen den verschiedenen Dichtungskomponenten im Einbauzustand eine ausreichende Haftreibung vorhanden sein. Diese Haftreibung wird auch als Kontaktscherfestigkeit bezeichnet.

Der Nachweis der Standsicherheit gegen Böschungsbruch ist in DIN 4084 in Verbindung mit DIN 1054 geregelt. Der Nachweis gegen Gleiten der Abdichtungsschichten kann als Sonderfall mit annähernd ebenen Gleitflächen eingestuft werden. Bei Böschungsbruchuntersuchungen ist prinzipiell eine vollständige Variation möglicher Gleitflächen erforderlich, die im Querschnitt als kreisförmige, ebene oder gebrochene Gleitfugen abgebildet werden können, um die Fläche mit der kleinsten Sicherheit zu finden. Im Sinne mechanischer Prinzipien wird also der Bruch- und Gleitmechanismus gesucht, dessen Aktivierung ein Minimum an Reibungsarbeit erfordert, denn genau diesen "wählt sich die Natur" in situ im Versagensfall. Da in der Regel die innere Scherfestigkeit der Stoffe, aus denen das Abdichtungssystem aufgebaut ist, größer ist als deren Kontaktscherfestigkeit untereinander, kann man den Nachweis der Standsicherheit gegen Böschungsbruch einer aus Erd- und Geokunststoffschichten bestehenden Oberflächenabdichtung meist auf den Nachweis der Sicherheit gegen Gleiten in den Schichtgrenzen beschränken. Bei Neigung der Schichten parallel zur Böschungsneigung ist der Böschungswinkel somit ein Bezugswert für den mit ausreichender Sicherheit nachzuweisenden Reibungswinkel, wenn man das Problem vereinfachend auf die mechanische Haft- und Gleitreibung reduziert und sonstige Wirkungen zwischen den im Kontakt befindlichen Stoffen vernachlässigt.

Zum besseren Verständnis des vorliegenden geotechnischen Problems können Grundlagen aus der Reibungs- und Kontaktmechanik, der sogenannten Tribologie, beitragen (Abb. 2 und 3). Der Reibungsvorgang wird vor allem durch die Grenzflächen der Reibpartner, die Zwischen- und Umgebungstoffe - beispielsweise Luft, Wasser oder Schmiermittel - sowie die

Einwirkungen bestimmt. Einwirkungen sind statische und zeitweise auch dynamische Druck- und Schubkräfte, die bei geneigten Oberflächenabdichtungen überwiegend durch die Gravitation, aber auch durch Wasserströmungen und Baugeräte bedingt sind. Die Druck- und Schubkräfte werden in der Bodenmechanik meist auf die gesamte ideelle Kontaktfläche bezogen und als mittlere Druck- und Schubspannung angegeben. Die tatsächliche Kontaktfläche ist jedoch kleiner. Vorhanden ist in einer beispielsweise rechteckigen Fläche eine Vielzahl von unterschiedlich ausgebildeten Mikrokontakten. An diesen Kontaktstellen finden infolge der Einwirkungen und der Art der Reibpartner sowie ihrer im Kontaktbereich vorhandenen Oberflächen unterschiedliche mechanische Vorgänge statt, von denen die wichtigsten in Abb. 3 schematisiert dargestellt worden sind. Neben elastischen und plastischen Deformationen einschließlich der Bildungen von Furchen und Riefen kann auch Adhäsion auftreten. An einer Adhäsionskontaktstelle bewirkt eine Verschiebung der Reibpartner gegeneinander zunächst eine Verzerrung bzw. Scherung der angrenzenden Stoffelemente bevor der Bruch eintritt und die Reibpartner aufeinander gleiten.

Dem Begriff Adhäsion wird in der Werkstoffkunde häufig nicht nur die spezifische oder thermodynamische Adhäsion zugeordnet, die im wesentlichen durch elektrochemische Anziehungskräfte zwischen den in Kontakt befindlichen Materialien A und B bewirkt wird, sondern auch die sogenannte mechanische Adhäsion, mit der Verankerungs- und Formschlusseffekte erfasst werden sollen, die dann entstehen, wenn zum Beispiel Material A in Material B punktuell eindringt.

2 Experimentelle Untersuchung und rechnerische Modellierung

Die Kontaktscherfestigkeit bzw. Reibung zwischen ausgewählten Erdstoffen und Geokunststoffen eines Dichtungssystems kann nur im Experiment ermittelt werden. Im Labor können hierzu Rahmenscherversuche oder „Schiefe-Ebene-Versuche“ mit Kipptischen durchgeführt werden, wobei letztere nur die Bruchfestigkeit zuverlässig erfassen. Die Kontaktfläche sollte möglichst groß gewählt werden. Bei der experimentellen Untersuchung sind die in Abb. 1 genannten Normen und Empfehlungen, insbesondere die GDA-Empfehlung E 3-8 zu beachten. Letztere enthält detaillierte Angaben zur Versuchsdurchführung, zur Auswertung der Messdaten und zur Ableitung von Rechenwerten der Parameter für Standsicherheitsnachweise. Abb. 4 zeigt einen möglichen Versuchsaufbau für einen Versuch im Rahmenschergerät im Schnitt sowie Lichtbilder des Versuchsgärts mit Details zur Lagerung des oberen Rahmens. Dieser soll wie bei der Untersuchung der Scherfestigkeit von Erdstoffen während der Versuchsdurchführung vertikal verschiebbar gelagert sein, damit Zwängungskräfte und daraus resultierende fehlerhafte Versuchsergebnisse vermieden werden (s. DIN 18137, Teil

3, Ausgabe 2002-09, und STOEWAHSE [2001]). In Sonderfällen können auch Großversuche in situ mit speziell auf das Problem und die Gegebenheiten vor Ort abgestimmten Versuchseinrichtungen in Betracht kommen (s. z. B. KRUSE und SCHICKETANZ [2001]).

Als Ergebnisse von Rahmenscherversuchen mit Erd- und Geokunststoffen erhält man Reibungsspannungs-Verschiebungskurven, die im weiteren auch kurz τ -s-Kurven genannt werden. Aus deren Verlauf kann man erste Erkenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen den Reibpartnern gewinnen. Das Flächenintegral der τ -s-Kurve ist ein Maß für die geleistete Reibungsarbeit. Abb. 5 zeigt derartige Versuchskurven für vier unterschiedliche Materialkombinationen bei Normal- bzw. Auflastspannungen σ von 20, 40 und 60 kN/m², die für Oberflächenabdichtungssysteme relevant sind. Danach ergibt sich für den Kontakt zwischen einer glatten Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und Ton ein signifikanter Bruchwert (engl. peak) und bei verfeinerter Betrachtung der Messwerte ein relativ „glatter Verlauf“ der Kurven. Demgegenüber zeigen Reibpartner mit strukturierten Oberflächen einen prinzipiell anderen Kurvenverlauf, wobei der Gleitzustand erst nach größeren Verschiebungswegen und teilweise ohne ausgeprägt höhere Bruchfestigkeitswerte erreicht wird. Zudem zeigen sich bei detaillierter Betrachtung der kurvenbildenden Messpunkte, dass diese innerhalb kleiner Verschiebungsinkremente größere Streubreiten aufweisen können. Diese Feststellungen sind in Verbindung mit den einleitend erläuterten Mechanismen der Kontaktmechanik zu bewerten. Sie können Indizien dafür sein, dass neben der Reibung, die durch das einfache Reibungsgesetz mit nur einem Stoffparameter (Abb. 2) erfasst wird, auch thermodynamische und/oder mechanische Adhäsionseffekte sowie Formschlusseffekte wirksam sind.

Abb. 6 zeigt τ -s-Kurven für unterschiedliche Normalspannungen σ in schematisierter Form. In Anlehnung an die Vorgehensweise in der Bodenmechanik wurden kennzeichnende Werte von τ für den Bruch- und Gleitzustand sowie für einen ausgewählten konstanten Verschiebungsweg markiert. Der Zusammenhang zwischen τ und σ ist in einem weiteren Diagramm angegeben. Bei Annahme eines geradlinigen Zusammenhangs zwischen den veränderlichen Größen τ und σ , kann mit den Methoden der Ausgleichsrechnung ein Reibungsgesetz mit zwei Parametern formuliert werden, die Reibungswinkel α und Adhäsion a genannt werden. Die rechnerische Modellierung des Problems beschränkt sich somit auf die mathematische Beschreibung des Bruch- und/oder Gleitzustands mit einer linearen Grenzbedingung, die der in der Bodenmechanik verwendeten Bruchbedingung von Coulomb entspricht. Die aus den Messdaten auf diese Weise errechneten Parameter müssen mit Sicherheitsbeiwerten abgemindert werden, bevor sie in Standsicherheitsberechnungen angesetzt werden. Die Wahl der Sicherheitsbeiwerte richtet sich nach dem verwendeten Sicherheitskonzept und ist in Nor-

men geregelt. Abb. 6 enthält einige Angaben für den Fall der Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten.

3 Repräsentative Ergebnisse von Reibpartnern aus Geokunststoffen mit strukturierten Oberflächen

Im Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover wurden diverse Reibungsversuchsserien mit Geokunststoffen durchgeführt, deren Oberflächen unterschiedlich strukturiert sind. Es wurden kleine Auflasten gewählt, wie sie bei Oberflächenabdichtungssystemen zu erwarten sind. Versuche mit Auflast- bzw. Normalspannungen unter 20 kN/m^2 sind versuchstechnisch mit unseren Geräten nicht zuverlässig realisierbar. Somit besteht keine Möglichkeit, die Schubfestigkeit in einer Kontaktfläche ohne Normalspannung zu messen und gewisse Adhäsionseffekte direkt zu erfassen, sofern diese nicht überwiegend erst durch die Wirkung der Auflast aktiviert werden.

Abb. 7 zeigt eine repräsentative Auswahl von τ -s-Kurven für Reibpartner, die aus unterschiedlich strukturierten Geokunststoffen gebildet werden. Ein als Dränmatte A gekennzeichnetes Geokunststoffprodukt bildet stets einen der beiden Reibpartner. Als zweiter Reibpartner wurden drei Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) mit den Kennbuchstaben A, B und C gewählt, die unterschiedliche Oberflächenstrukturen aufweisen. Alle τ -s-Kurven zeigen keinen ausgeprägten „peak“- Wert. Die Reibungsspannungswerte im Gleitzustand sind abhängig von der Reibpartnerkombination unterschiedlich groß, insbesondere bei der kleinsten Normalspannung von 20 kN/m^2 , wobei die KDB A mit einer unregelmäßigen rauen Oberflächenstruktur eindeutig die größten Werte liefert. Alle Versuchsdaten wurden durch weitere Versuche unter Wiederholungsbedingungen überprüft.

Die oben prinzipiell erläuterte Verfahrensweise zur Bestimmung der Reibungsparameter führt zu den in Abb. 8 zusammengestellten Daten. Beschränkt man die weitere vergleichende Betrachtung der Ergebnisse auf die beiden Stoffparameter δ und a , so spiegeln sich die Unterschiede in der Reibungs- bzw. Kontaktscherfestigkeit nicht im Reibungswinkel δ sondern nur im Adhäsionswert a wieder. Wenn man nun unter Beachtung der „Warnhinweise“ in der GDA E 3-8 bei der Festlegung von Rechenwerten für Standsicherheitsberechnungen, beispielsweise wegen der ungeklärten Adhäsionswirkung ohne Auflast- bzw. Normalspannung und im Hinblick auf Bauzustände, den Parameter a gleich Null setzt und nur den Reibungswinkel in den Berechnungen berücksichtigt, führt das im vorliegenden Fall dazu, dass mit der KDB A, deren Reibungswinkel mit 15° unter den Reibungswinkeln der KDB B mit 19° und der KDB C mit 18° liegt, nur eine geringere Böschungsneigung realisierbar ist als

bei Verwendung von KDB B und C, obwohl der direkte Vergleich der Messdaten anhand der τ -s-Kurven die KDB A eindeutig als besten Reibpartner bezüglich der Kontaktscherfestigkeit ausweist.

4 Auswertung der Daten mit modifizierten Reibungsgesetzen

Anstelle der linearen Grenzbedingung mit den zwei Stoffparametern δ und a , die im weiteren auch kurz Ansatz von Coulomb genannt wird, sind auch andere Ansätze zur mathematischen Beschreibung der Reibungsspannung im Grenzzustand des Bruchs oder des Gleitens abhängig von der Normalspannung möglich. Einige für das vorliegende Reibungsproblem prinzipiell geeignete Ansätze sind in Abb. 9 zusammengestellt worden.

Ein sehr einfacher Ansatz ist ein linearer Zusammenhang, der vom Ursprung des $\tau - \sigma$ -Koordinatensystems ausgeht und nur einen Stoffparameter enthält, nämlich den Gesamtreibungswinkel δ_{ges} . Er ergibt sich durch die Festlegung eines zweiten Zwangspunkts im Koordinatensystem neben dem Ursprung. Wenn als Koordinaten dieses Punkts die $\tau - \sigma$ -Daten des Versuchs mit der größten Auflast gewählt werden und diese größer als die in situ zu erwartende Auflast ist, liegen die mit dem Gesamtreibungswinkel für kleinere Normalspannungen berechneten Reibungsspannungen im Vergleich mit den Messwerten "auf der sicheren Seite".

Auf der SKZ-Tagung vor zwei Jahren wurde von PREGL (2002) ein nichtlinearer Reibungsansatz als geeignet zur Beschreibung der Kontaktscherfestigkeit zwischen Erdstoffen und Geokunststoffen sowie auch zwischen zwei Geokunststoffen vorgestellt. Der Ansatz basiert auf dem bereits in Abb. 2 dargestellten einfachen Reibungsgesetz der Mechanik. Allerdings ist der Reibungswinkel in diesem Ansatz keine Konstante sondern von der Normalspannung und bei Kontakt zwischen Geokunststoffen und Erdstoffen zusätzlich von der Porenzahl des Erdstoffs abhängig. Dadurch ergeben sich im Fall mit Erdstoffbeteiligung drei Stoffparameter und im hier vorrangig betrachteten Fall der Reibung zwischen Geokunststoffen zwei Stoffparameter, die in Abb. 9 mit A und B gekennzeichnet worden sind. Während Zahlenwerte der Stoffparameter im obigen Ansatz nach Coulomb wegen der Analogie zur Bodenmechanik von geotechnischen Sachverständigen und vergleichbaren Fachleuten auf Erfahrungsbasis für die jeweils untersuchte Kontaktfuge qualitativ beurteilt werden können, ist dies für die Stoffparameter im Ansatz von PREGL noch nicht der Fall. Dies gilt auch für den zweiten hier vorgestellten nichtlinearen Reibungsansatz, der die mathematische Form einer Potenzfunktion mit zwei Konstanten hat. Letztere stellen dabei die Stoffkonstanten dar.

In Abb. 10 sind exemplarisch die Messwerte der Reibungsversuche mit Dränmatte A und KDB A den Werten gegenübergestellt worden, die mit den verschiedenen Reibungsansätzen berechnet worden sind. Zusätzlich wurden die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Werten in Prozent bezogen auf den jeweiligen Messwert angegeben. Die beiden nichtlinearen Ansätze beschreiben den Zusammenhang zwischen Reibungsspannung und Normalspannung besser als der lineare Ansatz nach Coulomb. Der Ansatz eines Ersatzreibungswinkels und der Coulomb - Ansatz mit der Zusatzbedingung $a = 0$ führen zu großen Messwertabweichungen "auf der sicheren Seite". Ein entsprechendes Bild ergibt sich für die hier nicht gezeigten Ergebnisse der Auswertungen von Reibungsversuchen mit anderen Reibpartnern. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wird von uns die im folgenden Abschnitt beschriebene Vorgehensweise für die rechnerische Berücksichtigung von Adhäsion in Standsicherheitsberechnungen empfohlen.

5 Empfehlungen zur rechnerischen Berücksichtigung der Adhäsion in Standsicherheitsnachweisen für geneigte Deponieabdeckungen

Für Kontaktflächen zwischen zwei verschiedenen Geokunststoffen mit rauen und strukturierten Oberflächen wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Durchführung der experimentellen Untersuchungen entsprechend dem aktuellen Stand der Technik, vorzugsweise in Rahmenschergeräten mit großer Scherfläche und mit vertikal verschiebbar gelagertem oberem Rahmen, um Zwängungseffekte während des Vorschubs und eine daraus resultierende Erhöhung der Reibungsspannung auszuschließen;
- Durchführung von Versuchen mit Randbedingungen, die genau auf die Gegebenheiten im Bau- und Betriebszustand abgestimmt sind; mögliche reibungsvermindernde Wirkungen von Wasser oder anderen Zwischenstoffen sind durch die versuchstechnische Konzeption zu erfassen; die Normalspannungen im Versuch sind auf die in situ wirkenden Auflasten abzustimmen;
- Analyse der gemessenen Reibungsspannungs-Verschiebungskurven (τ -s-Kurven) im Hinblick auf Maximalwerte, auf den generellen Kurvenverlauf und auf die Streubreite der Messdaten innerhalb kleiner Verschiebungsinkremente sowie visuelle Analyse der Prüfkörper nach dem Versuch im Hinblick auf Furchen, Abrieb usw. zwecks genereller Einschätzung möglicher adhäsiver Effekte;

- Prüfung, in welcher Größenordnung Verschiebungen zwischen Komponenten der Oberflächenabdichtung im Deponiebauwerk verträglich und akzeptabel sind, um danach die für die weitere Auswertung maßgebenden Wertepaare τ und s festzulegen;
- Ansatz der linearen Grenzbedingung nach Coulomb und rechnerische Ermittlung des Reibungswinkels δ und der Adhäsion a durch Ausgleichsrechnung gemäß den Angaben in GDA E 3-8 für den Regelfall;
- Bestimmung des Rechen- bzw. Bemessungswerts der Adhäsion a bei Ansatz eines Sicherheitsbeiwerts von 1,5 bis 2, wobei der kleinere Sicherheitsbeiwert angesetzt werden darf, wenn mindestens zwei Kontrollversuche durchgeführt worden sind;
- Ansatz des Rechen- bzw. Bemessungswerts der Adhäsion nur in den Bau- und Endzuständen, bei denen mindestens eine Auflast wirksam ist, die annähernd der kleinsten Normalspannung im Versuch entspricht.

Für Kontaktflächen zwischen einem wasserundurchlässigen Geokunststoff mit strukturierter Oberfläche, also beispielsweise einer KDB, und bindigem Erdstoff kann prinzipiell in gleicher Weise wie oben erläutert vorgegangen werden,

- wenn eine Entfestigung (Aufweichung) des Erdstoffs im Laufe der Zeit durch Wasser oder eine Reduktion der Kohäsion aus anderen Gründen ausgeschlossen werden kann und
- wenn keine Porenwasserüberdruckspannungen im Erdstoff zu berücksichtigen sind.

Für Kontaktflächen zwischen einem wasserdurchlässigen Geokunststoff mit rauer bzw. strukturierter Oberfläche und bindigem Erdstoff besteht bei geringen Auflasten und Wasserzutritt stets die Gefahr der Aufweichung und Entfestigung. Deshalb wird empfohlen, vorab die Auswirkungen einer Zunahme des Wassergehalts auf die innere Scherfestigkeit des Erdstoffs und insbesondere auf dessen Kohäsion in undrännierten bodenmechanischen Versuchen zu bestimmen. Mit der Abnahme der inneren Scherfestigkeit des Erdstoffs nehmen auch die möglicherweise in der Kontaktfläche zeitweise wirksamen adhäsiven Wirkungen ab, so dass in der Regel nur ein ebenfalls durch die Wassergehaltszunahme reduzierter Reibungswinkel ansetzbar ist. Zudem ist zu prüfen, ob sich die für das Versagen maßgebende Gleitfläche mit noch geringerer Scherfestigkeit im aufgeweichten Erdstoff ausbilden kann.

Wenn im Zuge der Auswahl von Geokunststoffen und Erdstoffen für eine Oberflächenabdeckung vergleichende Betrachtungen und Bewertungen hinsichtlich des Reibungsverhaltens und der Kontaktscherfestigkeit vorgenommen werden, sind stets die Messdaten der Reibungsversuche, insbesondere die Reibungsspannungs-Verschiebungsweg-Kurven (τ - s-Kurven) heranzuziehen und nicht die beispielsweise durch Ausgleichsrechnung oder auf andere Weise festgelegten Reibungsparameter (Reibungswinkel δ und Adhäsion a). Zudem sind die Angaben über die Versuchstechnik (Art des Geräts, Vorschubgeschwindigkeit etc.) und die gewählten Randbedingungen (Normalspannungen, Wasserzugabe etc.) in die vergleichende Bewertung einzubeziehen. Erst bei gründlicher Analyse der genannten Teilaspekte ist eine qualifizierte vergleichende Bewertung der Materialien und eine technisch optimierte Produktauswahl im Hinblick auf die Standsicherheit möglich.

6 Danksagung

Die experimentellen Untersuchungen wurden von der Naue Fasertechnik GmbH & Co. KG, Lübbecke, finanziell gefördert. Die Autoren danken dafür der Geschäftsleitung und Herrn Ehrenberg für die gute Zusammenarbeit.

7 Schrifttum

GDA E 3-8 (1997) Reibungsverhalten von Geokunststoffen, in: GARTUNG und NEFF (1997) Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik" e.V. (DGGT), Jahresbericht 1997, Bautechnik 74, Heft 9, S. 571 bis 579

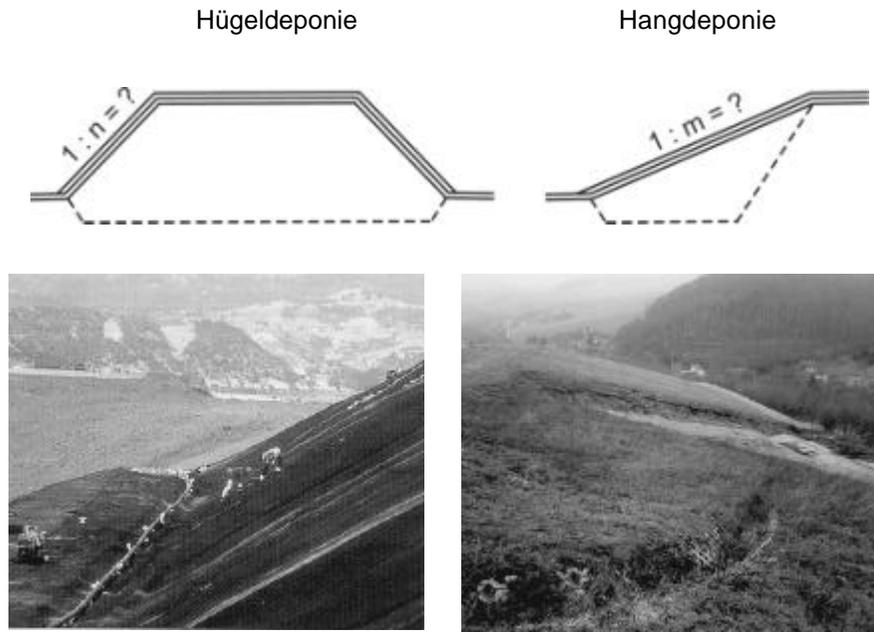
KRUSE und SCHICKETANZ (2001) Durchführung und Auswertung von in situ Großscherversuchen zur Bestimmung des Reibungsverhaltens einer Kombinationsdichtung, in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 122, Erich Schmidt Verlag, Berlin, S. 99 bis 113

PREGL (2002) Kontaktscherfestigkeit zwischen Geokunststoffen und Böden, Unterlagen zur 19. Fachtagung "Die sichere Deponie" des SKZ, Würzburg, S. G1 bis G 18

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

Anhang

Abbildungen



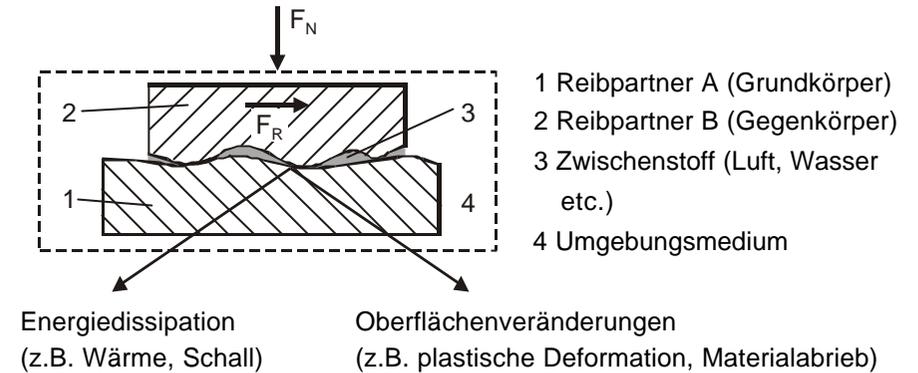
Nachweis der Standsicherheit des geschichteten Dichtungssystems auf geneigten Flächen
(rechnerisch nach DIN 4084 [07/1981] und GDA E 2-7)

Nachweis der Rechenwerte/Bemessungswerte der Reibungsparameter zwischen Erd- und Geokunststoffen
(experimentell nach DIN 18137-3 [09/2002], DIN EN ISO 12957 [Entwurf 04/1998] und GDA E 3-8 im Labor in Rahmenscherversuchen sowie Schiefe-Ebene-Versuchen oder in situ mit objektspezifischen Großversuchen)

Abb. 1: Geotechnisches Problem und Regeln für den Nachweis der Standsicherheit

Mechanisches System

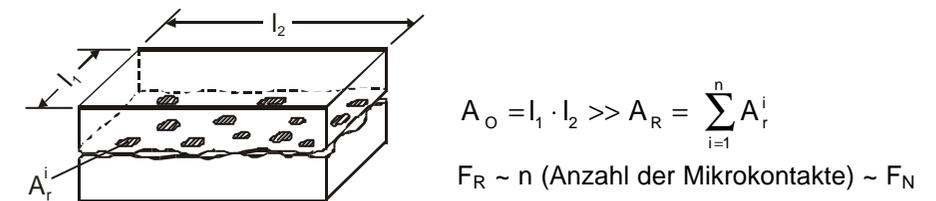
Einwirkungen (Druck- und Schubkräfte bzw. -spannungen, stat./dyn.)



Reibungsgesetz (Stoffgesetz), z. B. in einfachster Form: $F_R = \dot{\iota} \cdot F_N$

mit $\dot{\iota}$: Reibungsparameter, -koeffizient, -zahl (Stoffkenngröße) für trockene oder geschmierte Reibung

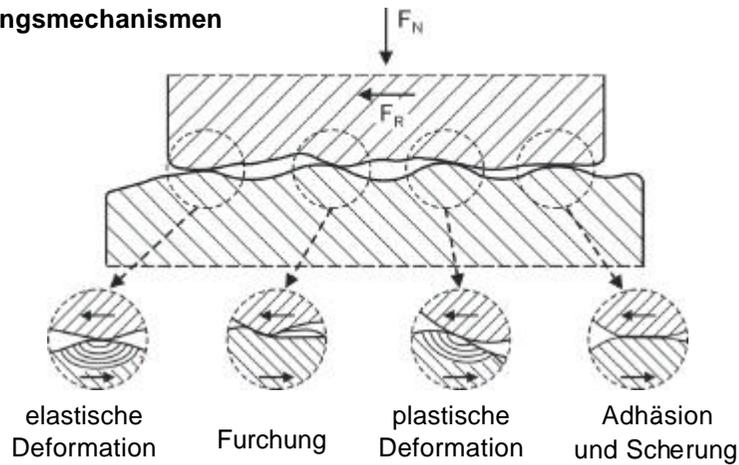
Kontaktfläche (geometrisch und tatsächlich)



Weiteres zur Thematik z. B. in: CZICHOS und HABIG (2003) Tribologie-Handbuch, Vieweg-Verlag

Abb. 2: Grundlagen aus der Reibungs- und Kontaktmechanik

Reibungsmechanismen

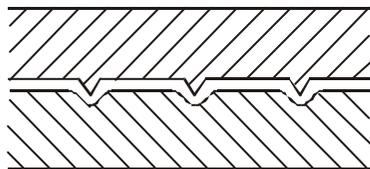


Spezifische und thermodynamische Adhäsion

Anziehungskräfte zwischen Adhärenz [Material A] und Substrat [Material B], (chemische Bindungen [z.B. Ionenbindungen] und zwischenmolekulare Kräfte [z.B. van-der-Waals-Kräfte])

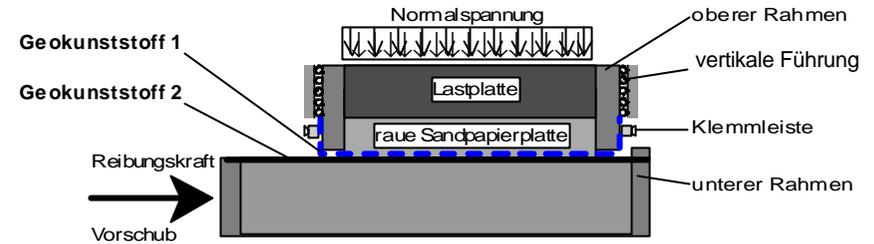
Mechanische „Adhäsion“

Eindringung von Material A in Poren und Vertiefungen des Materials B (mechanische Verankerung, Formschluss)



Weiteres zur Thematik z. B. in: CZICHOS und HABIG (2003) Tribologie-Handbuch, Vieweg-Verlag, BACH (2003) Studienunterlagen über Verbundwerkstoffe, Inst. f. Werkstoffkunde, Universität Hannover

Abb. 3: Grundlagen aus der Reibungs- und Kontaktmechanik



Bei projektspezifischen Versuchen ist an Stelle der rauhen Sandpapierplatte das in situ vorgesehene Material einzubauen.

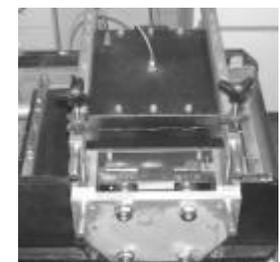
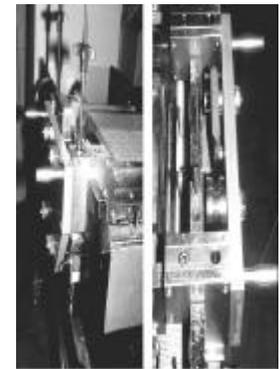
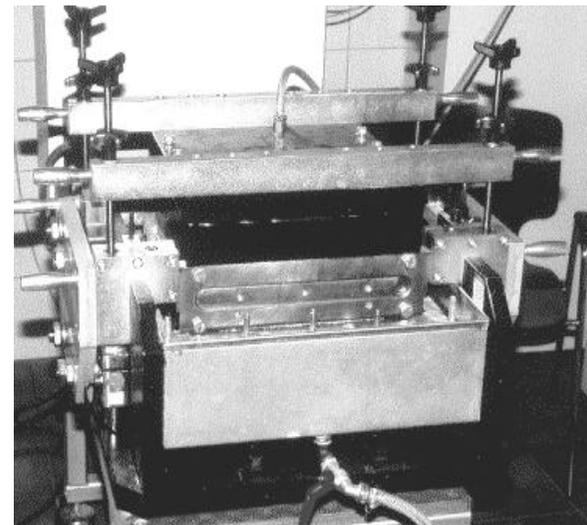
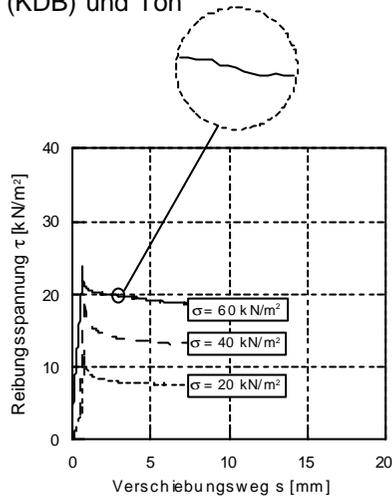
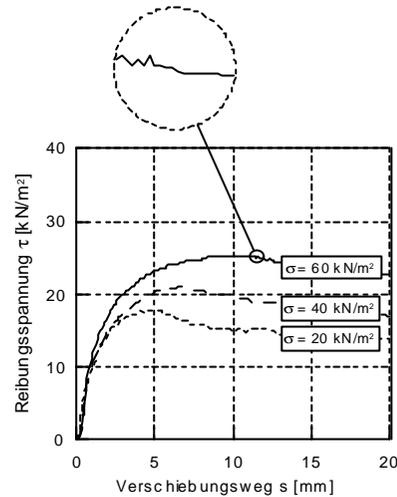


Abb. 4: Schematischer Versuchsaufbau und Lichtbilder des Rahmenschergeräts mit 30 cm x 30 cm großer Prüflfläche und vertikal verschieblichem oberem Rahmen

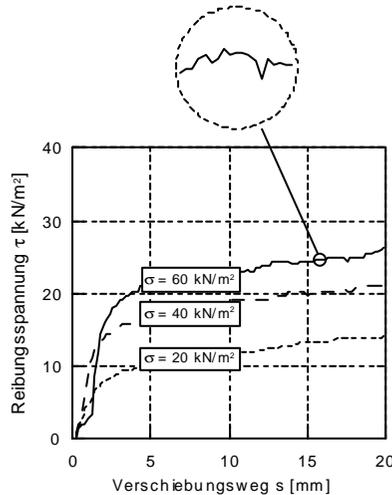
glatte Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und Ton



strukturierte KDB und Ton



strukturierte KDB und Dränmatte



Dränmatte und Bentonitmatten (GTD)

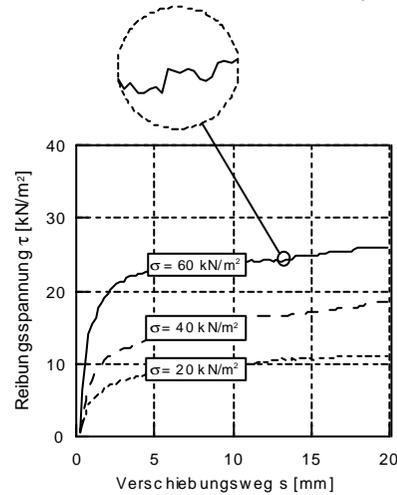
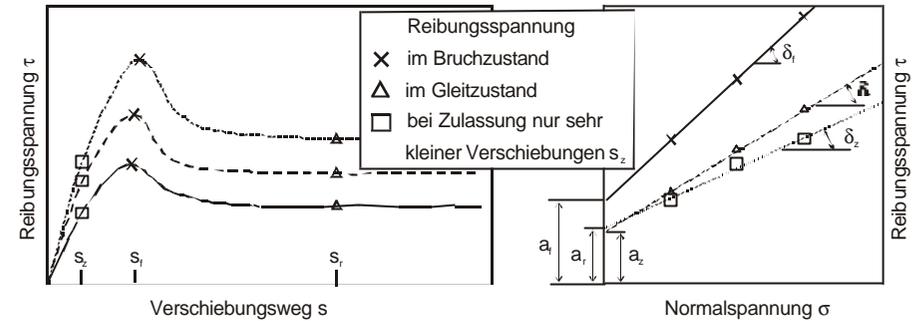


Abb. 5: Reibungsspannungs-Verschiebungswegkurven für verschiedene Reibpartner



Reibungsspannungs-Verschiebungskurven und Reibungsspannungs-Normalspannungslinien

- für den Bruchzustand (Index f)
- für den Gleitzustand (Index r)
- bei Zulassung nur sehr kleiner Verschiebungen (Index z)

Reibungsgesetz von COULOMB (Grenzbedingung):

$$\hat{\sigma} = a + \sigma \cdot \tan \delta$$

mit a : Adhäsion
 δ : Reibungswinkel

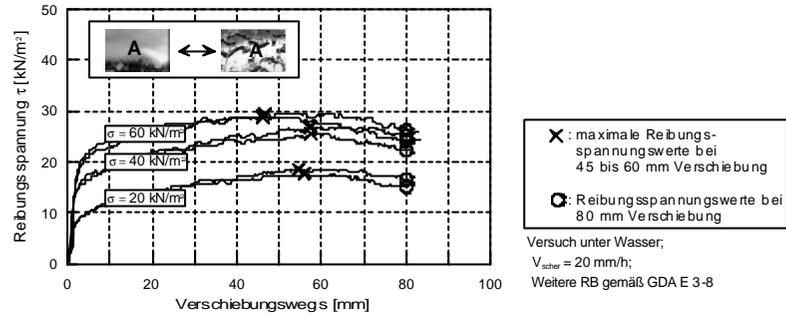
Zur Ableitung der Bemessungswerte der Reibungsparameter

- Festlegung der zulässigen Verschiebung
- Ermittlung der Grenzbedingung für die zulässigen Verschiebungen und der zugehörigen Reibungsparameter (a und $\tan \delta$)
- Bestimmung der charakteristischen Werte der Reibungsparameter a_k und $\tan \delta_k$
- Berechnung der Bemessungswerte der Reibungsparameter mit den Teilsicherheitsbeiwerten g und g_i

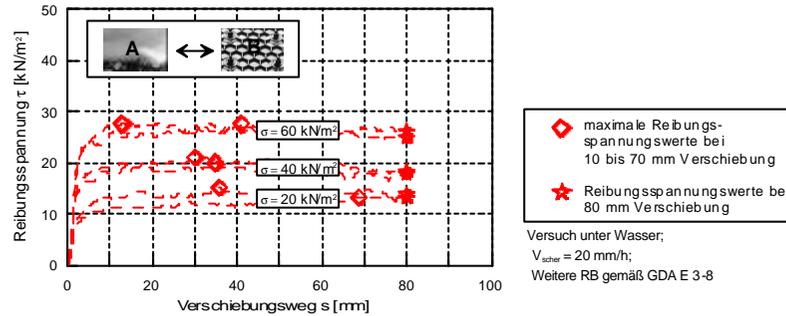
$$a_d = \frac{a_k}{g_a} ; \quad \tan \delta_d = \frac{\tan \delta_k}{g_i}$$

Abb. 6: Zusammenhang zwischen Messwerten und Bemessungswerten der Reibungsparameter für Standsicherheitsberechnungen

Dränmatte A – KDB A (unregelmäßige raue Oberflächenstruktur)



Dränmatte A – KDB B (Wabenstruktur mit Noppen)



Dränmatte A – KDB C (Karostruktur mit Noppen)

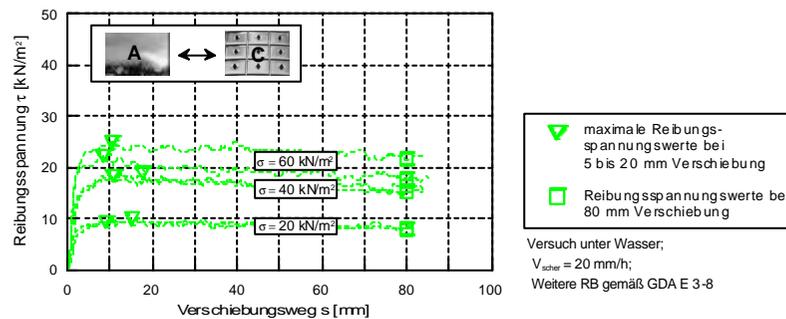
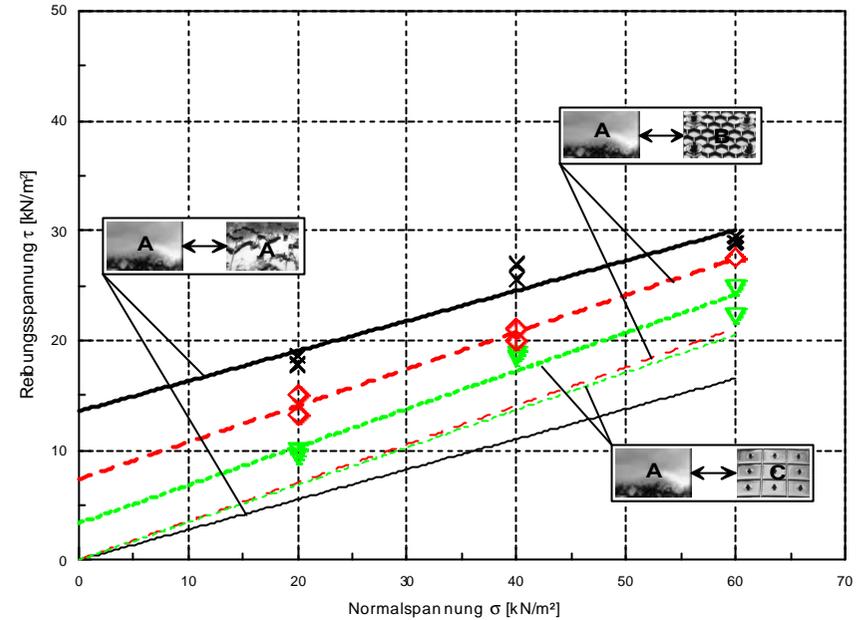


Abb. 7: Ergebnisse von Reibungsversuchen mit einer Dränmatte und drei unterschiedlich strukturierten Kunststoffdichtungsbahnen

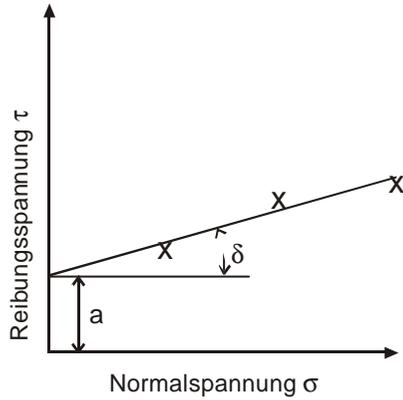


Reibungsparameter für Normalspannungen von 20 bis 60 kN/m²

X	Maximale Reibungsspannung für den Kontakt Dränmatte A – KDB A (unregelmäßige raue Oberflächenstruktur)
—	$\delta = 15^\circ$ $a = 13 \text{ kN/m}^2$
- - -	$\delta = 15^\circ$ $a = 0 \text{ gesetzt}$
◇	Maximale Reibungsspannung für den Kontakt Dränmatte A – KDB B (Wabenstruktur mit Noppen)
- - -	$\delta = 19^\circ$ $a = 6 \text{ kN/m}^2$
- - -	$\delta = 19^\circ$ $a = 0 \text{ gesetzt}$
▽	Maximale Reibungsspannung für den Kontakt Dränmatte A – KDB C (Karostruktur mit Noppen)
- - -	$\delta = 18^\circ$ $a = 3 \text{ kN/m}^2$
- - -	$\delta = 18^\circ$ $a = 0 \text{ gesetzt}$

Abb. 8: Linearer Zusammenhang zwischen Reibungsspannungen und Normalspannungen sowie Reibungsparameter

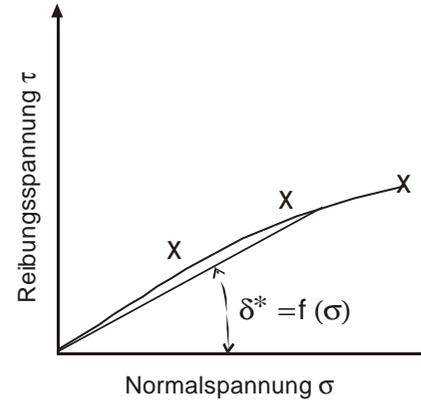
Linearer Ansatz (nach COULOMB)



$$\hat{\sigma} = a + \sigma \cdot \tan \delta$$

mit τ : Reibungsspannung
 σ : Normalspannung
 a : Adhäsion
 δ : Reibungswinkel

Ansatz von PREGL (2002)



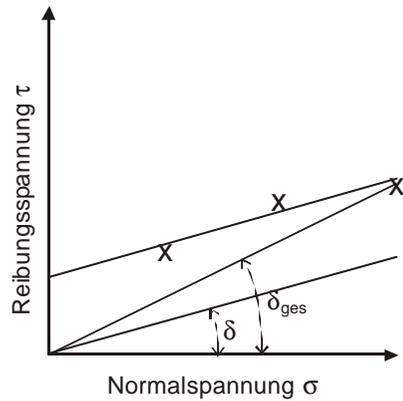
$$\hat{\sigma} = \sigma \cdot \tan \hat{a}^*$$

mit

$$\hat{a}^* = A + B \cdot \log \left(\frac{\sigma}{\sigma_b} \right)$$

mit δ^* : Reibungswinkel nach PREGL
 σ_b : Bezugsspannung (wählbar)
 A, B : konstante Kontaktparameter

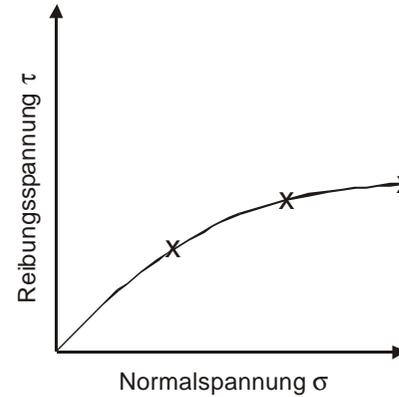
Ansatz eines Gesamtreibungswinkels



$$\hat{\sigma} = \sigma \cdot \tan \hat{a}_{ges}$$

mit δ_{ges} : Gesamtreibungswinkel
 abhängig von σ
 (wobei $\delta_{ges} > \delta$)

Ansatz einer Potenzfunktion mit zwei Konstanten



$$\hat{\sigma} = C \cdot \sigma^D$$

mit C, D : konstante Kontaktparameter

Abb. 9: Berechnungsansätze für die Reibungsspannung abhängig von der Normalspannung

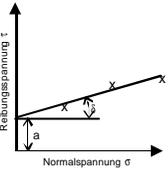
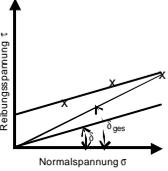
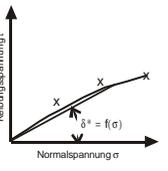
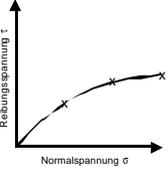
Rechenansatz	Normalspannung	Reibungsspannung		Messwertabweichung
	σ	im Versuch gemessen t_{mess}	rechnerisch ermittelt t_{rech}	$\frac{t_{rech} - t_{mess}}{t_{mess}} \cdot 100$
	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[%]
Linearer Ansatz (und a=0 gesetzt) 	20	18,2	18,4 (5,4)	+1 (-70)
	40	26,2	23,7 (10,7)	-10 (-59)
	60	29,1	29,1 (16,1)	0 (-45)
Gesamt-reibungs-winkel 	20	18,2	9,7	-47
	40	26,2	19,4	-26
	60	29,1	29,1	0
PREGL (2002) 	20	18,2	14,6	-20
	40	26,2	22,6	-14
	60	29,1	28,8	-1
Potenz-funktion 	20	18,2	18,7	+3
	40	26,2	25,1	-4
	60	29,1	29,8	+2

Abb. 10: Gemessene und rechnerisch nach verschiedenen Ansätzen ermittelte Reibungsspannungen für Dränmatte A vs. KDB A