

1 Probenentnahme, Probenbeschriftung und mitzuliefernde Unterlagen (GDA E 3-8, Abschn. 3.1 und 3.2)

1.1 Probenentnahme

- aus den für die Baumaßnahme vorgesehenen Produkten/Erdstoffen
- repräsentative Proben (frei von Verunreinigungen, Oberflächenveränderungen und sonstigen Beschädigungen)
- Größe der Geokunststoffprobenstücke: Länge (in Böschungsfallrichtung) 50 cm, Breite 40 cm; Probenmenge bei Erdstoffen: rd. 5 bis 10 Liter [für Geräte mit 30 cm x 30 cm großer Prüffläche]
- Die Anzahl der Proben richtet sich nach dem Umfang der Untersuchungen und ist mit der Prüfinstitution abzustimmen. In der Regel muss für jeden Versuch eine neue Probe verwendet werden.

1.2 Probenbeschriftung

- Bei Geokunststoffen ist die Prüfrichtung (Verlege-/Böschungsfallrichtung) und die Prüfseite auf den Proben zu kennzeichnen.
- Bei Erdstoffen sind Probenart sowie Entnahmestelle/-datum anzugeben (s. auch DIN 4022).

1.3 Mitzuliefernde Unterlagen

- Bei Geokunststoffen sind das Technische Datenblatt, das Produktionsdatum der Proben und die Rollennummer mitzuliefern.
- Bei Erdstoffen sind die Korngrößenverteilung (u.a. wegen d_{85}), der zulässige Bereich der Einbaudichte sowie bei bindigen Erdstoffen die Zustandsgrenzen und der zulässige Bereich des Einbauwassergehalts anzugeben.

2 Prüfeinrichtung, Probeneingangskontrolle

2.1 Prüfeinrichtung (GDA E 3-8, Abschn. 4)

- Vorzugsweise sind Rahmenschergeräte mit vertikal verschiebbarem oberem Rahmen und einer Nennreibungsfläche $\geq 900 \text{ cm}^2$ zu verwenden (Geräteausbildung siehe DIN 18137-3 und DIN EN ISO 12957-1).
- Mindestens einmal jährlich sind die Kraftmessdosen sowie die Eigenreibung (Lagerreibung) des verwendeten Geräts zu überprüfen und ggf. Kalibrierungen vorzunehmen.
- Die Prüfnormalspannung ist nach Möglichkeit nahe der Kontaktzone zu kontrollieren.
- Der über der Kontaktzone angeordnete Aufbau (Probenmaterial, Belastungseinrichtung etc.) ist gewichtsmäßig zu erfassen und als Auflastanteil zu berücksichtigen.
- Bei Anordnung von Erdstoffen im oberen Rahmen und kleineren Auflasten, die für ein „Schweben“ des oberen Rahmens mangels Verspannung des Erdstoffs zwischen den Rahmenwänden nicht ausreichen, ist das Gewicht des oberen Rahmens mit einem Gegengewicht oder Federsystem zu kompensieren.
- Bei Versuchen mit „schwebendem“ oberem Rahmen und ohne Gewichtskraftkompensation ist das Eigengewicht des oberen Rahmens als Auflastanteil zu berücksichtigen.

2.2 Probeneingangskontrolle (GDA E 3-8, Abschn. 3)

- Bei **Geokunststoffen** ist jede Probe bei Ankunft seitens der Prüfinstitution gründlich auf Beschädigungen, Verunreinigungen und sonstige Oberflächenveränderungen hin visuell zu überprüfen.
- Bei **Geotextilien** sind zusätzlich Probendicke sowie flächenbezogene Masse zu bestimmen und mit den Angaben des Produktdatenblatts zu vergleichen.
- Bei **Erdstoffen** ist seitens der Prüfinstitution die mitgelieferte Korngrößenverteilung zumindest visuell zu überprüfen. Bei Abweichungen oder in Zweifelsfällen sind bodenmechanische Kontrollversuche durchzuführen.

3 Probenvorbereitung, -einbau und -befestigung (GDA E 3-8, Abschn. 5.3 und 5.4)

3.1 Vorbereitung von Geokunststoffproben

Die Probenkontaktfläche ist auf das Maß der Prüffläche zu begrenzen (i.d.R. 30 cm x 30 cm). Hierzu ist entweder die im Prüfgerät am unteren oder am oberen Rahmen zu befestigende Probe auf eine der Prüffläche entsprechende Breite (i.d.R. 30 cm) zuzuschneiden.

3.2.1 Befestigung der Geokunststoffprobe am unteren Rahmen

- Die Probe ist an der „Zugseite“ des unteren Rahmens mit einer Klemmleiste einzuspannen. Des Weiteren ist zusätzlich eine flächige Fixierung auf der starren Unterlage zu wählen, damit eine Dehnung infolge der wirkenden Reibungskräfte während des Versuchs verhindert wird (s.u.). Dabei ist darauf zu achten, dass die Fixierungsmittel nicht die Eigenschaften der Prüfseite des Geokunststoffes beeinflussen. Empfohlen werden für
 - **Kunststoffdichtungsbahnen:**
Anordnung einer auf einer Trägerplatte fixierten Elastomerplatte (Dicke: 2 bis 5 mm) zwischen Probe und starrer Unterlage,
 - **geosynthetische Tondichtungsbahnen:**
Anordnung einer Nagelplatte zwischen Probe und starrer Unterlage (Nagelspitzenüberstand < halbe Probendicke im belasteten Zustand),
 - **geosynthetische Drainagebahnen und Vliesstoffe:**
 - bei mechanisch verfestigten Vliesstoffen: Fixierung mit einem auf der starren Unterlage angeordneten Klettklebeband,
 - bei thermisch verfestigten Vliesstoffen: Fixierung mit einem auf der starren Unterlage angeordneten doppelseitigen Klebeband,
 - in sonstigen Fällen (z.B. bei Untersuchung eines Sickerkörpers): Anordnung einer Nagelplatte, eines Reibbleches, einer rauen Sandpapierplatte o.ä. (Erhabenheit der Rauigkeitselemente < halbe Probendicke im belasteten Zustand).

3.2.2 Befestigung der Geokunststoffprobe am oberen Rahmen

- Die Probe ist im oberen Rahmen derartig anzuordnen, dass sie auf der Seite, die der „Zugseite“ gegenüber liegt, bündig mit der Prüffläche (Rahmeninnenseite) abschließt.
- Über der Probe ist das gemäß dem Schichtsystem in situ vorgesehene Material einzubauen. Liegen hierzu keine Angaben vor, ist eine Schicht aus CEN-Normsand in den oberen Rahmen einzubauen oder eine Fixierungsplatte einzulegen (s. unten).
- Die Probe ist an der „Zugseite“ des oberen Rahmens mit einer Klemmleiste einzuspannen. Wird über der Probe ein Erdstoff angeordnet, ist diese Randeinspannung ausreichend. Andernfalls ist die Probe zusätzlich flächig zu fixieren, sodass eine Dehnung infolge der wirkenden Reibungskräfte während des Versuchs verhindert wird. Dabei ist darauf zu achten, dass die Fixierungsmittel nicht die Eigenschaften der Prüfseite des Geokunststoffes beeinflussen. Empfohlen werden für
 - **mechanisch verfestigte Vliesstoffe:** ein auf einer Platte angeordnetes Klettklebeband,
 - **thermisch verfestigte Vliesstoffe:** ein auf einer Platte angeordnetes doppelseitiges Klebeband,
 - **geosynthetische Drainagebahnen:** ein auf einer Platte angeordnetes Klettklebeband oder eine Nagelplatte (Nagelüberstand < halbe Probendicke im belasteten Zustand),
 - **geosynthetische Tondichtungsbahnen:** ein Reibblech oder eine Nagelplatte (Nagelüberstand < halbe Probendicke im belasteten Zustand).

3.2.3 Einbau von Erdstoffen

Bindige Erdstoffe sind außerhalb des Gerätes in den oberen Rahmen einzubauen. Zur gleichmäßigen Verteilung der Reibungsspannung im Erdstoffkörper ist über dem zu prüfenden Erdstoff eine mit Zähnen oder Schneiden versehene Platte anzuordnen.

4 Spalteinstellung (GDA E 3-8, Abschn. 5.2)

- Als Spalt wird der lichte Abstand zwischen der Oberseite der unteren Probe und der Unterkante des oberen Rahmens bezeichnet.
- Die Höhe des mit Stellschrauben einzustellenden Spalts richtet sich nach den verwendeten Prüfmaterialeien.
- Bei im oberen Rahmen angeordneten Erdstoffen darf der Spalt nicht zu groß gewählt werden, da sich sonst die Gleitfläche in den Erdstoff verlagern kann.
- Der Spalt darf nicht zu klein gewählt werden, da sonst am oberen Rahmen befestigte Geokunststoffe unter den Rahmenwänden gezwängt werden.
- Bei wenig kompressiblen Geokunststoffen im unteren Rahmen und Erdstoffen im oberen Rahmen genügt i.d.R. nach Aufbringung der Normalspannung eine Spalteinstellung von 0,5 bis 1 mm.
- Bei wenig kompressiblen Geokunststoffen sowohl im unteren als auch im oberen Rahmen ergibt sich das Spaltmaß durch Addition der Probendicke nach Aufbringung der Normalspannung plus 0,5 bis 1 mm.
- Bei kompressiblen Geokunststoffen ist die lastabhängige Zusammendrückung der Geokunststoffe zu berücksichtigen. Das einzustellende Spaltmaß ergibt sich durch Addition der nach Aufbringung der Normalspannung komprimierten Probendicke plus 0,5 bis 1 mm. Bei kompressiblen Geokunststoffen ist das Maß der Zusammendrückung unter der Versuchsauflast ggf. vorab zu bestimmen.

5 Dokumentation (GDA E 3-8, Abschn. 7)

Zur Darstellung der Versuchsergebnisse im Prüfbericht gehören folgende Angaben:

- Auftraggeber,
- Art und Bezeichnung sowie ggf. Lichtbilder der Proben vor und nach dem Versuch,
- Prüfgerät und Anordnung des Prüfsystems (mit Prinzipskizzen),
- Prüfseite u. -richtung, Probenmaße, ggf. auch Kenndaten wie flächenbezogene Masse, Dicke etc.
- Einbauverfahren (und Fixierung) der Geokunststoffproben,
- Einbauverfahren und Einbauparameter der untersuchten Erdstoffe sowie Hinweise zur Art der Wandreibungsminderung,
- Hinweise zur Spalteinstellung,
- Konsolidationszeiten, Normalspannungen und Vorschubgeschwindigkeiten,
- Verfahren zur Messwerterfassung der Kräfte, Spannungen, Verschiebungen und Verformungen,
- Messwerte der Einzelversuche im τ - σ -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 τ - σ -Diagramm einschl. Korrelations- / bzw. Variationskoeffizienten,
- Reibungswinkel und Adhäsion im Bruchzustand (δ_r , a_r), im Gleitzustand (δ_g , a_g) sowie ggf. bei ausgewählten Verschiebungen oder im Sonderfall der Winkel der Gesamtreibungsfestigkeit (δ_s) für eine vorgegebene Normalspannung,
- Oberflächen- oder Strukturveränderungen der Geokunststoffe, beispielsweise Materialabrieb bei Kunststoffdichtungsbahnen, Umlagerung von Fasern bei Geotextilien und Erdstoffrückstände am Geokunststoff (ggf. mit Lichtbildern (s.o.), Skizzen oder Probenmustern),
- besondere Beobachtungen während des Versuchs und nach Versuchsende, beispielsweise zur Verlagerung der Gleitfläche in den Erdstoff.



IGBE
Institut für Geotechnik
und Baugrundbau

Zur Standsicherheit von Dichtungssystemen auf Böschungen

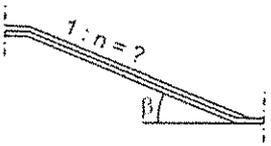
- Geotechnisches Problem
und rechnerische Standsicherheitsnachweise
- Grundlagen der Reibungsmechanik
- Experimentelle Bestimmung von Reibungsparametern
- Ergebnisse vergleichender Reibungsversuche
- Auswirkungen verschiedener Einflüsse auf die
Messergebnisse von Reibungsversuchen
- Erkenntnisse und Folgerungen



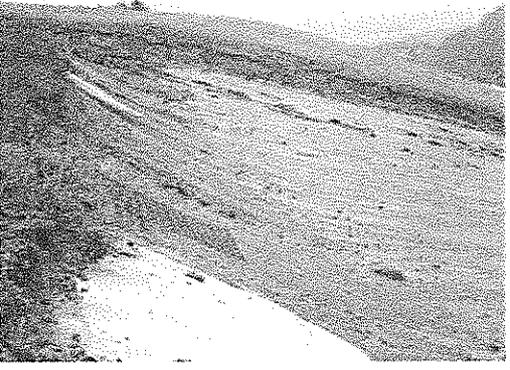
IGBE
Institut für Geotechnik
und Baugrundbau

Geotechnisches Problem

Abdichtungssystem auf der
Böschung einer Deponie aus
mehreren verschiedenen Erd-
und Geokunststoffschichten



$1:n = ?$
 β



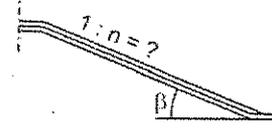
Standsicherheit abhängig von der Böschungsneigung $1:n$ und somit von
der inneren und äußeren Reibung der Erdbaustoffe und Geokunststoffe



Regeln für den Nachweis der Standsicherheit von geschichteten Systemen

- **Nachweis der Standsicherheit eines geschichteten Dichtungssystems auf geneigten Flächen gegen Gleiten**
 rechnerisch nach DIN 4084 [07/1981]
 sowie nach GDA E 2-7

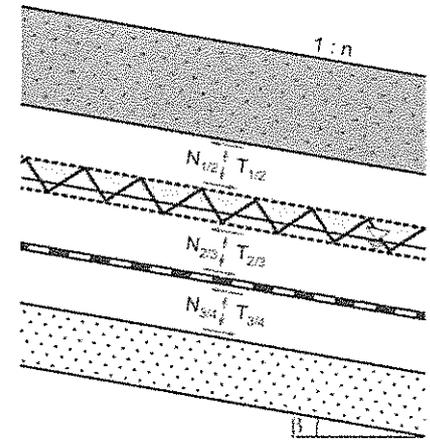
- **Nachweis der Rechenwerte/Bemessungswerte der Reibungsparameter zwischen Erd- und Geokunststoffen**
 experimentell nach DIN 18137-3 [09/2002],
 DIN EN ISO 12957 [05/2005]
 und GDA E 3-8 [09/2005]
 im Labor mit Rahmenscherversuchen



Gesucht: Ebene und gebrochene Gleitflächen mit minimaler Sicherheit
 • Innere und äußere Reibung der Erdstoffe und Geokunststoffe im Grenzzustand (Bruch- und Gleitzustand)



Beispiel für ein geneigtes geschichtetes Abdichtungssystem



- ① **Rekultivierungsschicht**
(Erdstoff)
- ② **Entwässerungsschicht**
(z. B. geosynth. Drainagebahn)
- ③ **Dichtungsschicht**
(z. B. Kunststoffdichtungsbahn)
- ④ **Trag- und Ausgleichsschicht**
(Erdstoff)

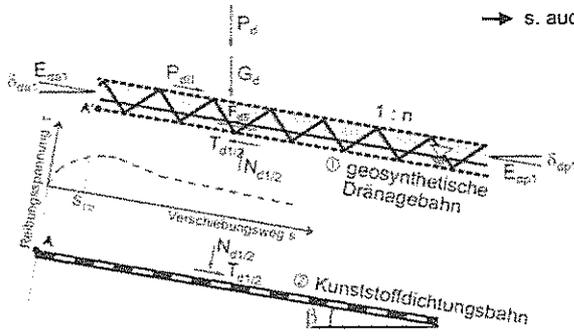
N_{ik} : normal zur Schichtgrenze der Reibpartner „i“ und „k“ wirkende Druckkraft
 T_{ik} : zwischen den Reibpartnern „i“ und „k“ in der Kontaktzone wirkende Schubkraft



Prinzip des Standsicherheitsnachweises für eine ebene Gleitfläche

(z. B. für die Kontaktzone zwischen zwei Geokunststoffen)

→ s. auch DIN 4084 und GDA E 2-7



$$\sum R_d - \sum S_d \geq 0$$

bzw.

$$\Delta T_{1/2} \geq 0$$

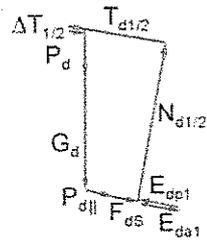
(bei Ansatz von Teil-
sicherheitsbeiwerten)

Einwirkungen S_d

- G_d : Eigenlasten des Gleitkörpers
- P_d, P_{dII} : Ständige und temporäre Lasten auf dem Gleitkörper
- F_{ds} : Strömungsdruckkräfte
- E_{da1} : Erddruckkräfte

Widerstände R_d

- $T_{d1/2}$: Reibungsfestigkeit der Reibpartner in der Kontaktzone
- E_{dp1} : Erdwiderstandskräfte



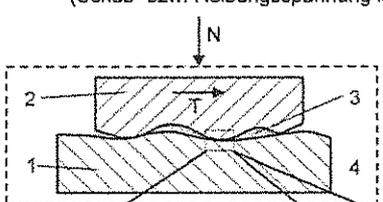


Grundlagen der Reibungs- und Kontaktmechanik

Mechanisches System

Einwirkungen: Druckkräfte N und Schubkräfte T bzw. deren zugehörige Druckspannungen σ und Schubspannungen τ [statisch/dynamisch] infolge der Wirkungen von Gravitation, Wasserströmung, Baugeräten etc.

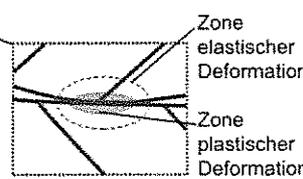
Widerstände: Reibungsfestigkeit zwischen den Reibpartnern in der Kontaktzone (Schub- bzw. Reibungsspannung im Bruch-/Grenzzustand τ_r)



- 1 Reibpartner A (Grundkörper)
- 2 Reibpartner B (Gegenkörper)
- 3 Zwischenstoff
(Luft, Wasser, Verunreinigungen der Reibpartneroberflächen etc.)
- 4 Umgebungsmedium

Energiedissipation
(z. B. Wärme, Schall)

Oberflächenveränderungen
(z. B. plastische und elastische Deformation, Materialabrieb)





IGBE
Institut für Geotechnik
und Baugrubentechnik

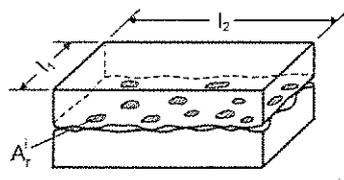
Grundlagen der Reibungs- und Kontaktmechanik

Reibungsgesetz (Stoffgesetz)
in einfachster Form

> mit einem Stoffparameter: $T = N \cdot \mu \rightarrow (T/A_0) = (N/A_0) \cdot \mu \rightarrow \tau = \sigma \cdot \tan \delta$
mit μ bzw. $\tan \delta$: Reibungsparameter (-koeffizient, -zahl) als StoffkenngroÙe

> mit zwei Stoffparametern: $T = N \cdot \mu + a \rightarrow (T/A_0) = (N/A_0) \cdot \mu + a \rightarrow \tau = \sigma \cdot \tan \delta + a$
mit a : Adhäsion als zweite StoffkenngroÙe (wenn $T = 0$ bei $N = 0$)

Kontaktfläche A_0 bzw. A_R (geometrisch bzw. tatsächlich)



$T \sim n$ (Anzahl der Mikrokontakte) $\sim N$

$$A_0 = l_1 \cdot l_2 \gg A_R = \sum_{i=1}^n A_i'$$

mit individuellen Reibungsparametern

→ Mikrokontakt-Ansatz bisher nicht nutzbar für die Baupraxis



IGBE
Institut für Geotechnik
und Baugrubentechnik

Schematischer Aufbau eines Reibungsversuchs und generelle Hinweise zur Versuchsdurchführung

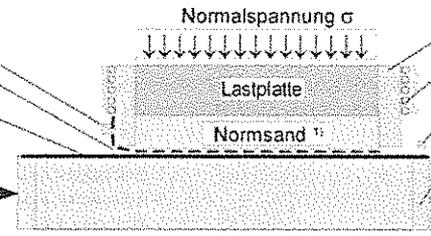
Klemmleiste

Geokunststoff 1

Geokunststoff 2

Reibungskraft T

Vorschub



oberer Rahmen

vertikale Führung

Klemmleiste

unterer Rahmen

¹⁾ Bei projektspezifischen Versuchen ist an Stelle des Normsand es möglichst das in situ vorgesehene Material einzubauen.

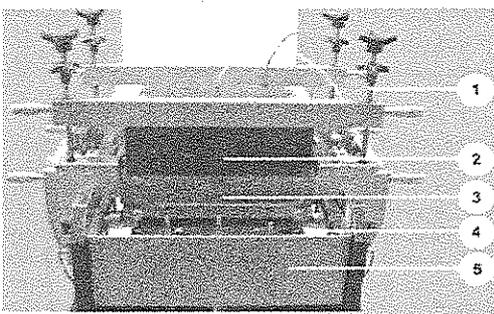
- Experimentelle Untersuchung im Rahmenschergerät (ggf. alternativ mit Kipptisch und/oder in situ)
- Versuchsdurchführung nach Vorgaben der Normen und Empfehlungen
- Randbedingungen abhängig von der Aufgabenstellung (index oder performance test)

empfohlene Prüfnormalspannungen für Oberflächenabdichtungssysteme mit 1 bis 2 m Mächtigkeit: 20, 40 und 60 kN/m²
(bei Versuchen mit Normalspannungen < 20 kN/m² sind Geräte- und Streuungseinflüsse größer)



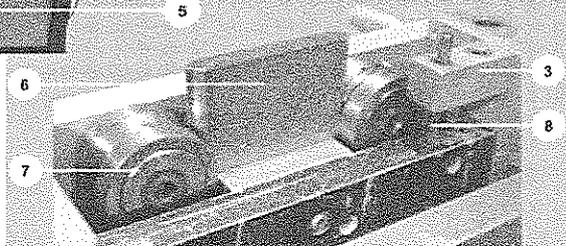
Rahmenschergerät des IGBE

mit 30 cm x 30 cm großer Prüffläche
und vertikal verschiebbarem oberem Rahmen



Frontansicht des Rahmenschergeräts mit einer Prüffläche von rd. 0,1 m²

- 1 Zugstange
- 2 Deckel mit integriertem Druckkissen
- 3 oberer vertikal verschiebbarer Rahmen
- 4 unterer Rahmen
- 5 Wanne für Versuche unter Wasser
- 6 vertikale (Schneid-) Führung
- 7 Rollenlager
- 8 Stellschraube (zur Spalteinstellung)

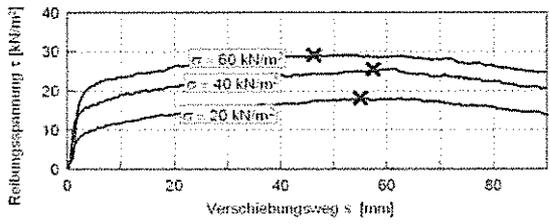


Lager des vertikal verschiebbaren oberen Rahmens



Ansätze für die Grenzzustandsgleichung

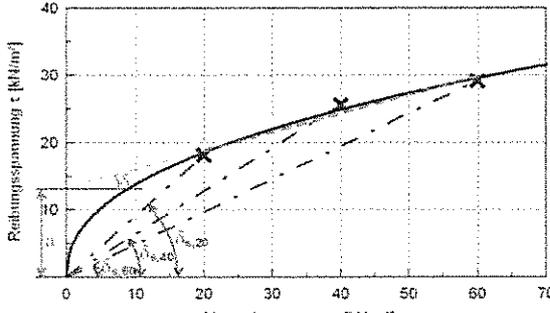
Zusammenhang zwischen Reibungs- und Normalspannung



Reibungsspannung τ [kN/m²]

Verschiebungsweg s [mm]

$\sigma = 60 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma = 40 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$

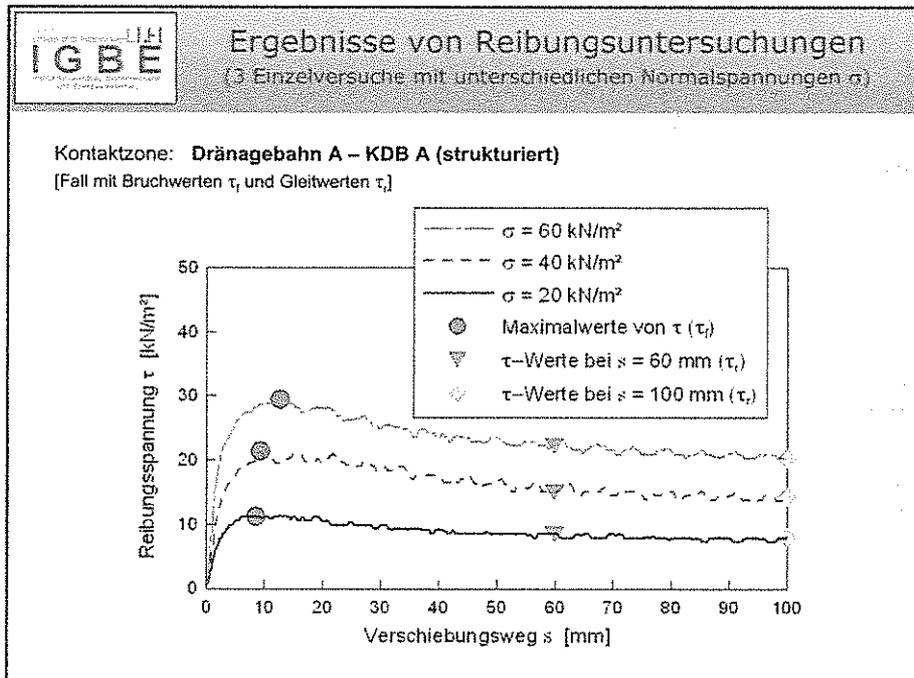
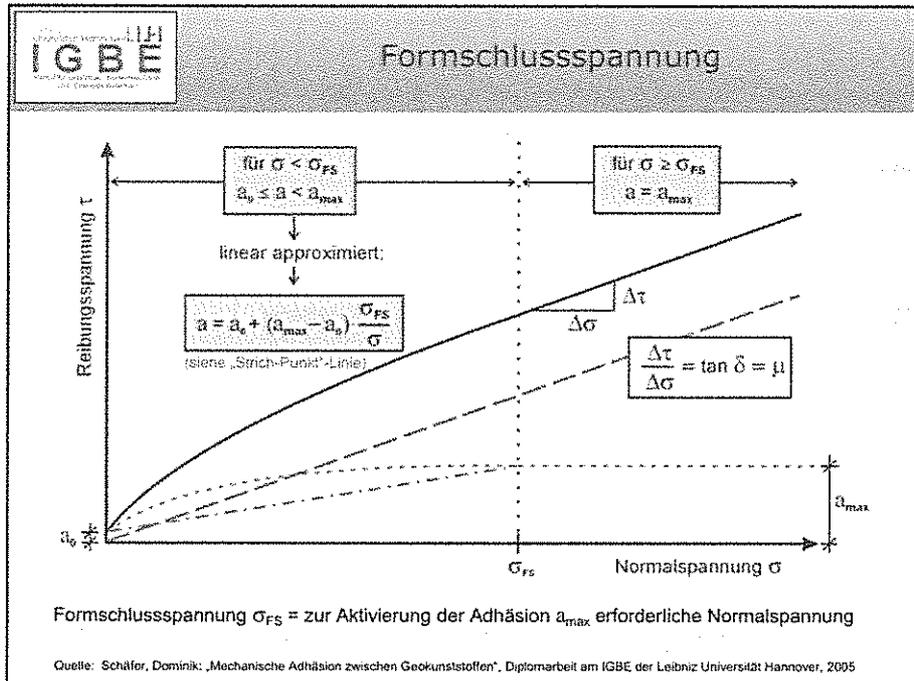


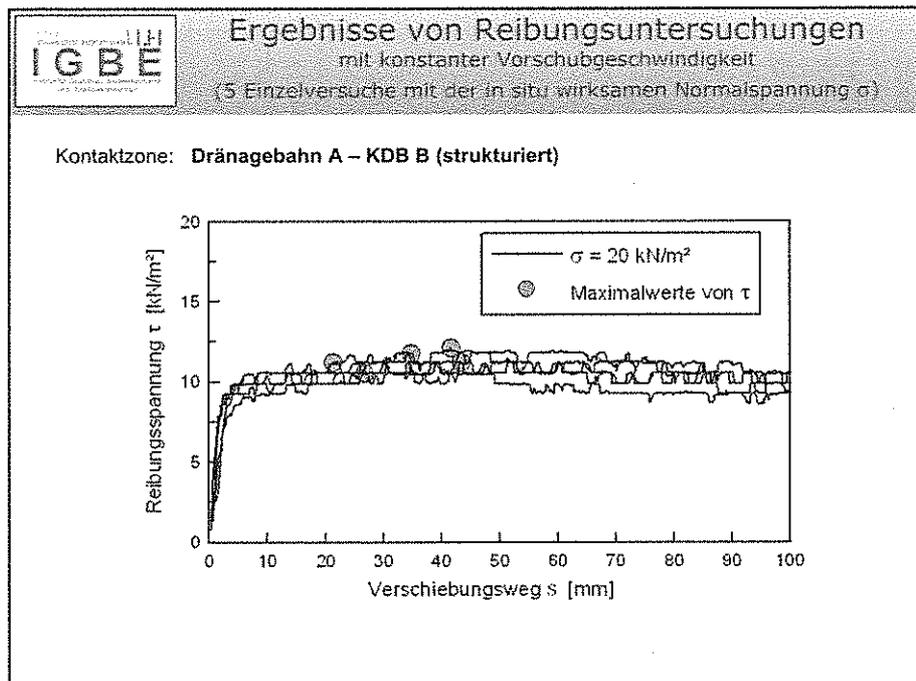
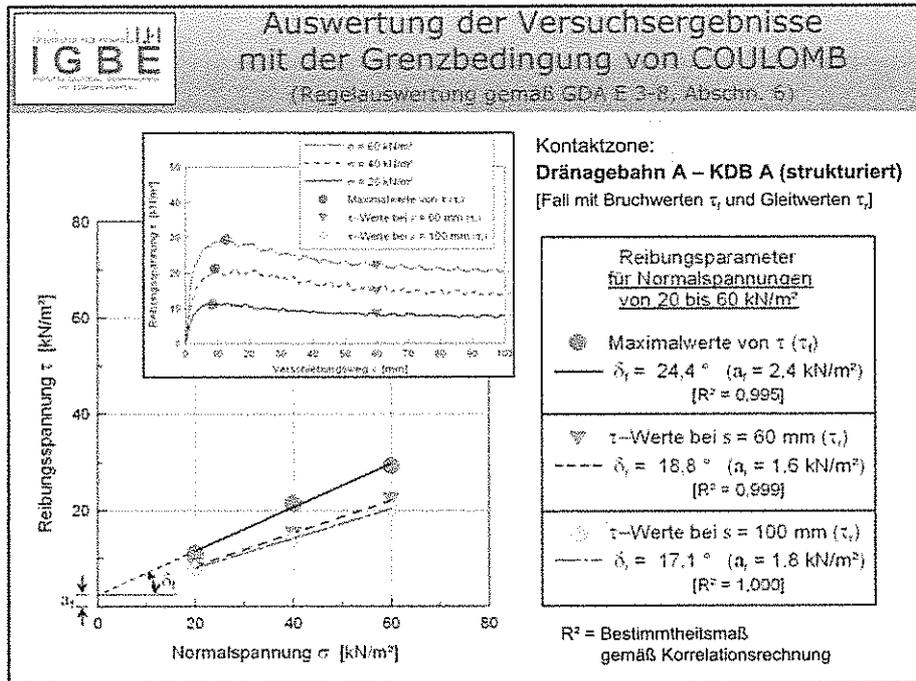
Reibungsspannung τ [kN/m²]

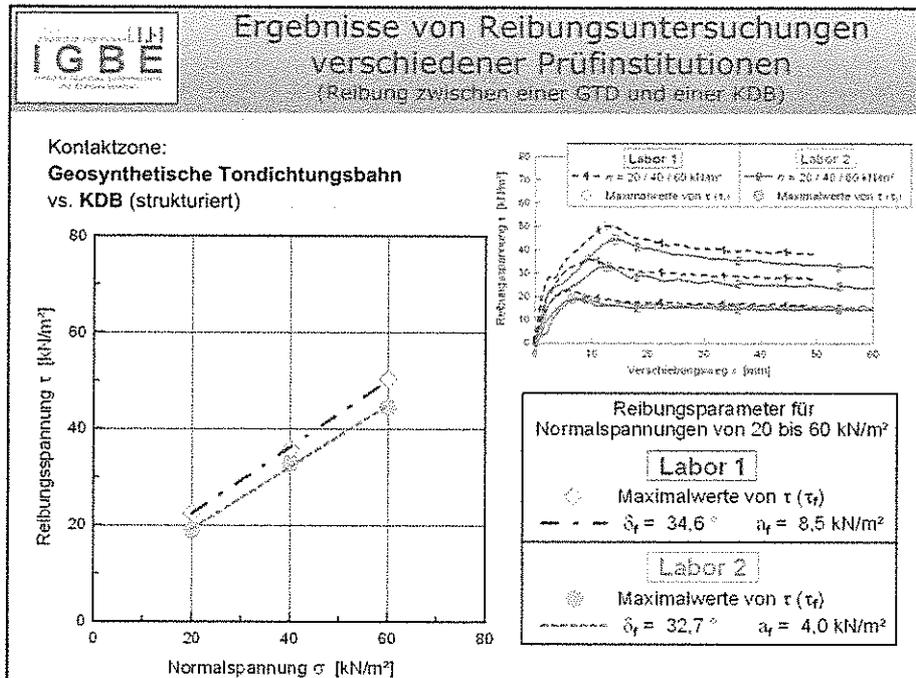
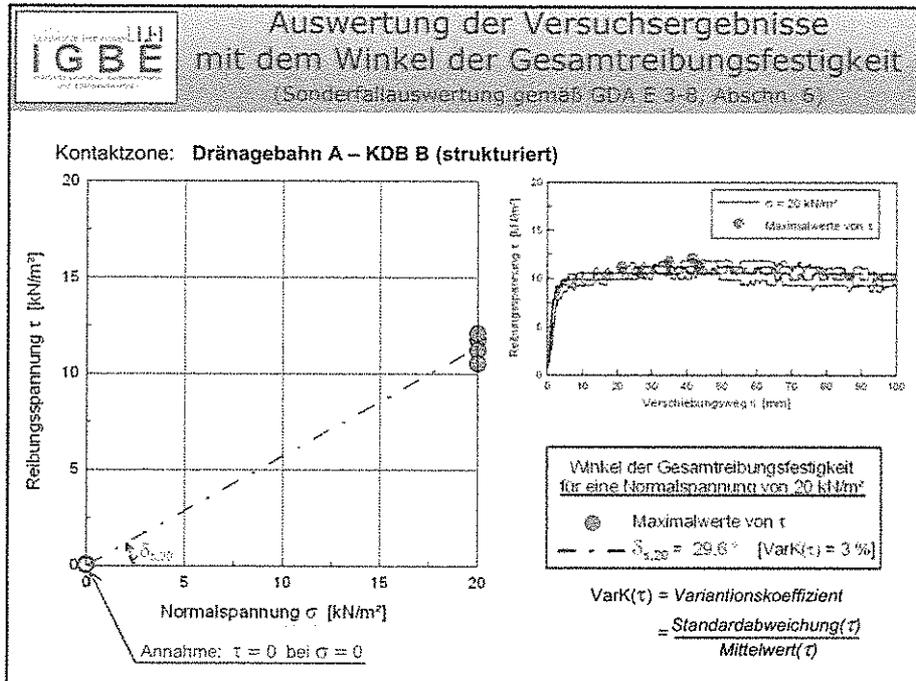
Normalspannung σ [kN/m²]

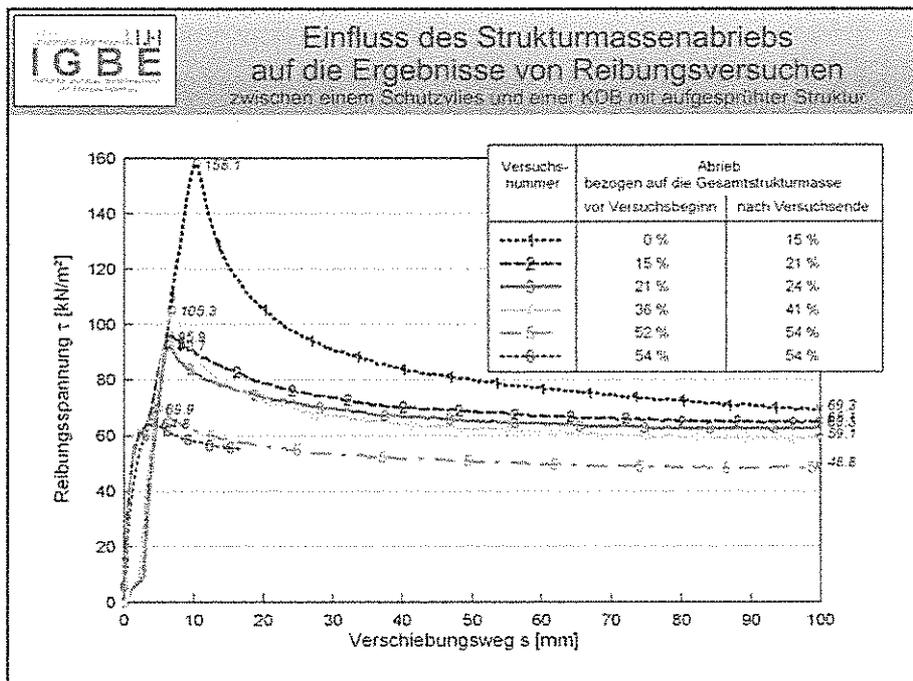
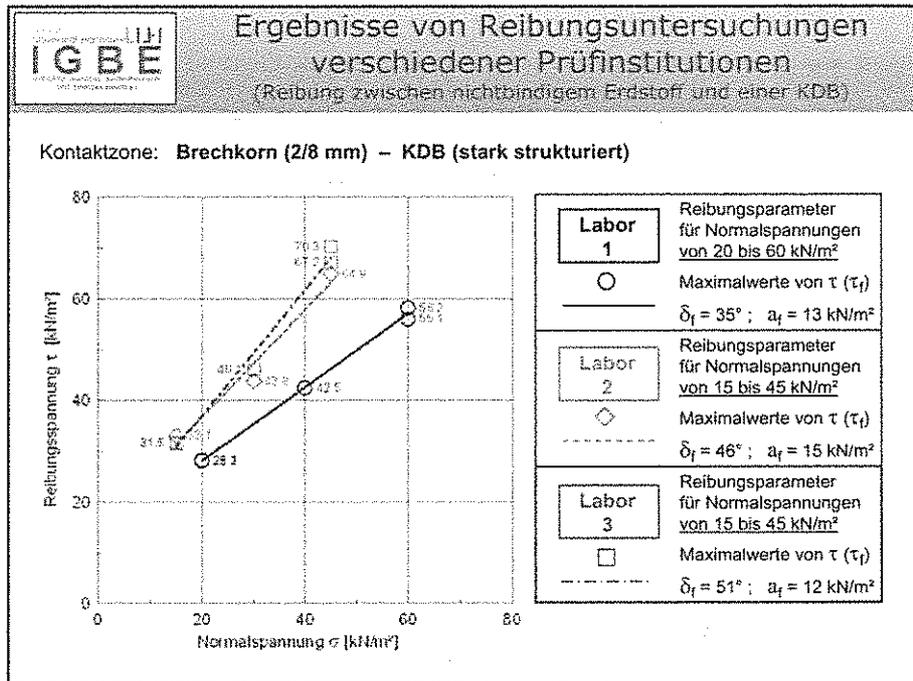
- ✗ maximal gemessene Reibungsspannung τ_f
- nichtlinearer Ansatz:**
z. B. Potenzfunktion (mit mind. 2 Parametern)
- - - linearer Ansatz: ¹⁾**
Grenzbedingung von COULOMB
 $\tau = \sigma \cdot \tan \delta + a$
mit 2 Parametern: Reibungswinkel δ ; Adhäsion a
- · - linearer Ansatz durch den Ursprung: ¹⁾**
 $\tau = \sigma \cdot \tan \delta_{s,\sigma}$
mit 1 Parameter: Ersatzreibungswinkel $\delta_{s,\sigma}$ für eine gewählte Normalspannung σ

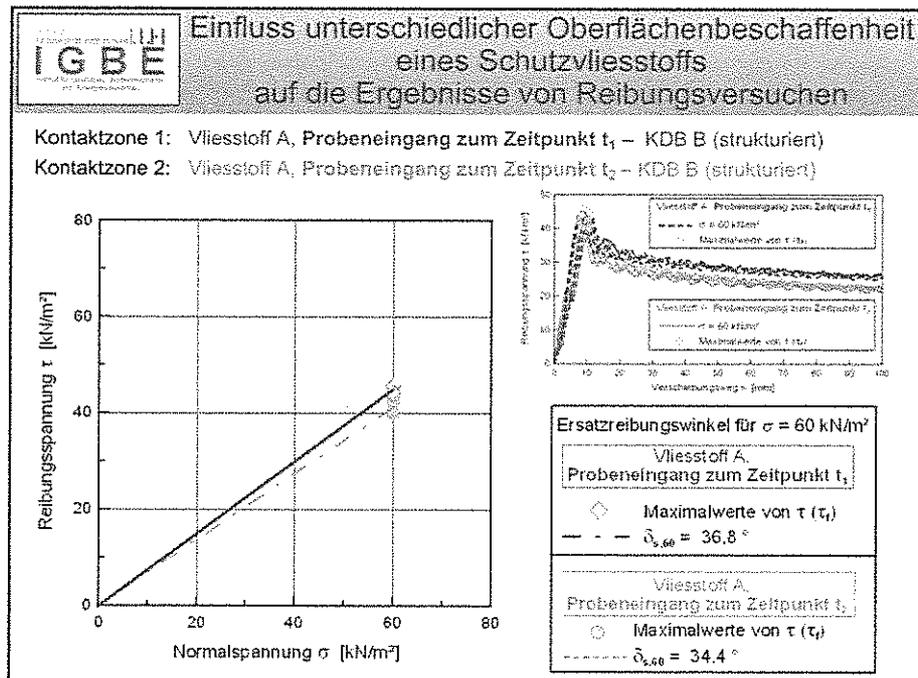
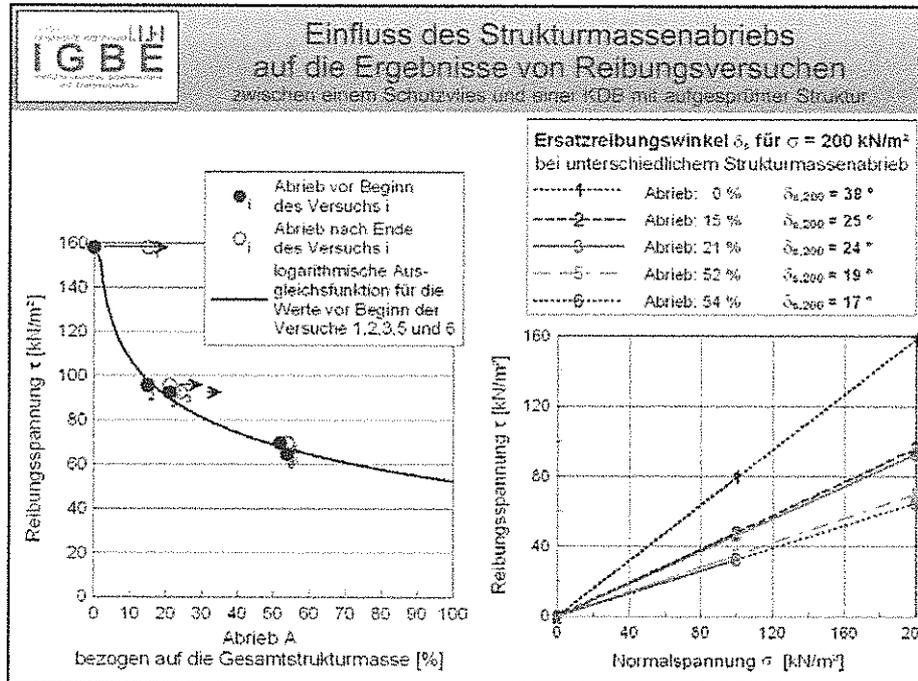
¹⁾ s. GDA E 3-8, Abschn. 6

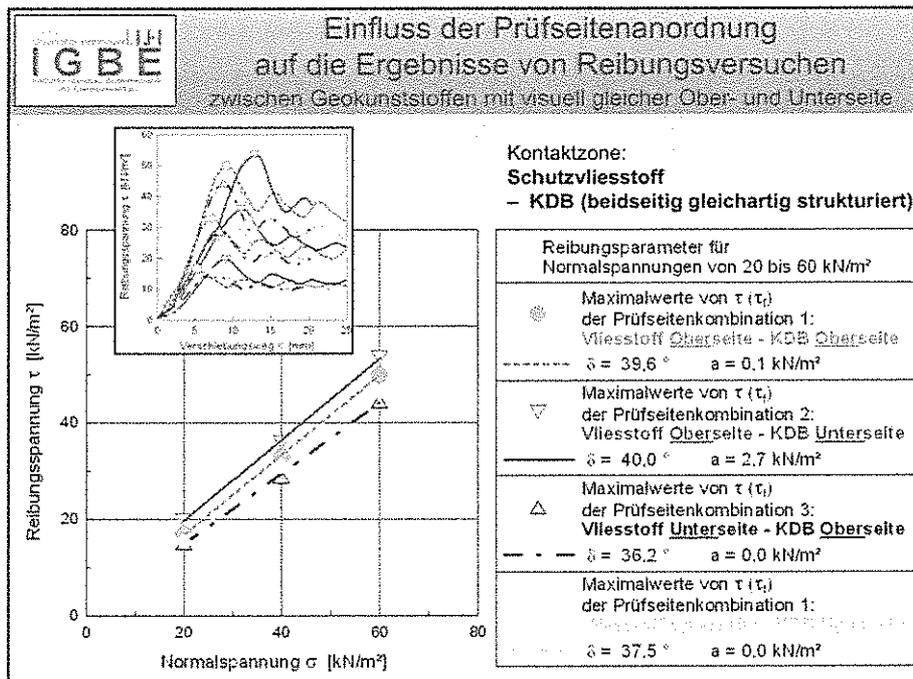
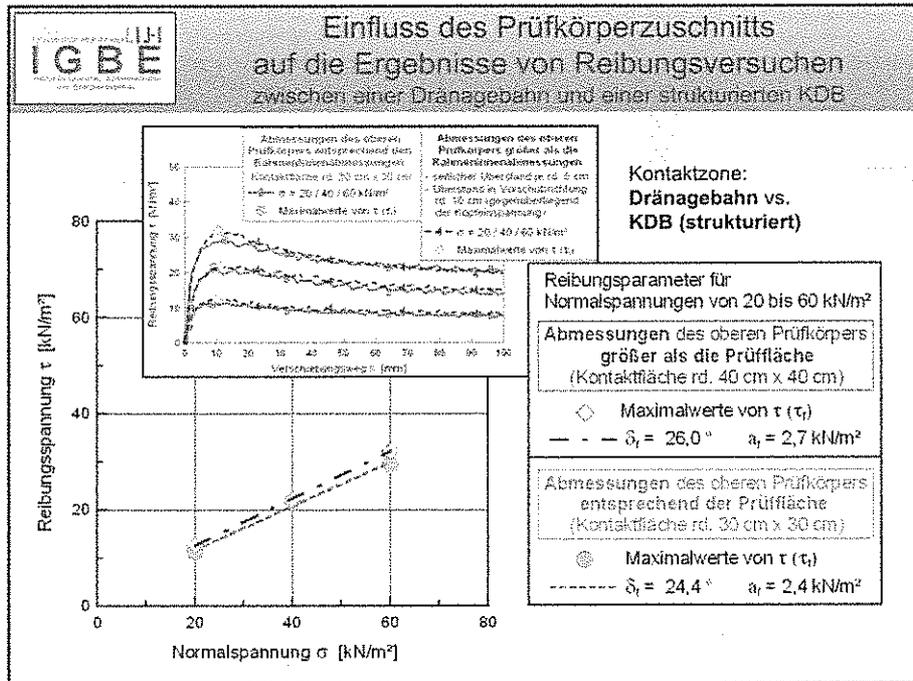


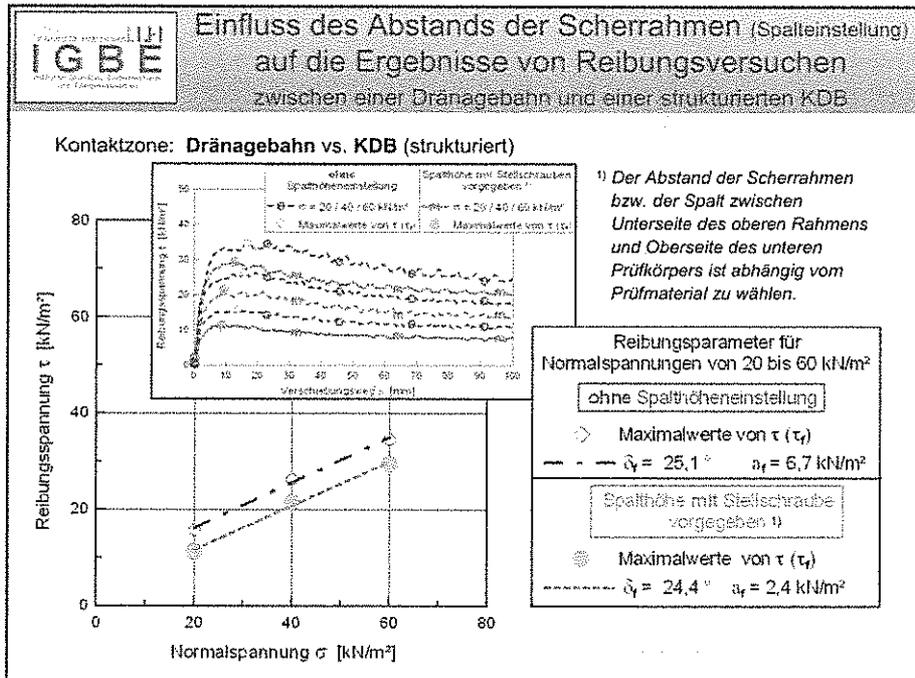
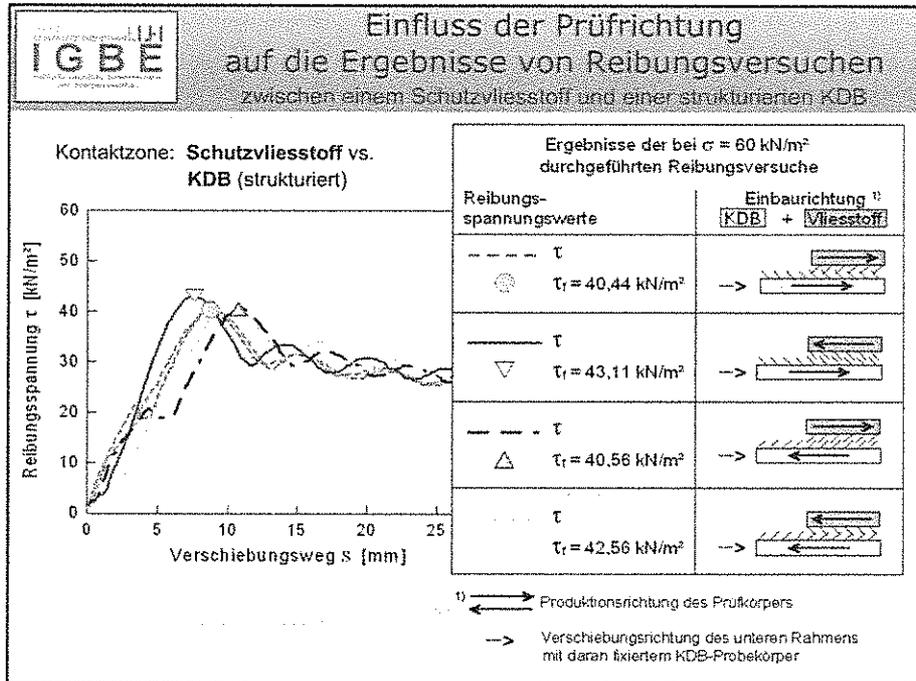


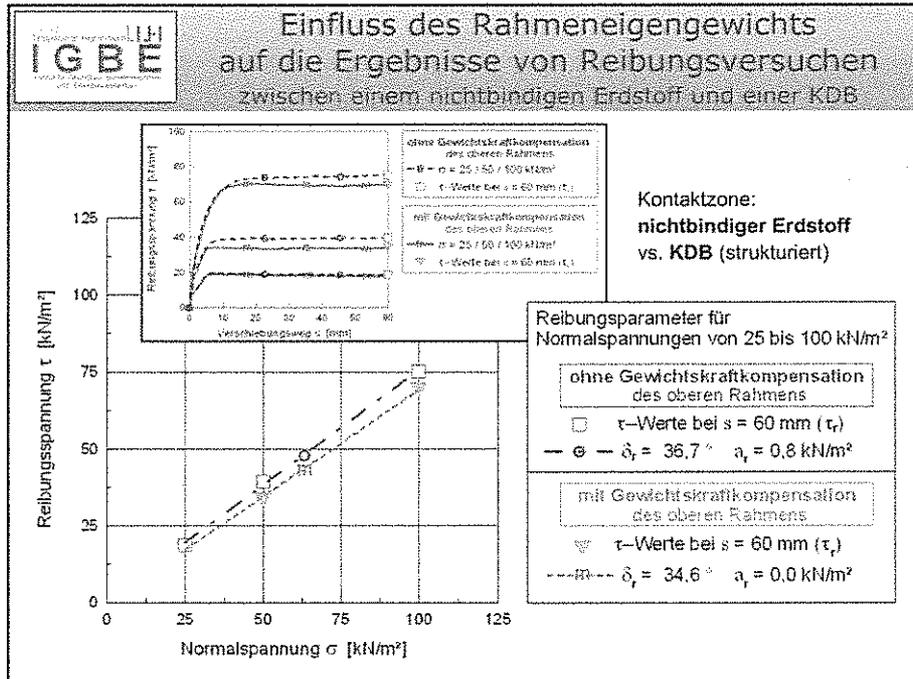












Zusammenstellung der Auswirkungen verschiedener Einflüsse auf die Messergebnisse von Reibungsversuchen

Einflussgröße	σ [kN/m²]	τ _{max} ¹⁾ [kN/m²]	τ ¹⁾ [kN/m²]	$\frac{\tau_{max} - \tau}{\tau}$	arithmetischer Mittelwert von $(\tau_{max} - \tau) / \tau$	Reibungspartner
Prüfmateriale(-mangel) bei Anlieferung	20	-	-	-	-	Schutzvliesstoff vs. KDB (strukturiert)
	40	-	-	-		
	60	44,9	41,6	8 %		
(zu großer) Probenzuschnitt	20	12,6	11,2	12 %	rd. 8 %	Dränagebahn vs. KDB (strukturiert)
	40	22,2	21,4	4 %		
	60	32,1	29,4	9 %		
(falsche) Prüfseitenanordnung	20	19,8	15,0	32 %	rd. 26 %	Schutzvliesstoff vs. KDB (strukturiert)
	40	35,9	28,8	25 %		
	60	53,4	44,3	21 %		
(keine) Spalteinstellung	20	15,8	11,2	41 %	rd. 27 %	Dränagebahn vs. KDB (strukturiert)
	40	26,2	21,4	22 %		
	60	34,6	29,4	18 %		
(fehlende) Gewichtskompensation des oberen Rahmens	25	18,7	17,7	6 %	rd. 10 %	Erdstoff vs. Schutzvliesstoff
	50	39,4	33,7	17 %		
	100	75,1	69,3	8 %		

¹⁾ τ_{max} = im mit Einflussgröße im Versuch gemessener Maximalwert der Reibungsspannung
 τ = im Referenzversuch bei Eliminieren der Einflussgröße gemessener Maximalwert der Reibungsspannung
 (Bei der Fehlerquelle „Prüfseitenanordnung“ wurde hier τ_{min} angesetzt.)

	Zur Standsicherheit von Dichtungssystemen auf Böschungen
<p>Erkenntnisse aus unseren experimentellen Untersuchungen für den Deponiebau:</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Versuchsdurchführungen, Versuchsauswertungen und Versuchsberichte müssen den <u>Vorgaben der GDA-Empfehlung E 3-8</u> entsprechen.➤ <u>Mängel des zu prüfenden Geokunststoffs</u> (Verunreinigungen, Beschädigungen, fehlende Beschriftung der Prüfseite und der Prüfrichtung) sowie <u>gerätetechnische und verfahrenstechnische Effekte im Versuch</u> sind zu beachten, da sich diese erheblich auf die Messwerte der Reibung und somit auf das Reibungsverhalten und die Reibungsparameter auswirken können. <p>Folgerungen:</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Die für das Bauvorhaben verantwortlichen Sonderfachleute für Geotechnik und Geokunststoffe müssen <u>diese Effekte</u> nach Prüfung der jeweiligen Randbedingungen <u>durch Festlegung angemessener Sicherheitszuschläge berücksichtigen</u>.➤ Nur <u>bei sehr gründlicher Qualitätskontrolle und Materialprüfung sowie bei qualifizierten</u> und auf die Verhältnisse in situ entsprechend abgestimmten experimentellen <u>Reibungsuntersuchungen</u> sind <u>Zuschläge</u> bei den Sicherheitsbeiwerten <u>verzichtbar</u>.	