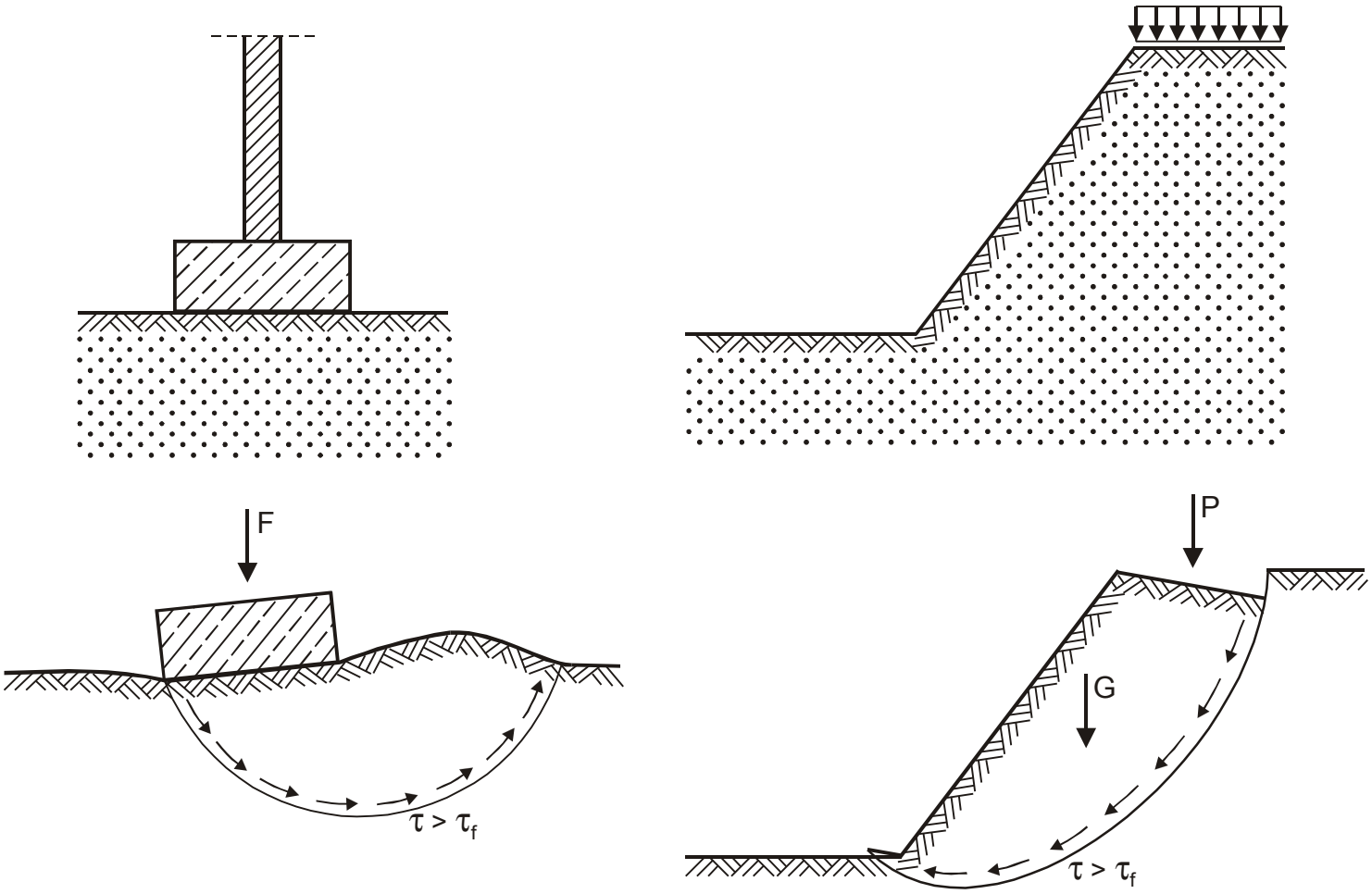
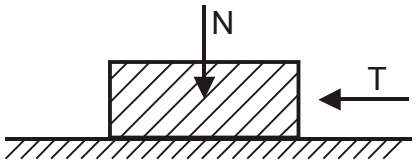
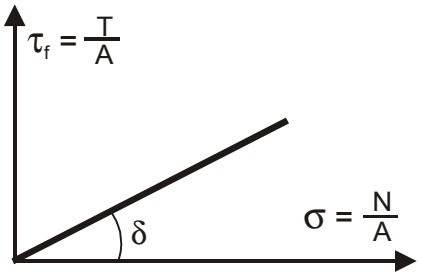

F
τ > τf
P
G
τ > τf

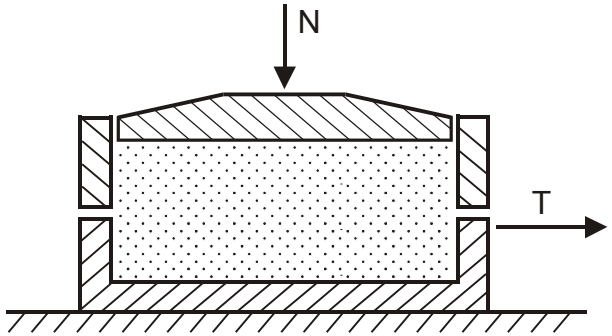
Reibungsproblem: $T_f = \mu N$

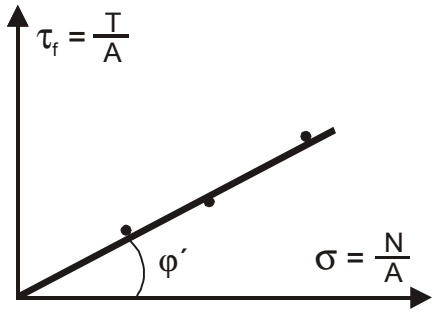




$\tau_f = \sigma \tan \delta$
$\mu = \tan \delta$

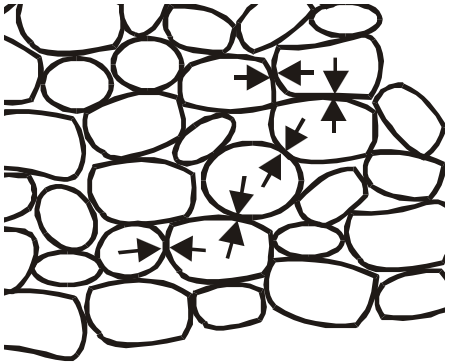
Boden (Sand): Direkter Scherversuch



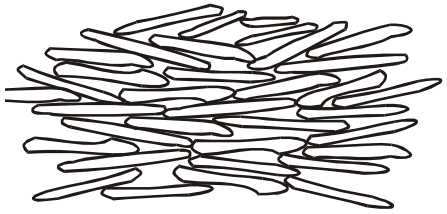


$\tau_f = \sigma \tan \varphi'$

Bodenstrukturen



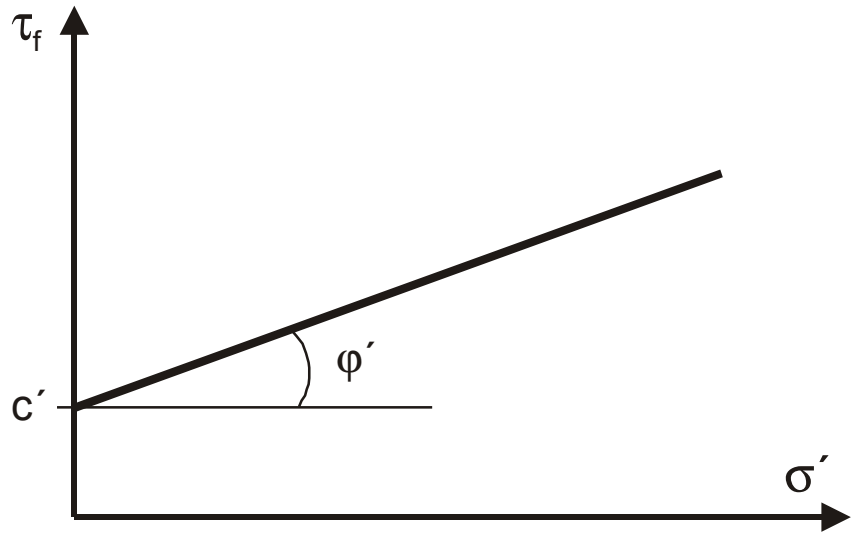
Sand / Kies:
Große Körner; Verhalten wird durch Korn-zu-Korn-Spannung (Reibung) bestimmt



Ton:
Kleine „Körner“ (Plättchen); aus Oberflächenladungen der Tonminerale resultiert Anziehungskraft
→Festigkeit auch ohne Normalspannung (Kohäsion)

Bruchgesetz von MOHR-COULOMB (Schergesetz):

$$t_f = s' \tan j' + c'$$



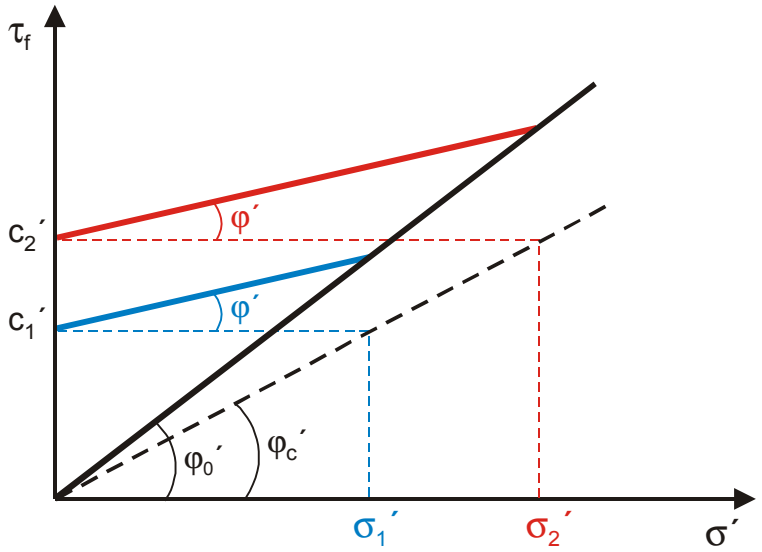
Wesen der Kohäsion:
Kohäsion ist vorbelastungsabhängig

Erstkonsolidierter Boden:

$$c' = s' \tan \varphi_c'$$

$$\Rightarrow \quad \tau_f = s' \left(\tan \varphi' + \tan \varphi_c' \right)$$

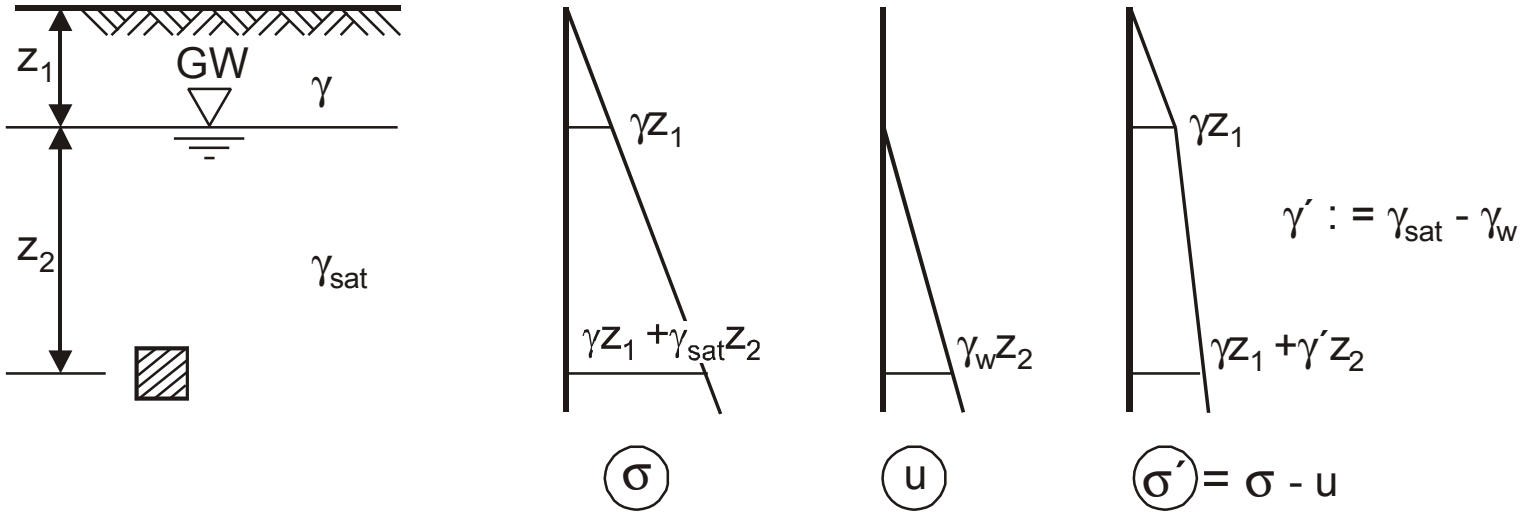
$$= s' \tan \varphi_0'$$



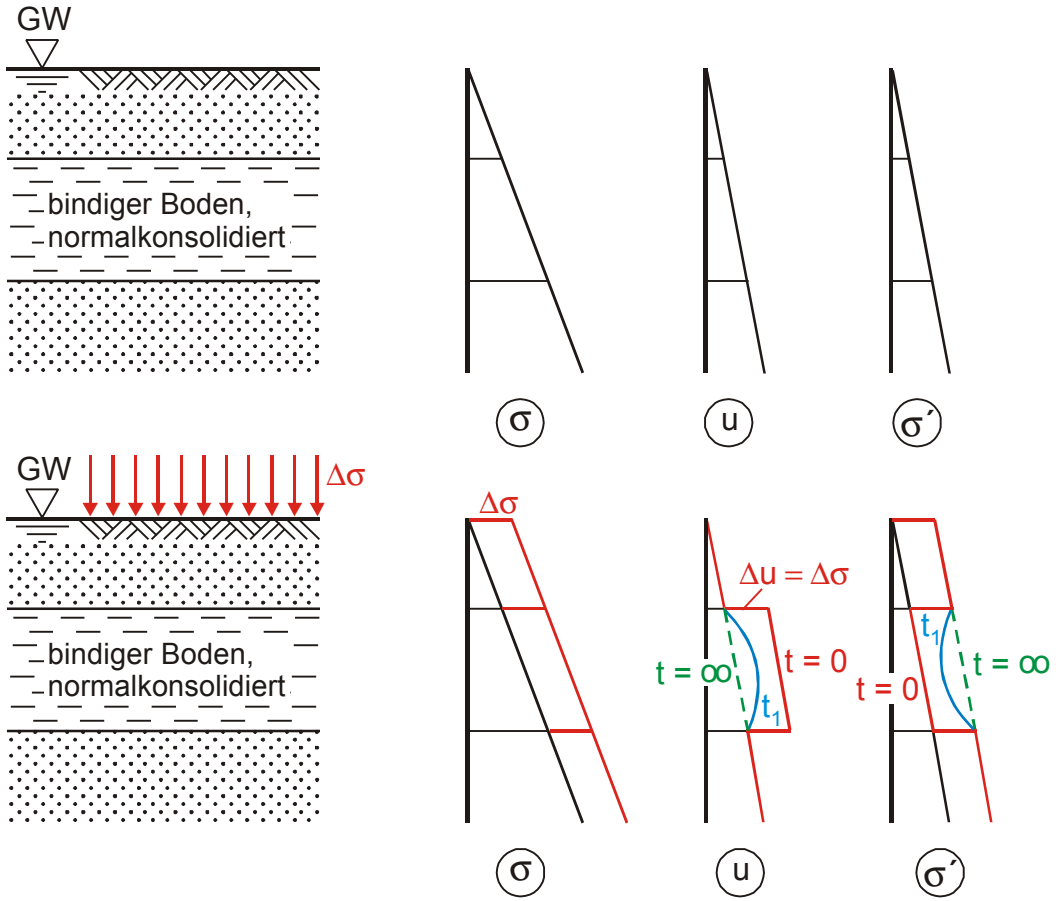
Konzept der effektiven Spannung

Hypothese: Für den Reibungsanteil der Scherfestigkeit ist nur der vom Korngerüst getragene Anteil der Normalspannung σ‘ maßgebend

$$\sigma' = \sigma - u$$



Einfluss des Porenwasserdrucks auf die Scherfestigkeit



$$\Delta u = B\,\Delta s \qquad B \approx 1$$ bei schneller Belastung und vollständiger Sättigung

Scherfestigkeit bei schneller Belastung

Probe konsolidiert unter σ_0‘, Belastung mit $\Delta\sigma \rightarrow \Delta\sigma' = K\,\Delta\sigma \quad (0 \le K \le 1)$

$$\tau_f = \begin{cases} \sigma_V' \tan\varphi_c' + (\sigma_0' + K\,\Delta\sigma)\tan\varphi'; & \sigma_V' \ge \sigma_0' + K\,\Delta\sigma \quad \text{(OC)} \\ (\sigma_0' + K\,\Delta\sigma)\tan\varphi_c' + (\sigma_0' + K\,\Delta\sigma)\tan\varphi'; & \sigma_V' < \sigma_0' + K\,\Delta\sigma \quad \text{(NC)} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \tau_f = \begin{cases} \sigma_V' \tan\varphi_c' + \sigma_0' \tan\varphi' + K\,\Delta\sigma\,\tan\varphi'; & \sigma_V' \ge \sigma_0' + K\,\Delta\sigma \\ \sigma_0' \tan\varphi_c' + \sigma_0' \tan\varphi' + K\,\Delta\sigma\,(\tan\varphi_c' + \tan\varphi'); & \sigma_V' < \sigma_0' + K\,\Delta\sigma \end{cases}$$

$$:= \quad c_u \quad + \quad \Delta\sigma \quad \tan\varphi_u$$

(Ansatz für die undränierte Scherfestigkeit; d.h. keine Berücksichtigung von Porenwasserüberdrücken → Totalspannung $\Delta\sigma$!)

$$\tau_f = \begin{cases} \sigma_V' \tan\varphi_c' + \sigma_0' \tan\varphi' + K\,\Delta\sigma\ \tan\varphi'; & \text{(OC)} \\ \sigma_0' \tan\varphi_c' + \sigma_0' \tan\varphi' + K\,\Delta\sigma\ (\tan\varphi_c' + \tan\varphi'); & \text{(NC)} \end{cases}$$

$$:= \quad c_u \quad + \quad \Delta\sigma \quad \tan\varphi_u$$

Koeffizientenvergleich:

OC: $\tan\varphi_u = K \tan\varphi'$

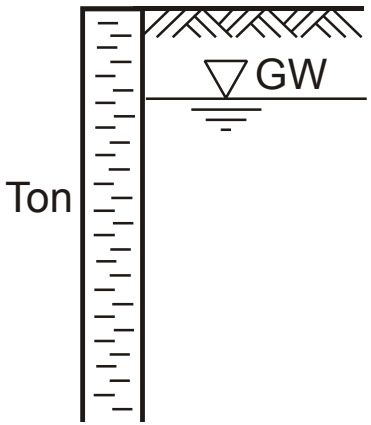
$c_u = c' + \sigma_0' \tan\varphi'$

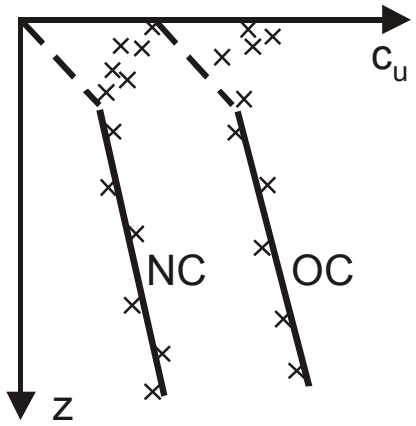
NC: $\tan\varphi_u = K \tan\varphi_0'$

$c_u = \sigma_0' \tan\varphi_0'$

$(\tan\varphi_0' = \tan\varphi_c' + \tan\varphi')$

(K=1: Boden für Δσ vollständig konsolidiert,
K=0: vollständig unkonsolidiert)





Tiefenabhängigkeit der
undränierten Kohäsion

Scherfestigkeitsansätze:

(1) $\tau_f = \sigma' \tan \varphi' + c'$ — Dränierte Zustände

(2) $\tau_f = c_u$ — Vollständig undränierte Zusatzbelastung

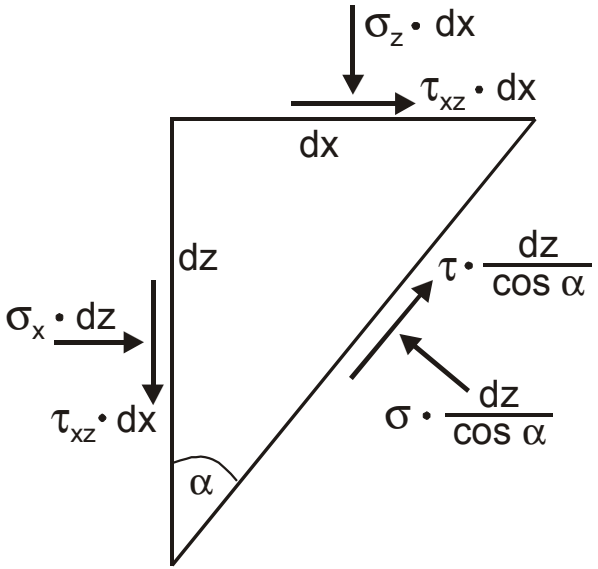
(3) $\tau_f = c_u + \Delta c_u$ — Teilweise dränierte Zusatzbelastung, $0 < K < 1$

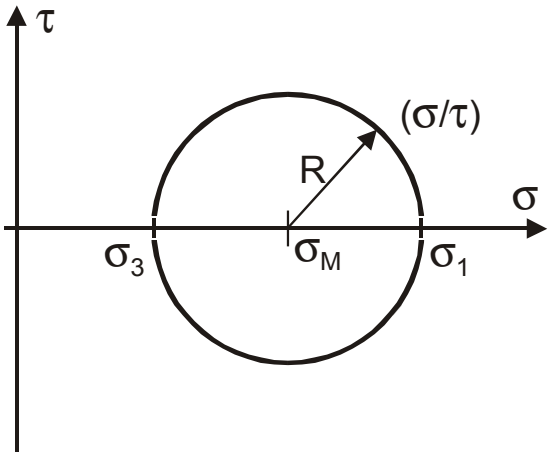
$\Delta c_u \approx K \, \Delta \sigma \, \tan \varphi'$

Nachweis mit (1) immer führen; zusätzlich mit (2) bzw. (3) nur bei bindigen Böden, wenn Porenwasserüberdrücke zu erwarten sind

MOHRscher Spannungskreis

$$\Sigma H = 0;\ \Sigma V = 0 \rightarrow \underbrace{\left(\sigma - \left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right)\right)^2}_{\sigma_M} + \tau^2 = \underbrace{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2}_{R^2} + \tau_{xz}^2$$

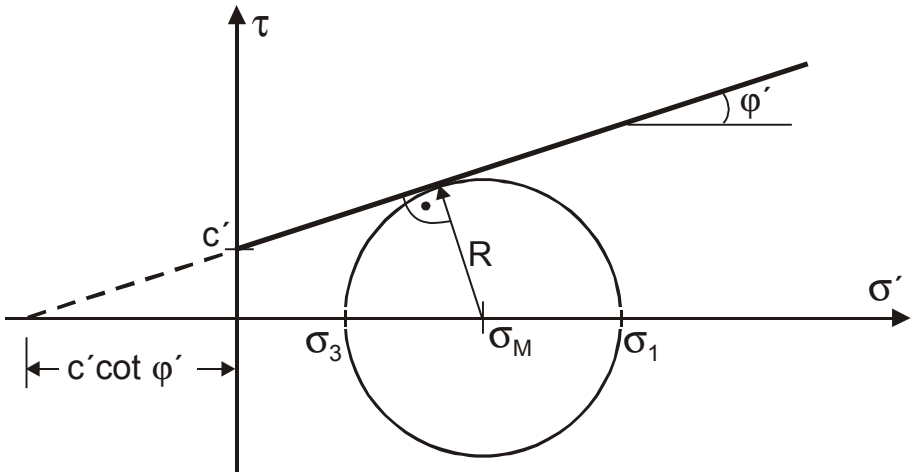




Der Kreis beschreibt alle möglichen Kombinationen (σ/τ), die in dem betrachteten Punkt in verschiedenen Schnitten (α) möglich sind

MOHRscher Kreis: $\tau = f(\sigma)$
Schergesetz: $\tau = f(\sigma)$

Berührt der MOHRsche Kreis die Bruchgerade, so herrscht gerade Bruchzustand:



➔Schergesetz als Funktion der Hauptspannungen:

$$\sigma_3 = \sigma_1 \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} - 2c' \frac{\cos\varphi'}{1+\sin\varphi'}$$

oder

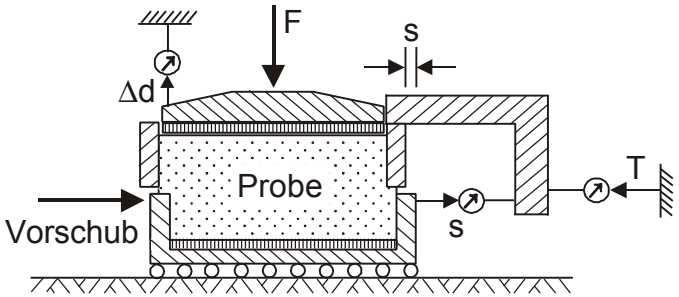
$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1+\sin\varphi'}{1-\sin\varphi'} + 2c' \frac{\cos\varphi'}{1-\sin\varphi'}$$

oder

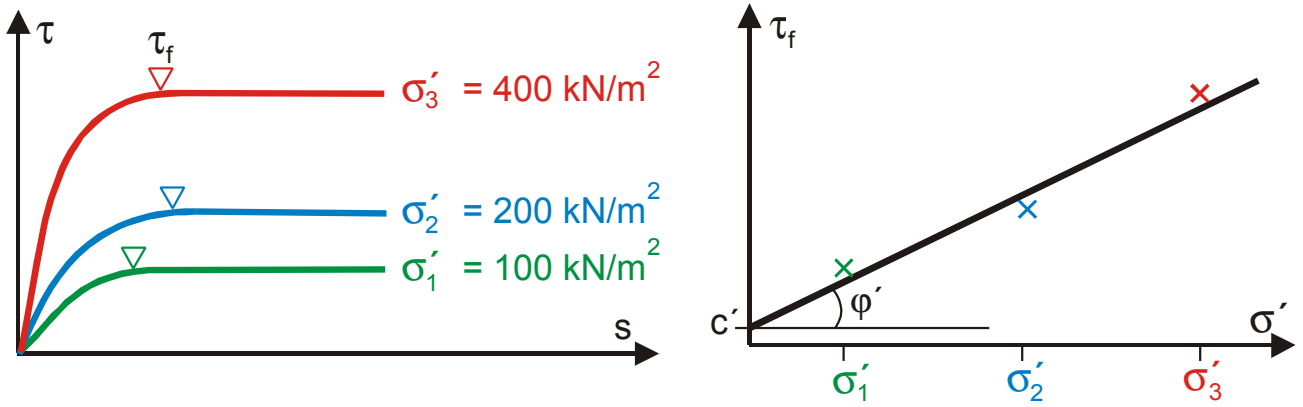
$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin\varphi' + c' \cos\varphi'$$

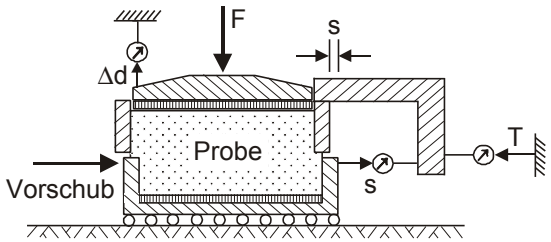
Direkter Scherversuch (Rahmenscherversuch)

Versuchsgerät:



Versuchsergebnisse:





Abmessungen:

$H \geq 5 \varnothing_{max}$

$D/H \geq 3$

➔ 6x6, 10x10, 30x30 cm²

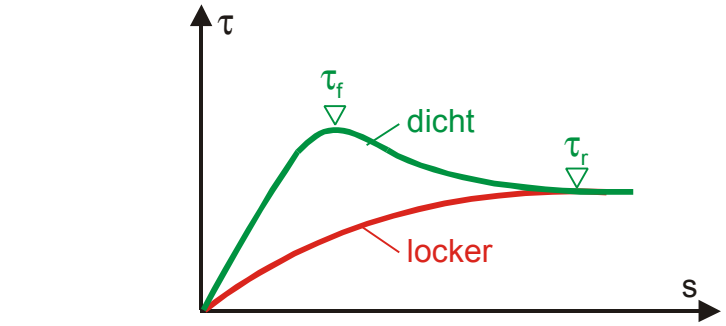


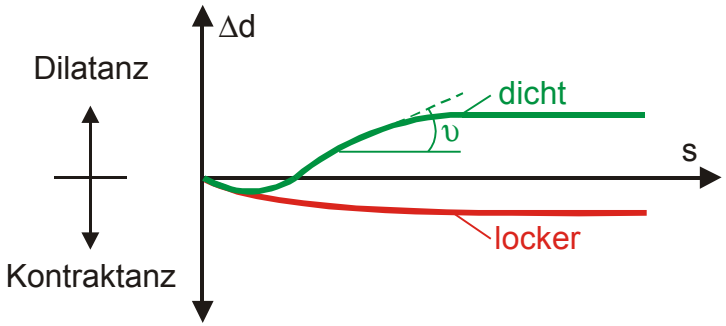
Schergeschwindigkeit: nichtbindig: $v \leq 0{,}5$ mm/min

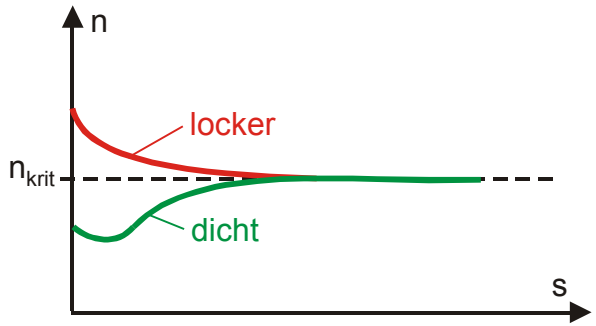
bindig: $v_{max} = f(I_p)$

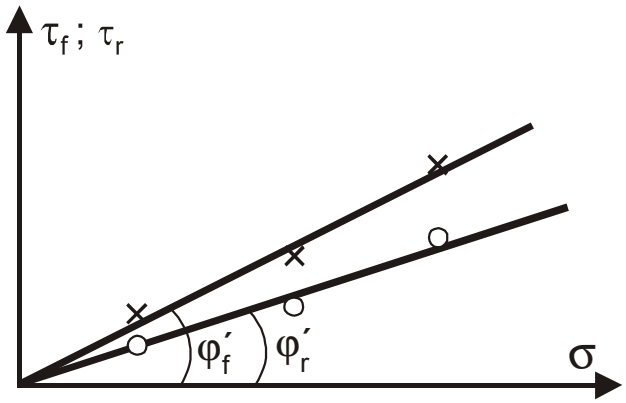
I_p	v_{max} in mm/min
0,1 – 0,25	0,05
0,25 – 0,50	0,01
> 0,50	0,005

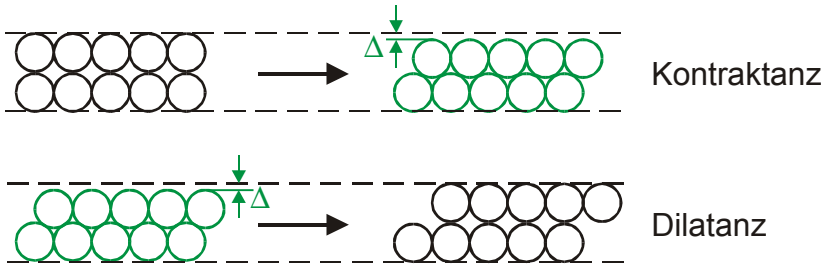
Verhalten nichtbindiger Böden im Rahmenscherversuch







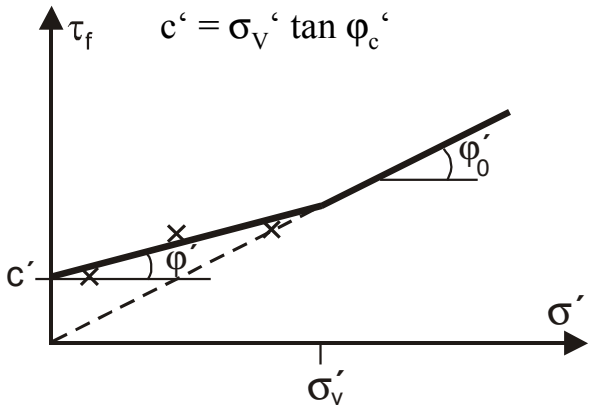




Verhalten bindiger Böden im Rahmenscherversuch

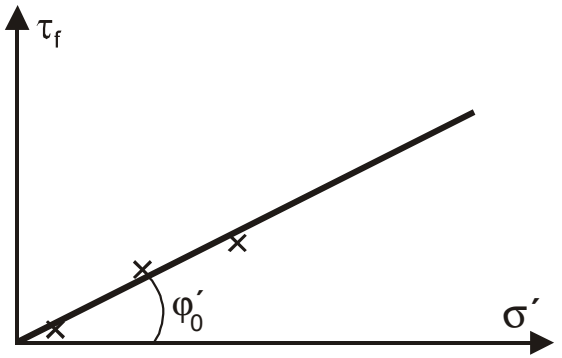
a) überkonsolidierter Versuch

OC: $\sigma' < \sigma_v'$

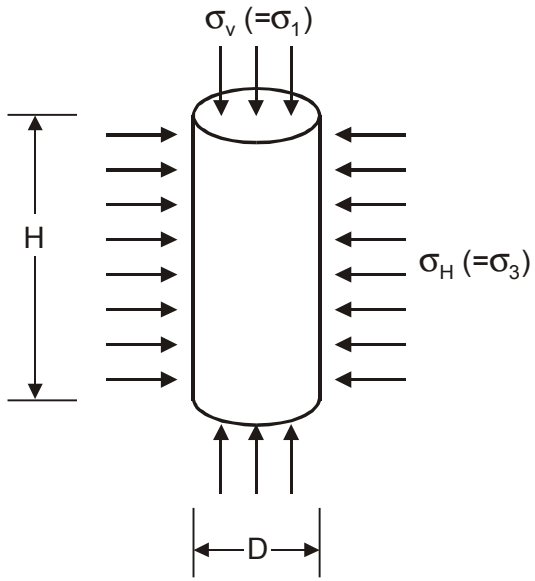


b) normalkonsolidierter Versuch

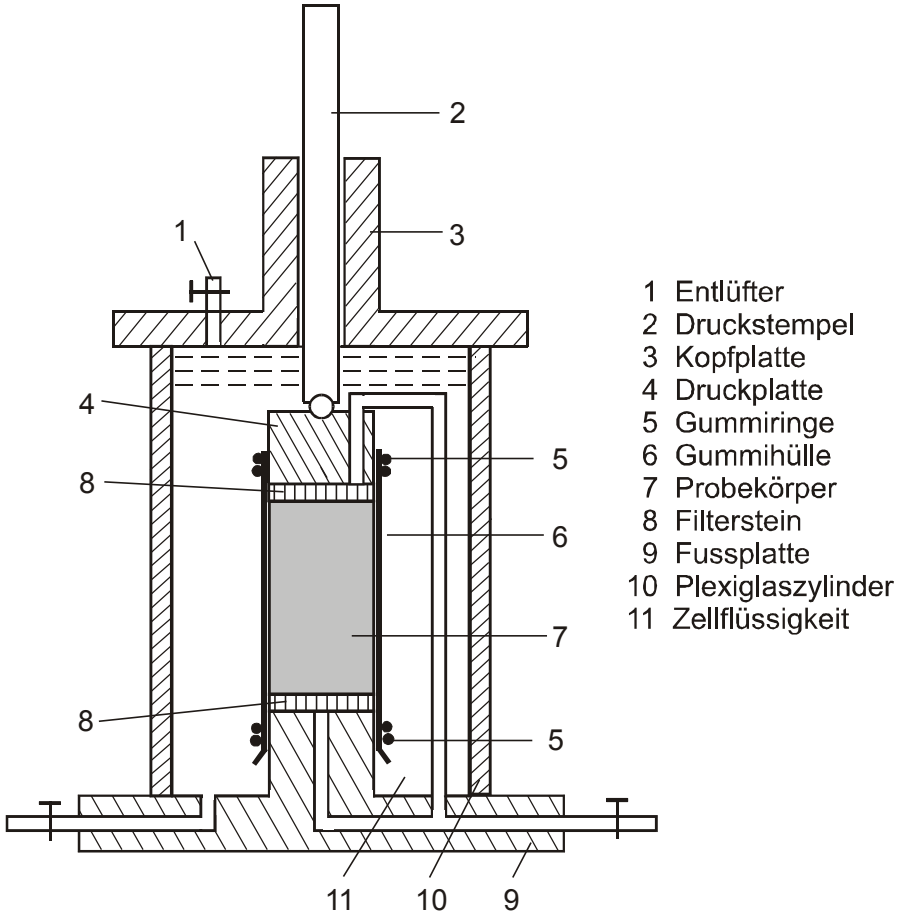
NC: $\sigma' = \sigma_v'$



Triaxialversuch



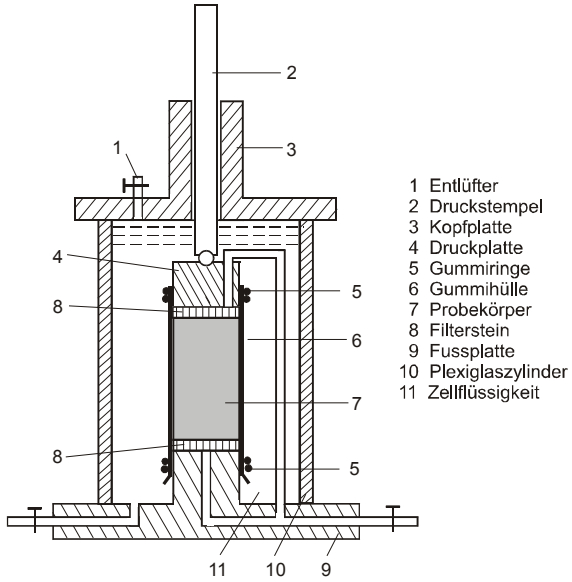




1 Entlüfter
2 Druckstempel
3 Kopfplatte
4 Druckplatte
5 Gummiringe
6 Gummihülle
7 Probekörper
8 Filterstein
9 Fussplatte
10 Plexiglaszylinder
11 Zellflüssigkeit

Triaxialversuch = Elementversuch. Dient zur Untersuchung des Spannungs-Verformungsverhaltens und der Bruchfestigkeit !

Probenabmessungen: $D \geq 10 \varnothing_{max}$ (U<5)
$D \geq 5 \varnothing_{max}$ (U>5)
$H/D \approx 2{,}5$



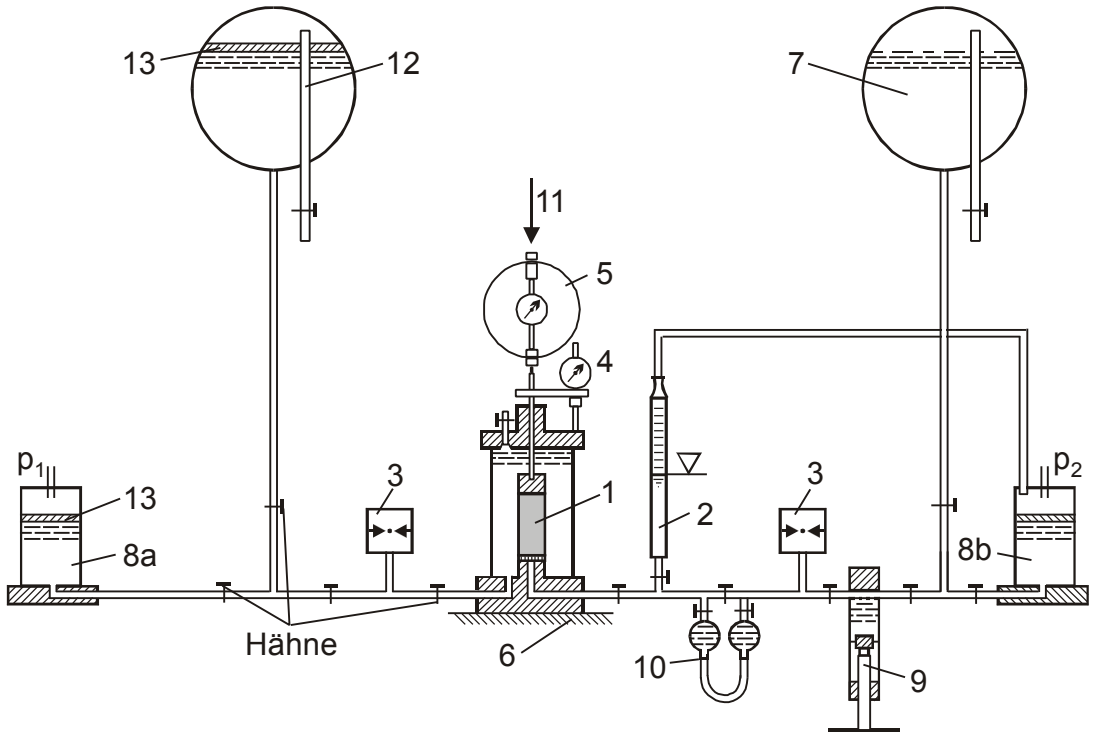
Versuchsarten:
- Konsolidiert, dräniert (CD) → φ‘, c‘
- Konsolidiert, undräniert (CU) → φ‘, c‘
- Unkonsol., undräniert (UU) → c_u, φ_u

Vorschubgeschwindigkeit:
<u>CD-Versuch</u>, nichtbindig: $v \leq 0{,}2\%$ x H/min
bindig: $v_{max} = f(I_p)$

I_p	v_{max} in mm/min
< 0,1	0,01
0,1 – 0,25	0,005
0,25 – 0,50	0,002
> 0,50	0,001

<u>CU-Versuch:</u>
$v_{CU} \approx 10\ v_{CD}$

<u>UU-Versuch:</u>
$v \leq 1\%$ x H/min



1 Probekörper
2 Standrohr
3 Überdruckmessgerät
4 Messuhr
5 Kraftmessgerät
6 Auflager
7 Wasserbehälter
8a Druckerzeuger für Zellendruck
8b Druckerzeuger für Sättigungsdruck
9 Handpumpe
10 Marke des Kompensationssystems
11 axialer Vorschub
12 Behälter für entlüftetes Wasser
13 Flüssigkeitstrennschicht

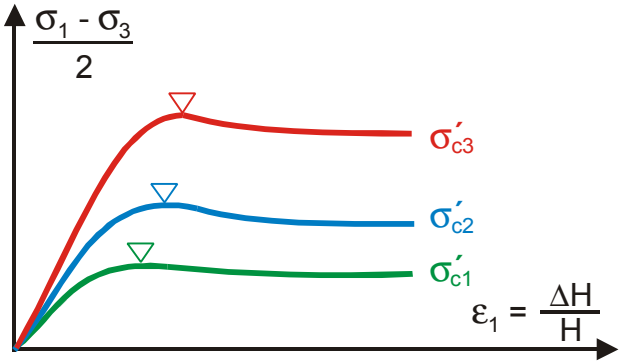
Triaxialversuch:

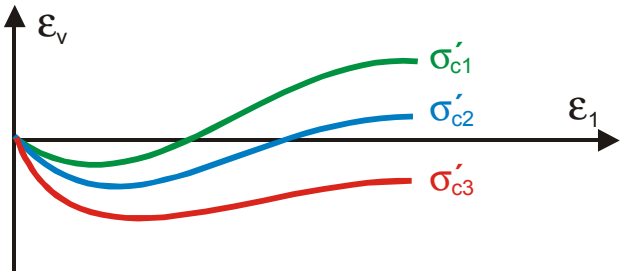
a) Sättigung
bis $\Delta u \geq (0{,}9\text{-}0{,}95)\ \Delta\sigma$

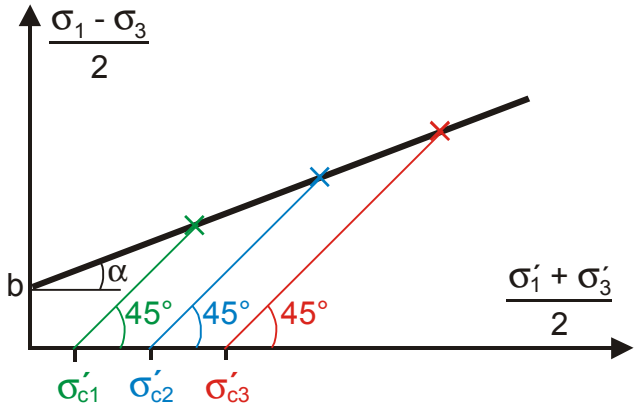
b) Konsolidierung
i.d.R. isotrop ($\sigma_1 = \sigma_3$)

c) Scherung
Erhöhung σ_V → CTC
Reduktion σ_H → TE
dabei Messung von
σ_1, σ_3, ε_1, ε_v, ggfs. Δu

Ergebnisse eines CD-Versuchs





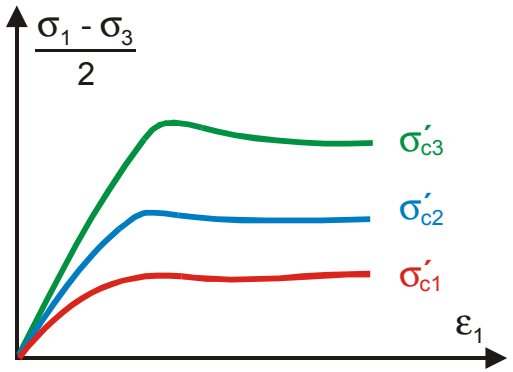


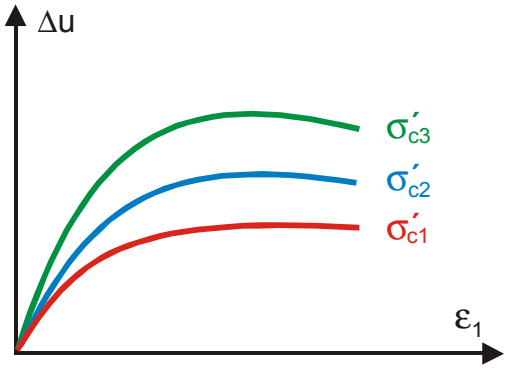
$$\sin \varphi' = \tan \alpha$$
$$c' \cos \varphi' = b$$

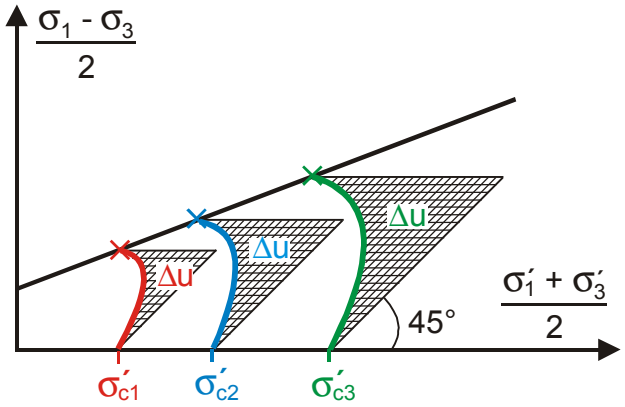
Schergesetz in Hauptspannungen:

$$\frac{s_1 - s_3}{2} = \frac{s_1 + s_3}{2} \sin j' + c' \cos j'$$

Ergebnisse eines CU-Versuchs

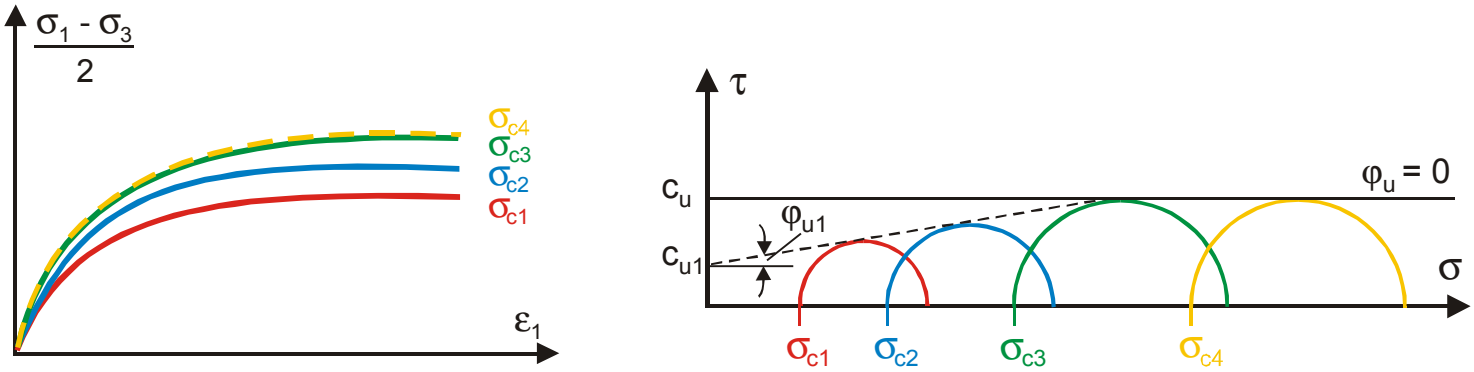


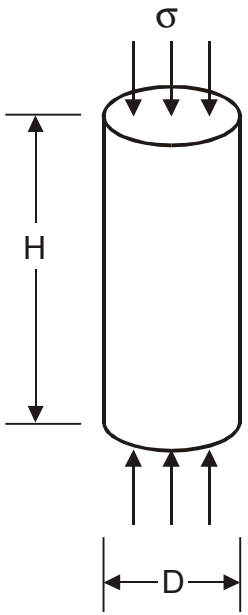




$$\sin \varphi' = \tan \alpha$$
$$c' \cos \varphi' = b$$

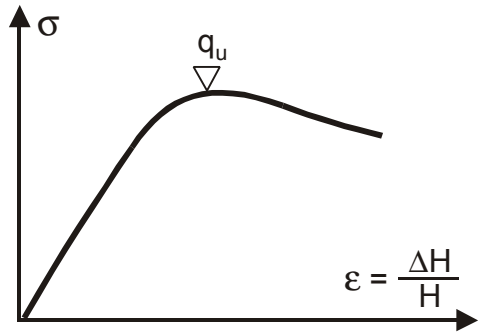
Ergebnisse eines UU-Versuchs

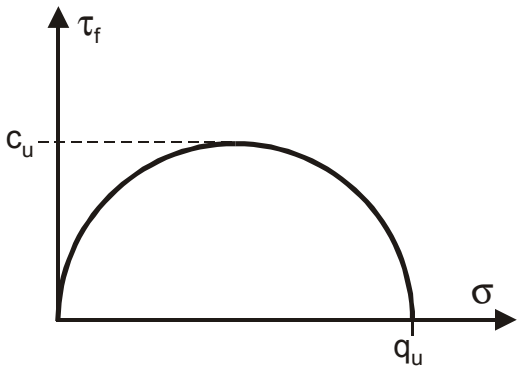




Einaxialer Druckversuch

$D \geq 10 \varnothing_{max} \geq 36$ mm
H = (2-2,5) D
Schergeschw.: v ≤ 1% x H/min

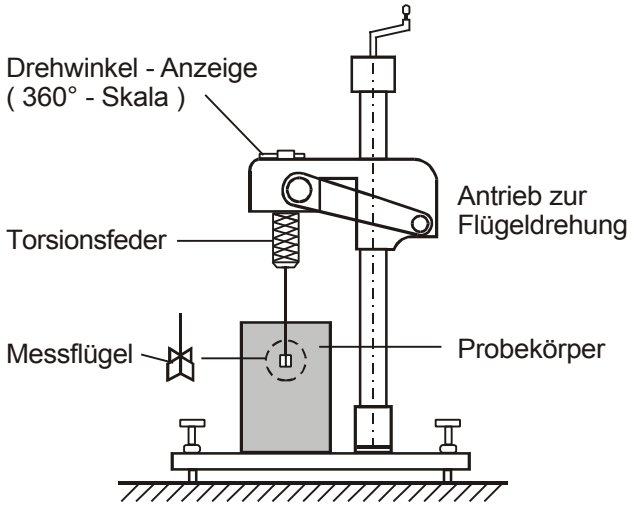




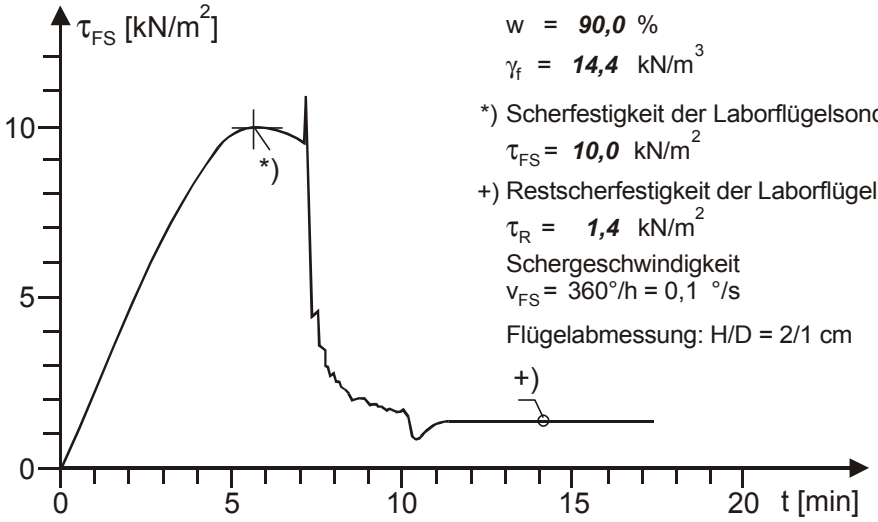
$$c_u = \frac{q_u}{2}$$

Laborflügelsondierung
(für weiche, ggfs. organische bindige Böden)

Versuchs-gerät



Versuchs-ergebnis



w = ***90,0*** %

γ_f = ***14,4*** kN/m³

*) Scherfestigkeit der Laborflügelsonde

τ_{FS} = ***10,0*** kN/m²

+) Restscherfestigkeit der Laborflügelsonde

τ_R = ***1,4*** kN/m²

Schergeschwindigkeit

v_{FS} = 360°/h = 0,1 °/s

Flügelabmessung: H/D = 2/1 cm

$v \leq 1\% \times H/min$

Korrektur: $c_u = \mu \tau_{FS}$

I_p	0	0,3	0,6	0,9	1,2
μ	1,0	0,8	0,65	0,58	0,50