

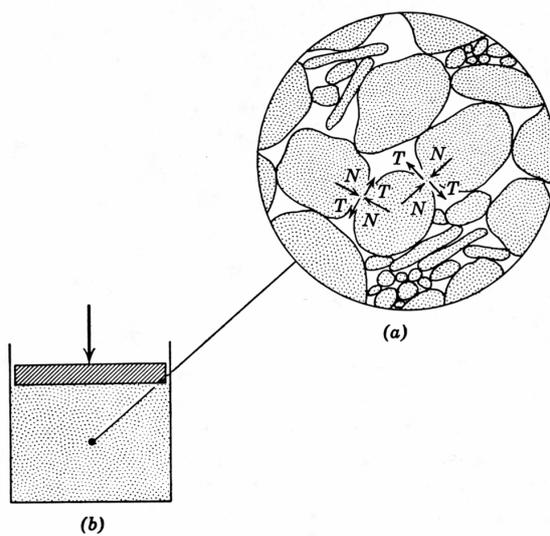
Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle
Institut für Geotechnik, Professur für Bodenmechanik und Grundbau

Scherverhalten

Bodenmechanik und Grundbau

Version: 27. Mai 2020

Kräfteübertragung im Korngerüst



(Lambe & Whitman, 1969)

Kräfteübertragung über die Reibungskontakte

Reibung zwischen zwei starren Körpern

Klassisches Reibungsgesetz:

Leonardo da Vinci (1452-1519), Guillaume Amontons (1663-1705)

Die einer Gleitbewegung zwischen zwei Flächen entgegenwirkende Widerstandskraft ist proportional zur Normalkraft, mit der beide aufeinandergepresst werden.

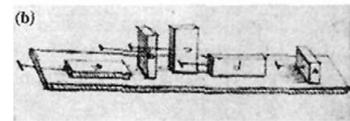
Charles Coulomb (1736-1806):

Reibung entsteht durch Verzahnung und hängt nicht von der Gleitgeschwindigkeit ab.

Bei Relativbewegung:

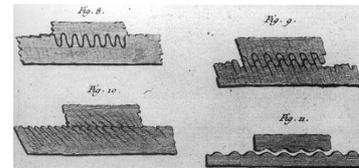
- T ist proportional zu N
- T ist unabhängig von der Kontaktfläche
- T ist unabhängig von der Geschwindigkeit

Experimente von da Vinci



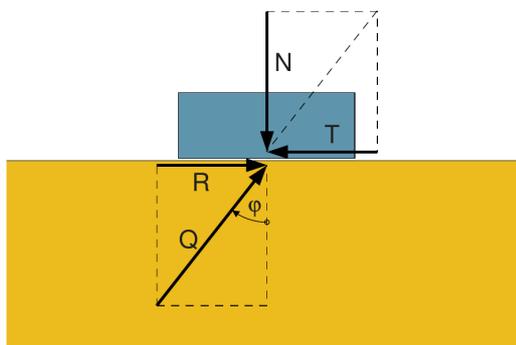
(Krim, 2002)

Skizzen von Coulomb



(Krim, 2002)

Reibung zwischen zwei starren Körpern



(Kolybas, 2019)

Körper wird nicht wegrutschen, solange $T < T_f$ ist

Haften: $T < N \tan \varphi$

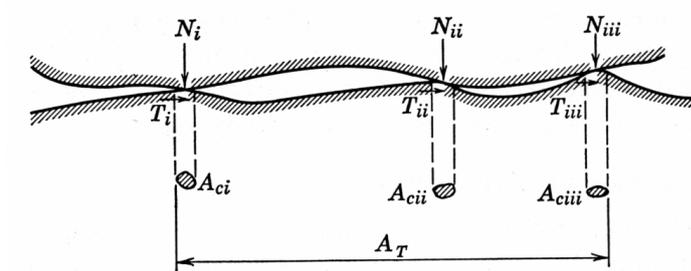
Gleiten: $T = N \tan \varphi = T_f$

$T_f = \mu N$, $\mu = \tan \varphi$, φ : Reibungswinkel

$T > N \tan \varphi$? \rightsquigarrow Starrkörper wird beschleunigt! $(\Delta T = T - T_f = T - N \tan \varphi = m \cdot a)$

Feststoffoberfläche

Vergrößerung der Kontaktfläche



(Lambe & Whitman, 1969)

Tribologie

Haften und Gleiten

Tribologie: Wissenschaft über die Reibung

neue Erkenntnisse: **Reibung hängt mit Haftung zusammen!**

„neue“ Reibungsgesetze:

1. *Reibungskraft ist proportional zur tatsächlichen (statt zur scheinbaren) Kontaktfläche*
(die tatsächliche Kontaktfläche nimmt in den meisten Fällen proportional zur Auflagekraft zu)
2. *Reibungskraft hängt von Irreversibilität der Kontakthaftung ab*
(Verhältnis zwischen der Leichtigkeit, mit der zwei Flächen aneinander haften, und der, mit der sie sich trennen lassen)
3. *Reibungskraft wächst linear mit der Verschiebungsgeschwindigkeit an den tatsächlichen Berührungspunkten*

Scherbeanspruchung

Scherfestigkeit

Schubspannungen τ treten praktisch bei jedem Spannungszustand auf (mit Ausnahme des hydrostatischen Spannungszustands) und führen zu Gestaltänderung

für Hauptspannungen $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ lassen sich immer Koordinatensysteme finden, bezüglich derer Schubspannungen nicht verschwinden

maximale Schubspannung wird **Scherfestigkeit** τ_f genannt: $\tau \leq \tau_f$ (s. Reibung zwischen 2 starren Körpern)

beim Erreichen der Scherfestigkeit:

- Material kann keine weitere Steigerung der Schubspannung ertragen
- Material kann bei konstanter Spannung weiter deformiert werden
- meistens entsteht eine **Gleitfläche** (Scherzone), über welche sich zwei Materialblöcke gegeneinander verschieben

Scherfestigkeit eines Korngerüsts

Innere Reibung

Scherfestigkeit eines Korngerüsts (Bodens) aus der *inneren* Reibung

Für jede Schnittebene muss gelten:

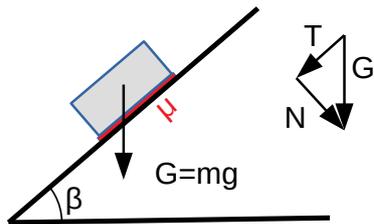
$$\frac{\tau}{\sigma} \leq \tan \varphi$$

(τ : Schub- und σ : Normalspannung auf der Schnittebene)

φ : **Winkel der inneren Reibung**, meistens nur als **Reibungswinkel** bezeichnet

Scherfestigkeit eines Korngerüsts

Vergleich zwischen Blockgleiten und Scherzone (Schüttwinkel)

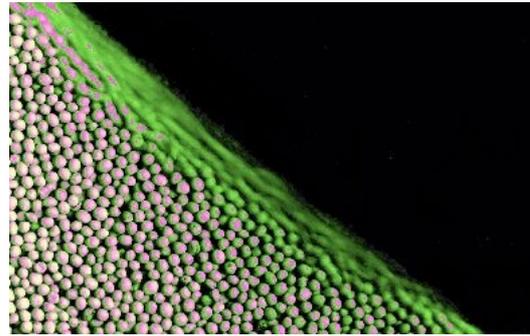


Reibung: $\mu = \tan \varphi$

beim Gleiten: $T = N \tan \varphi$

$$\rightsquigarrow \tan \varphi = \frac{T}{N} = \frac{G \sin \beta}{G \cos \beta} = \tan \beta,$$

d.h. Gleiten für $\beta = \varphi$



(Granular Matter)

Scherung bei sehr großer Scherverformung
(Restreibungswinkel)

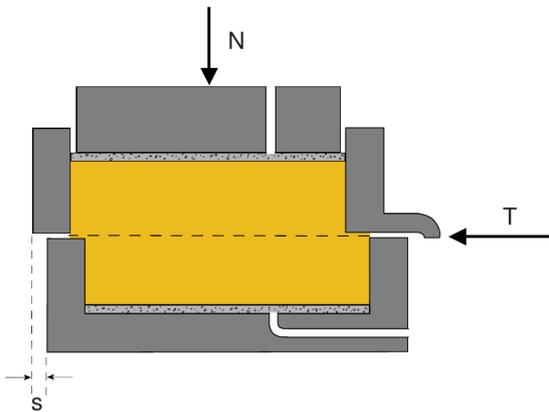
Bestimmung der Scherfestigkeit

Schüttwinkel



Direkter Scherversuch

Rahmenschersversuch



↔ gegenseitige Verschiebung s zwei „Bodenblöcke“ im Metallrahmen (Analogie zu starren Festkörpern)

konstante Normallast N während des Versuchs (kein eingestellt werden)

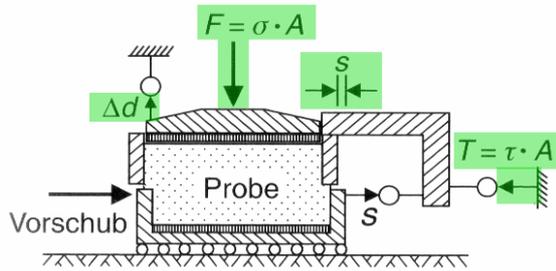
Direkter Scherversuch

Rahmenschersversuch

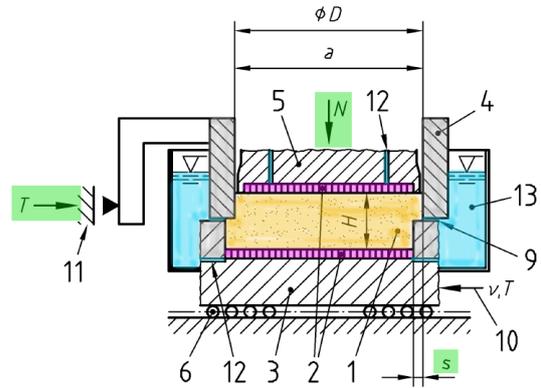
- eingeführt vermutlich durch Krey (1926) und Casagrande (1931)
- erzwungene Scherfläche parallel zur größten Seitenfläche der untersuchten Probe
- Entstehung der Scherfläche durch eine Relativverschiebung der zwei übereinander liegenden starren Rahmen, die den Probekörper einschließen
- Probekörper kann quaderförmig oder zylindrisch sein
- Normalspannung auf der Scherfläche bleibt während des Scherversuchs konstant
- keine Kontrolle der Drainagenbedingungen möglich ↔ Versuch muss so langsam durchgeführt werden, dass keine Porewasserdrücke entstehen!
- DIN EN ISO 17892-10: Laborversuche an Bodenproben – Teil 10: Direkte Scherversuche (bis 2019 DIN 18137-3: Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch)

Rahmenscherversuch

Scherkasten



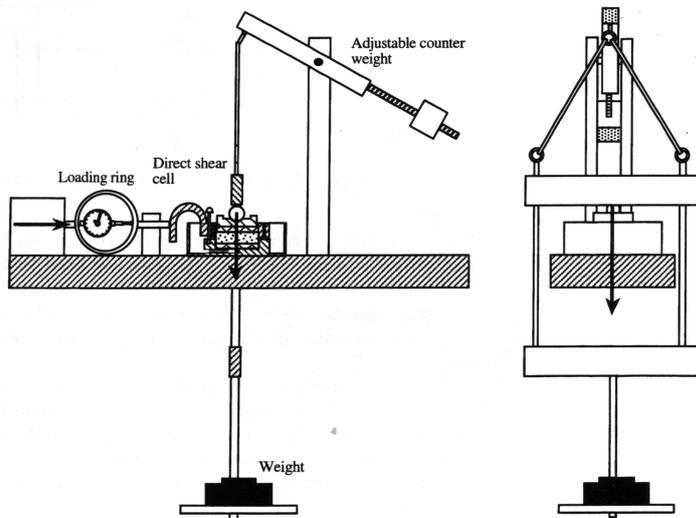
(Achmus, 2013)



(DIN 18137)

Rahmenscherversuch

Rahmenschergerät mit Belastungseinrichtung



(Bardet, 1997)

Rahmenscherversuch

Versuchsdurchführung

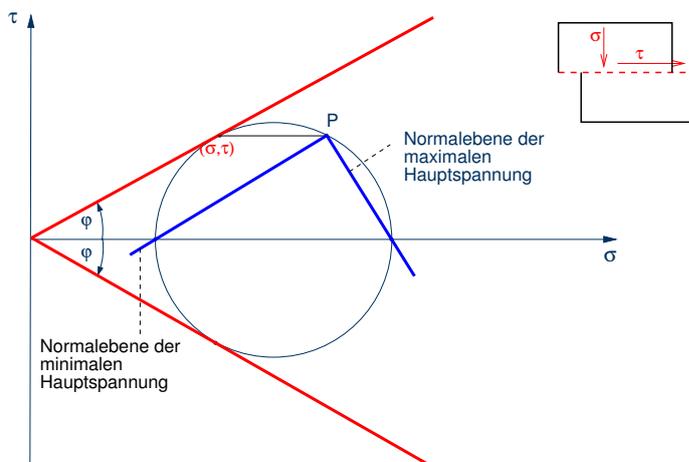
Video

- <https://www.youtube.com/watch?v=F6pNFPaqqE0> ... Direct Shear Test (UWA)

Rahmenscherversuch

Spannungsgrenz Zustand (Versagen)

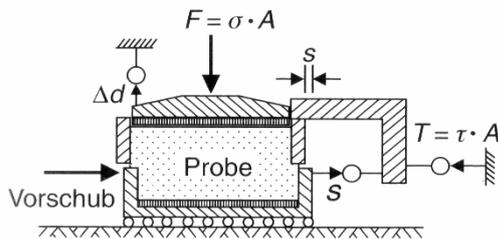
im Grenzzustand: $(\tau/\sigma)_{max} = \tan \varphi$ (falls keine Kohäsion)



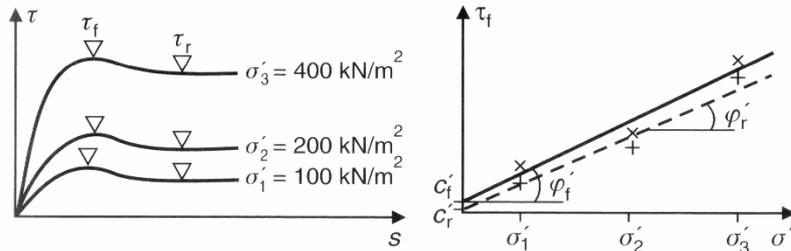
vor dem Erreichen des Grenzzustands: unbekannter Spannungszustand in der Probe

Rahmenscherversuch

Ergebnisse einer Versuchsserie (3 unterschiedliche Normalspannungen)



Versuchsergebnisse:

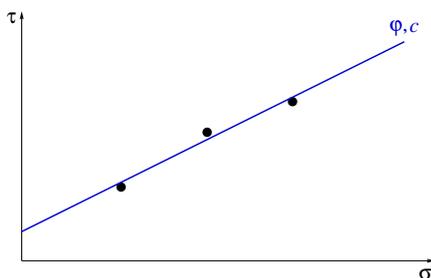


(Achmus, 2013)

Rahmenscherversuch

Ergebnisse einer Versuchsserie (3 unterschiedliche Normalspannungen)

Punkte: maximaler Scherwiderstand (Grenzzustand) auf einer erzwungenen Gleitfläche



Bestimmung der Scherfestigkeit:

$$\tau_{max} = \sigma' \tan \varphi' + c'$$

→ sog. **Mohr-Coulombsche Grenzbedingung**

Annahme einer Grenzgerade
(linearer Zusammenhang zwischen τ und σ)

Versuchsdurchführung bei **dränierten** Bedingungen (langsame Schergeschwindigkeit, damit Wasser aus den Poren abfließen kann, ohne Bildung von zusätzlichen Porenwasserdrücken)

→ Bestimmung der **dränierten Scherfestigkeit** mit den **effektiven** Scherparametern φ' (Reibungswinkel) und c' (Kohäsion)

(effektive Spannung = totale Spannung **abzüglich** Porenwasserdruck: $\sigma' = \sigma - u$)

Scherfestigkeit

Kohäsion

Mohr-Coulombsche Grenzbedingung: $\tau_{max} = \sigma' \tan \varphi' + c'$

effektive Kohäsion c' : Komponente der Scherfestigkeit, die unabhängig von der Normalspannung ist

mögliche Quellen der Kohäsion bei Böden:

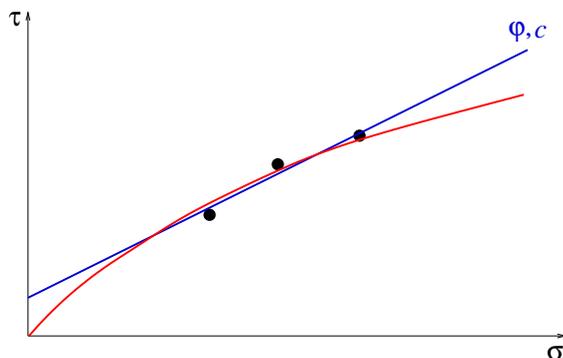
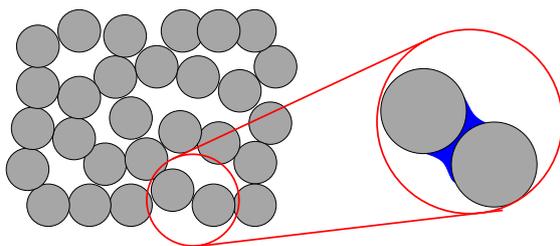
- **Kapillarität**
(verschwindet, sobald die Bodenprobe austrocknet ($w = 0$) oder voll gesättigt wird ($w = w_{max}$))
- chemische Bindungen („**Zementierung**“)
- elektrochemische Anziehung der einzelnen Körner bei Ton (i.d.R. sehr gering)

Scherfestigkeit

Kohäsion

häufigste Ursachen für die Feststellung der sog. Kohäsion

- Kapillarkräfte infolge Teilsättigung (und somit eigentlich Erhöhung der Normalspannung zwischen den Körnern)
- Annahme einer Gerade als Spannungsgrenzbedingung (obwohl in Wirklichkeit der Verlauf nichtlinear ist)



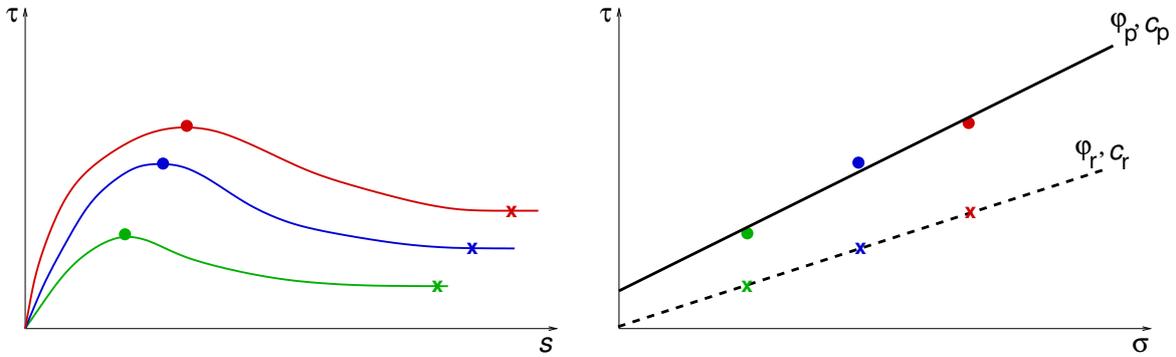
Scherfestigkeit

Abhängigkeit von der Verschiebung

Scherfestigkeit hängt vom Betrag der Verschiebung s ab

↪ maximale Scherfestigkeit φ' und c' (**Peakscherfestigkeit**: φ'_p und c'_p)

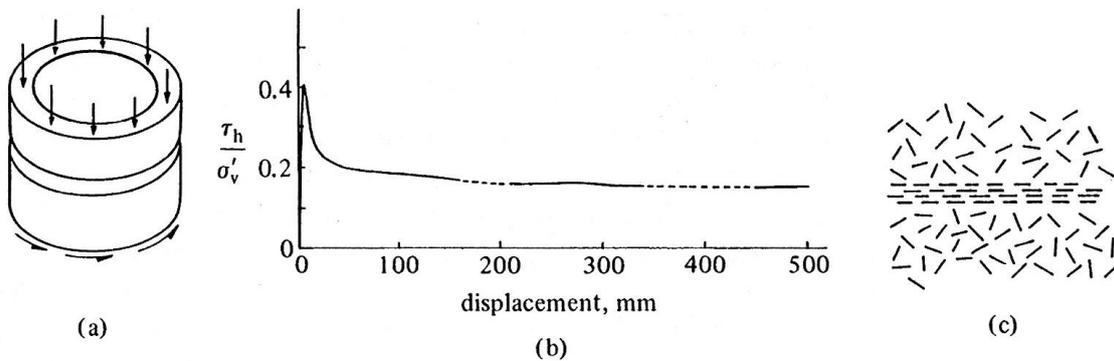
↪ **Restscherfestigkeit**, bzw. residuelle Scherfestigkeit (φ'_r und $c'_r = 0$)
für kleinere Verschiebungsbeträge wird sie auch **kritische Scherfestigkeit** genannt (φ'_c und $c'_c = 0$)



Kreisringscherversuch

„Endlosschergerät“ (bei feinkörnigen Böden)

Bestimmung der Restscherfestigkeit durch große Scherverschiebung (vor allem beim Ton)



(Muir Wood, 1990)

durch Scherung ↪ Struktur (Orientierung) der Bodenpartikel in Richtung der Scherzone

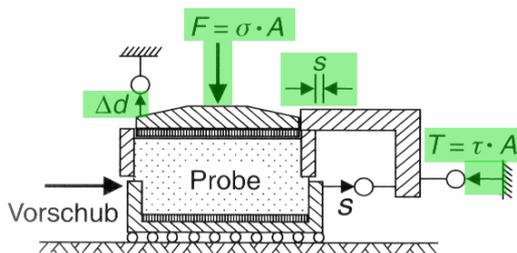
Scherfestigkeit

Erfahrungswerte für Reibungswinkel und Kohäsion

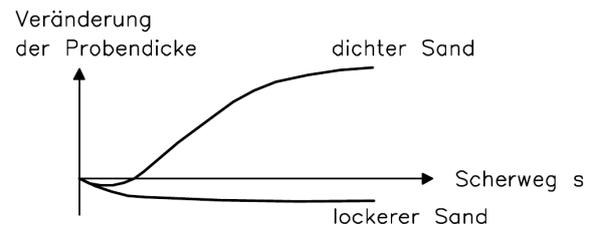
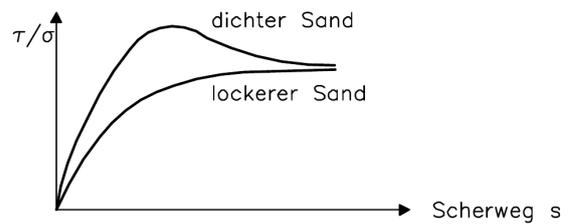
- grobkörnige („nichtbindige“) Böden:
 φ' in $[\circ]$: 30 – 40
(je nach Lagerungsdichte und Korngröße)
 $c' = 0$
- feinkörnige („bindige“) Böden
 φ' in $[\circ]$: 15 – 30
(je nach Korngröße und Mineralogie)
 φ'_r kann bis auf 7° heruntersinken
 $c' = 0 - 25 \text{ kPa}$
(je nach natürlicher Zementierung des Bodens)

Scherfestigkeit

Einfluss der Lagerungsdichte



(Achmus, 2013)

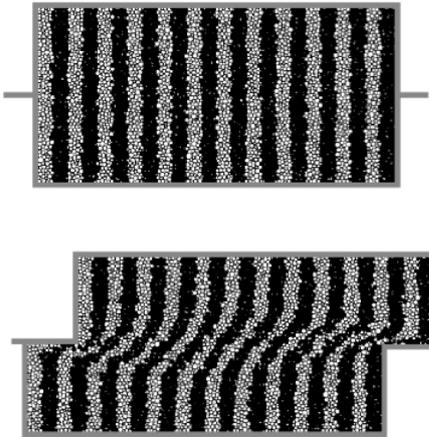


(Kolybas, 2019)

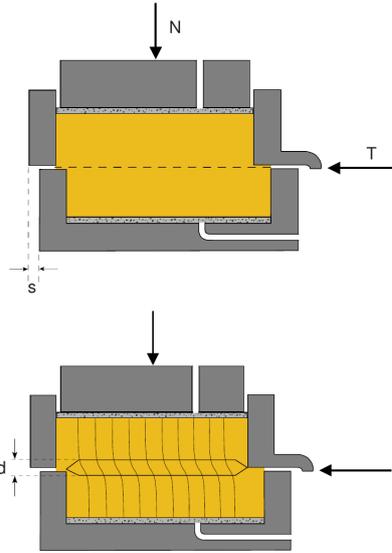
Änderung der Probenhöhe während der Scherung (in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte)

Rahmenscherversuch

Scherzone



DEM-Simulation (Zhang & Thornton, 2007)



(Kolymbas, 2019)

Die Scherfläche ist in Wirklichkeit eine **Scherzone** mit einer bestimmten Dicke!

Aufbau von Korngerüst

Lagerungsdichte

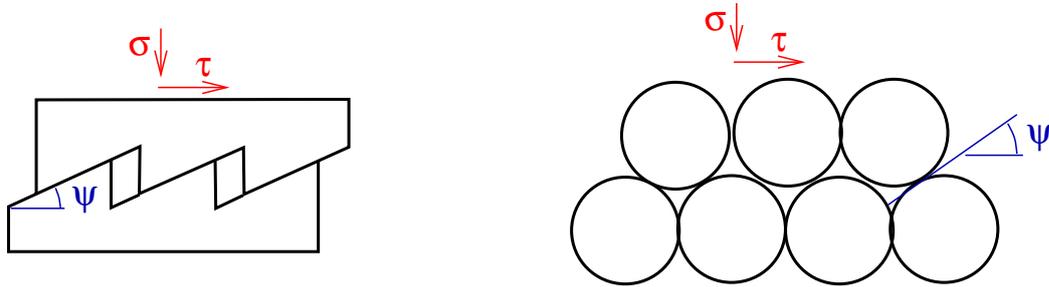
lockere und dichte Packung eines Korngerüsts



Scherdeformation

Kontraktanz und Dilatanz

Auflockerung bzw. Verdichtung des Bodens während Scherdeformation bei konstanter Normalspannung



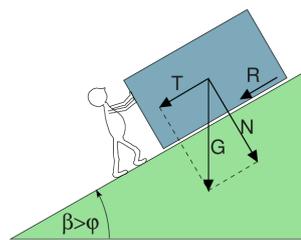
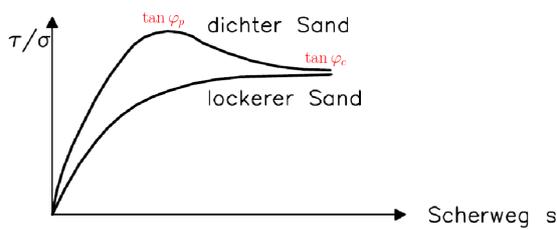
anfangs lockere Probe → Verdichtung =Kontraktanz

anfangs dichte Probe → Auflockerung =Dilatanz

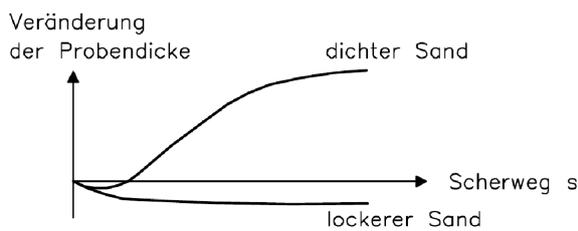
ψ : Dilatanzwinkel

Scherfestigkeit

Einfluss der Dilatanz



(Kolymbas, 2019)



Blockgleiten nach oben:

$$R + T = \underbrace{G \cos \beta \tan \varphi}_{N} + G \sin \beta$$

$$\rightsquigarrow \frac{R + T}{N} = \tan(\varphi + \beta)$$

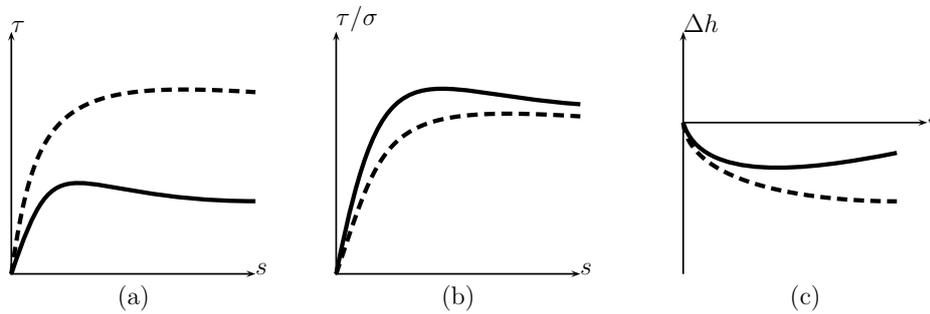
Boden:

$$\left(\frac{T}{\sigma}\right)_{max} = \tan \varphi'_p \approx \tan(\varphi'_c + \psi) \quad (\text{für } c = 0)$$

Rahmenscherversuche

Einfluss der Normalspannung

gleiche Anfangsdichte, unterschiedliche Normallast $\sigma - \sigma^{(1)}$: durchgezogen, $\sigma^{(2)} > \sigma^{(1)}$: strichliert



Auswirkung der Zunahme von Normalspannung σ :

↪ Abnahme von τ_{max}/σ (d.h. Abnahme von φ')

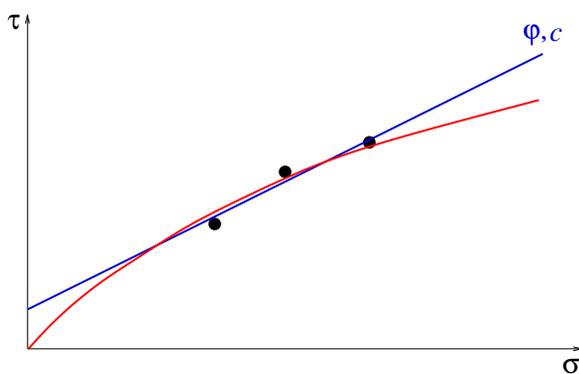
↪ Unterdrückung der Auflockerung (Dilatanz)

bei dicht gelagerten bzw. überkonsolidierten Böden

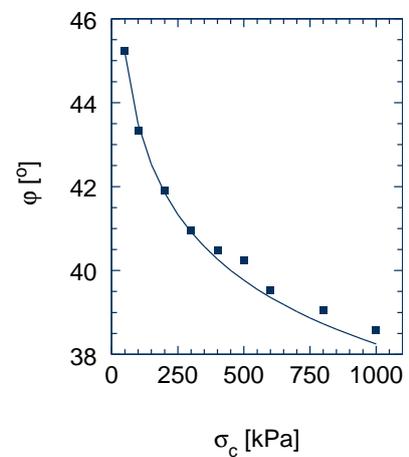
Einfluss der Normalspannung

Nichtlineare Spannungsgrenzbedingung

Abnahme des Reibungswinkels mit der Zunahme der Normalspannung führt zu einer gekrümmten Spannungsgrenzbedingung (rot)



experimenteller Spannungsbereich oft zu schmal um die Krümmung festzustellen



dichter Karlsruher Sand (Wu, 1992)