

Quantifizierung von Fehlerquellen bei der Bestimmung von undrainierten Scherfestigkeiten im Labor

(Investigation of failure modes in case of undrained shear strength determination)

Sebastian Diesel

Einleitung

Für die Bestimmung der undrainierten Scherfestigkeit c_u im Labor gibt es verschiedene Untersuchungsmethoden. Zwei einfache und in der Ausführung schnelle Versuche sind der Fallkegelversuch und der Flügelsondenversuch. Diese werden auch von Studierenden im Rahmen des Moduls Geotechnische Untersuchungen am Institut für Geotechnik genutzt. Bei den durchgeführten Versuchen wurde immer das selbe Probenmaterial (Rohkaolin, siehe Tab. 1) untersucht, nur der Wassergehalt (bzw. die Konsistenz I_C) unterschied sich.

Der Datensatz aller studentischen Daten umfasst für jeden Versuch ca. 80 Messwertepaare von c_u und I_C . Diese Daten sind in Abb. 2 dargestellt. Es fällt auf, dass diese Daten z.T. sehr stark von einander und vom erwarteten Zusammenhang (gestrichelte Linien nach WROTH UND WOOD [1]) abweichen. Die Ursache hierfür können sowohl falsch bestimmte undrainierte Scherfestigkeiten als auch Konsistenzzahlen sein. Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung, Untersuchung und Quantifizierung von Fehlereinflüssen, welche zu diesen Abweichungen führen können, um dem erwarteten mittleren Zusammenhang einen Streubereich zuordnen zu können. Diese Untersuchungen werden durch den Vergleich von Versuchsergebnissen, Überlegungen auf Basis von theoretischen Annahmen und die Anwendung von Ergebnissen aus der Literatur geführt. Dafür wurden drei Versuchsböden verwendet, grundlegende Eigenschaften dieser sind in Tab. 1 aufgeführt.

Tab. 1: Plastische Eigenschaften der Versuchsböden* und des studentischen Probenmaterials

Löss*	Technischer Kaolin*	Guttauer Ton*	Rohkaolin
$w_L = 27,6 \%$	$w_L = 61,3 \%$	$w_L = 89,9 \%$	$w_L = 47,3 \%$
$w_p = 19,0 \%$	$w_p = 39,9 \%$	$w_p = 32,0 \%$	$w_p = 31,9 \%$

Versuchsgeräte

Für die experimentelle Untersuchung der Fehlereinflüsse und Einflussgrößen wurden die in Abb. 1 dargestellten Versuchsgeräte verwendet.

Fallkegelgerät

Das Fallkegelgerät besteht im wesentlichen aus einem Fallkegel mit Schaft und einer automatischen Arretierungseinrichtung. Beim Versuch wird der Kegel auf die Probenoberfläche aufgesetzt und die Anfangshöhe bestimmt. Danach wird der Kegel freifallen gelassen und nach dem Arretieren kann die Endhöhe bestimmt werden. Die Höhendifferenz entspricht der Falltiefe i , aus dieser kann zusätzlich mit der Kegelmasse m , der Erdbeschleunigung g und dem empirischen Faktor c , welcher vom Öffnungswinkel abhängt (30°: 0,80; 60°: 0,27), die undrainierte Scherfestigkeit nach Gleichung (1) bestimmt werden.

Laborflügelsonde

Beim Flügelsondenversuch wird ein Flügel (Höhe H , Durchmesser D) in die Probe eingebracht. Dieser ist mittels einer Drehfeder an einen Motor gekoppelt, welcher eine konstante Verdrehung erzeugt. Da sich der Flügel im Boden verdrehen kann, besteht immer ein Gleichgewicht



$$(1) c_u = c \cdot m \cdot \frac{g}{i^2}$$

$$(2) c_u = \frac{2M}{D \cdot H^2 + \frac{1}{3} \cdot H^3}$$



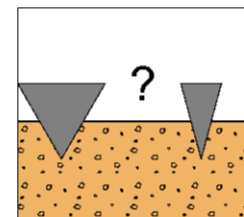
Abb. 1: Fallkegelgerät (links) und Laborflügelsonde (rechts)

zwischen dem Drehmoment der Feder und dem Widerstandsmoment des Bodens. Aus dem Drehmoment M des Abschervorganges wird mit Gleichung (2) die undrainierte Scherfestigkeit (im Peak- und Restzustand) bestimmt.

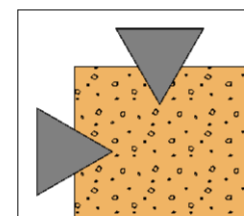
Fehlereinflüsse

Für die beiden Laborversuche und die Konsistenzzahl wurden die nachfolgend beschriebenen Fehlereinflüsse untersucht und quantifiziert. Die aufgeführten Fehler entsprechen maximal Werten (diese gelten für die Randbedingung in den eckigen Klammern) und z.T. werden verschiedene Werte angegeben, diese gehören zu den Plastizitätsgrenzen (Indizes: 0 - $I_C = 0$; 1 - $I_C = 1$). Diese wurden als Mittelwert der Fehler des Löss' und des Technischen Kaolins abgeleitet.

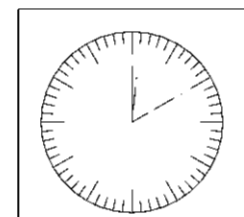
Fallkegelgerät



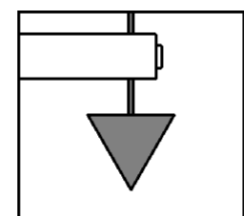
Kegelart: Einfluss der Verwendung verschiedener Fallkegel bei gleichen Proben. $F \approx 0 \%$



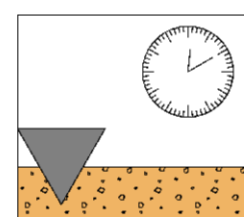
Prüfrichtung: Einfluss des Winkels zwischen Test- und Konsolidationsrichtung [0° bzw. 90°]. $F \approx 0 \%$



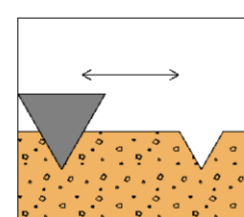
Wartezeit: Einfluss der zeitlichen Austrocknung und des Festigkeitsgewinns der Oberfläche [15 min]. $F \approx 5 \%$



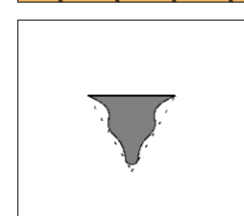
Arretierung: Einfluss der Verschiebung durch den Arretierungsmechanismus [$\pm 0,1$ mm]. $F_0 \approx 1 \%$, $F_1 \approx 10 \%$; $F_0 \approx -1 \%$, $F_1 \approx -10 \%$



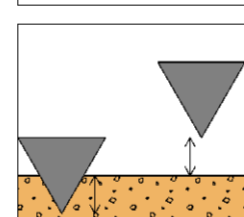
Messzeitpunkt: Einfluss des Nachsinkens des Kegels durch Drainage [$t = 5$ s]. $F_0 \approx 0 \%$, $F_1 \approx -15 \%$



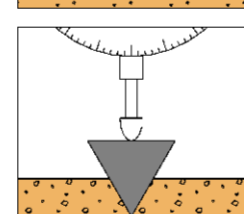
Messstellen-/Randabstände: Einfluss der Unterschreitung von Mindestwerten [4 mm / 7 mm]. $F \approx \pm 20 \%$



Abnutzung: Einfluss der oberflächlichen Abnutzung und Abrundung der Spitze. $F \approx 20 \%$

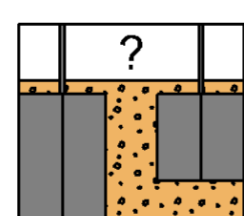


Aufsetzhöhe: Einfluss des zu tiefen oder zu hohem Aufsetzens des Kegels [$\Delta h = \pm 1$ mm]. $F_0 \approx 10 \%$, $F_1 \approx 40 \%$; $F_0 \approx -10 \%$, $F_1 \approx -25 \%$

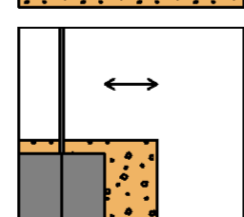


Zusatzlast Messuhr: Einfluss durch die zusätzliche Last einer Messuhr [100 g] beim Versuch. $F_0 \approx -55 \%$, $F_1 \approx -20 \%$

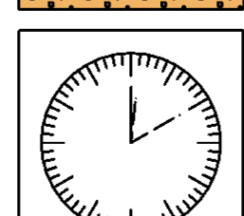
Laborflügelsonde



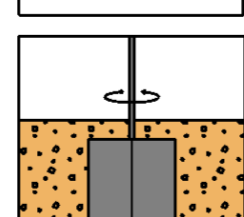
Flügelgeometrie: Einfluss der Verwendung verschiedener Flügel [$H_1/D_1=1$; $H_2/D_2=2$; $D_{1/2}=12$ mm]. $F \approx 0 \%$



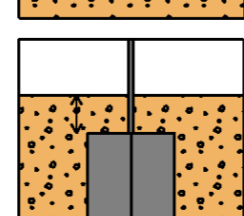
Messstellenabstand: Einfluss zu geringer Messstellenabstände [$D/2$; $D/4$]. $F \approx 0 \%$



Wartezeit: Einfluss der zeitlichen Konsolidation des den Flügel umgebenden Bodens [15 min]. $F \approx 5 \%$

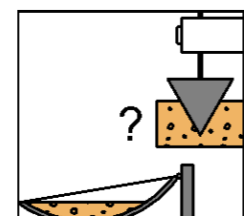


Drehgeschwindigkeit: Einfluss verschiedener Drehgeschwindigkeiten [durch verschiedene Federn]. $F \approx \pm 10 \%$



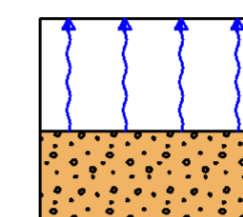
Einbringtiefe: Einfluss des zu flachen oder zu tiefen Einbringens des Flügels [0 - 30 mm]. $F \approx 30 \%$; $F \approx -40 \%$

Konsistenzzahl

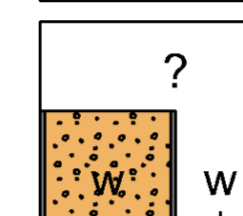


Konsistenzgrenzestreueung: Einfluss mit verschiedenen Versuchen und Laboranten bestimmter Konsistenzgrenzen. $\Delta I_C \approx 0$

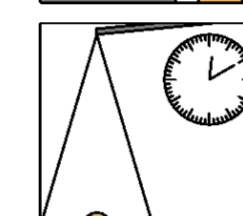
* $F = 0$, da für Auswertung immer die selben w_L und w_p verwendet wurden



Oberflächliche Austrocknung: Einfluss der Austrocknung der Probenoberfläche [2 h]. $\Delta I_C \approx -0,04$



Wassergehaltsstreuung: Einfluss der Unterschiede zwischen lokalen und globalen Wassergehalten. $\Delta I_C \approx \pm 0,16$



Zeitliche Massenänderung: Einfluss der Trocknung/ Feuchteaufnahme von Wassergehaltsproben. [30 min] $\Delta I_C \approx -0,19$

Auswertung und Fazit

Die zuvor vorgestellten Fehlereinflüsse und Einflussgrößen können für zwei verschiedene Auswertungen verwendet werden. In dem von den am ungünstigsten wirkenden Bedingungen ausgegangen wird (Überlagerung von allen c_u überschätzend und I_C unterschätzend wirkenden Einflüssen bzw. anders herum), lässt sich der maximale Streubereich finden, in welchem die Versuchsdaten liegen müssen (siehe Abb. 2). Innerhalb dieses sehr großen Bereiches liegen nahezu alle studentischen Daten. In dem nur Einflussgrößen betrachtet werden und von einem umsichtigeren Vorgehen (veränderte Fehlerannahmen) ausgegangen wird, wird Abb. 3 erhalten. Der erhaltene Streubereich ist nun deutlich kleiner, damit befinden sich über 50 % der studentischen Daten innerhalb dieses. Da realistisch gesehen Fehler sich z.T. aufheben, sollten diese Bereiche noch kleiner sein. Damit sind Flügelsonden- und Fallkegelversuch gut für die schnelle Bestimmung von c_u geeignet. Allerdings sollte insbesondere bei leicht plastischen Schluffen umsichtig vorgegangen werden, da sich Drainageeffekte nachteilig auf die Qualität der Ergebnisse auswirken und auch I_C nur bedingt genau bestimmt werden kann (Abweichung von kleinem Δw wirkt sich bei kleinem I_p sehr stark auf I_C aus).

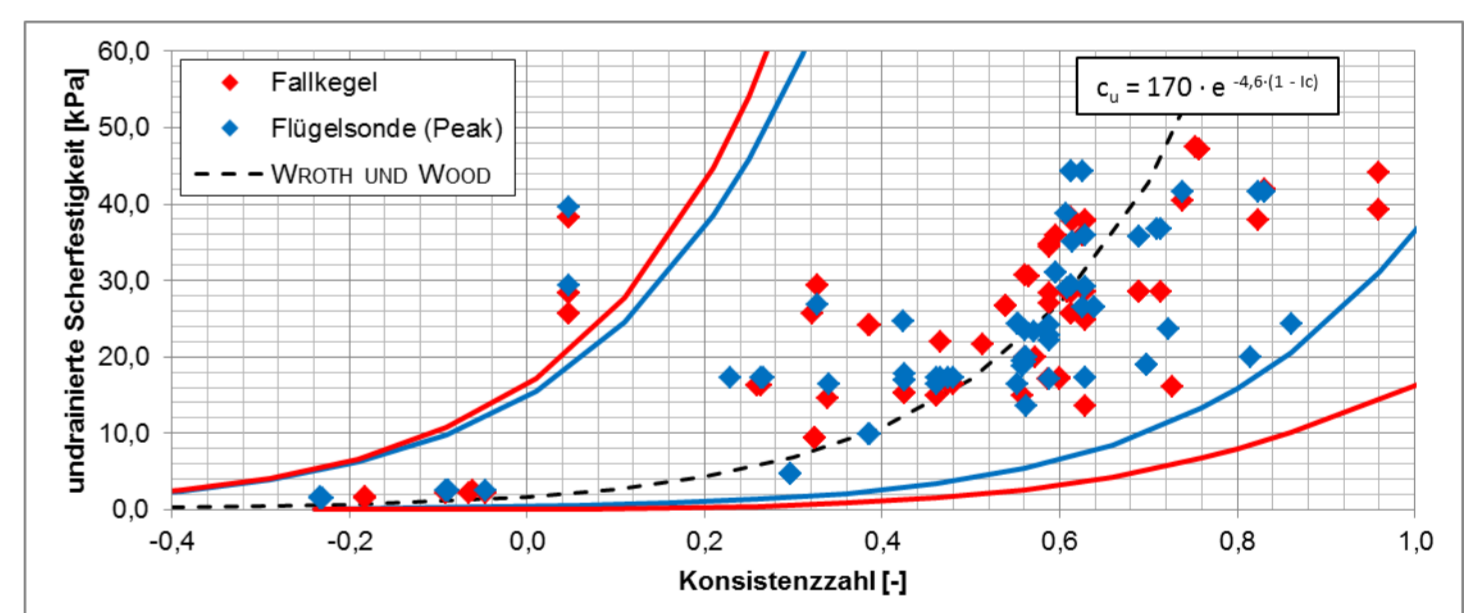


Abb. 2: Vergleich des maximalen Streubereiches des Fallkegelversuches und des Flügelsondenversuches mit den studentischen Daten (ungünstigste Bedingungen)

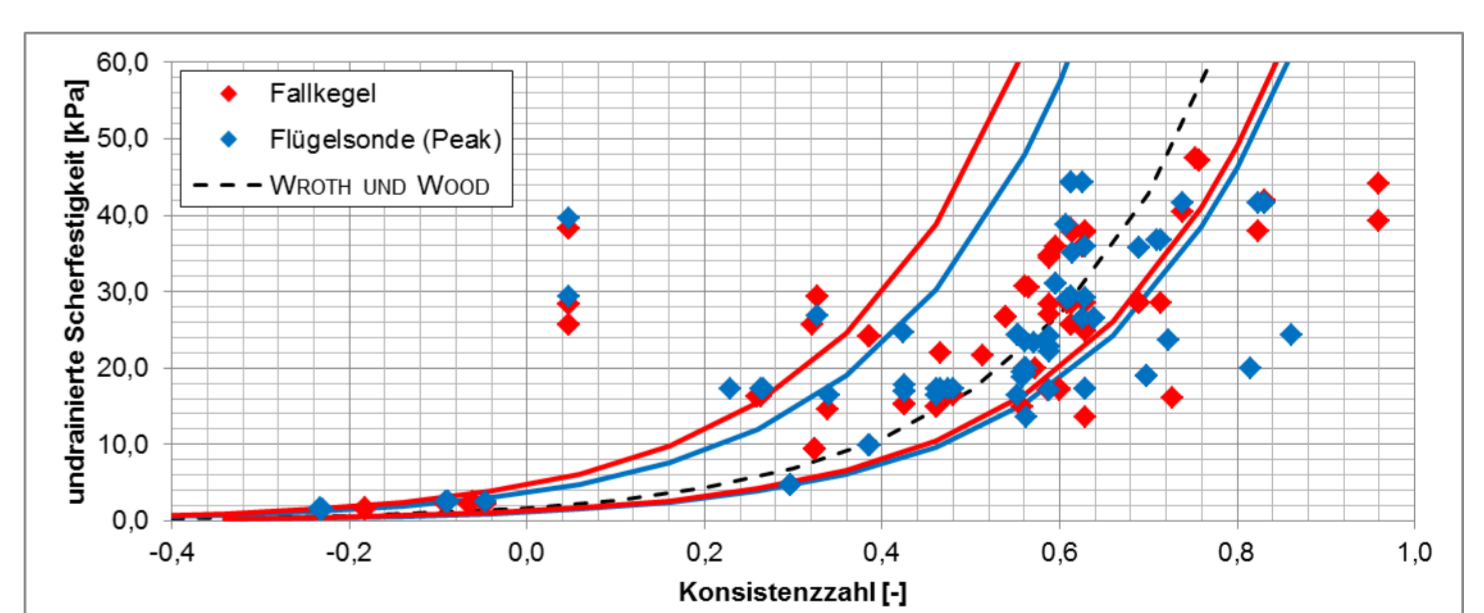


Abb. 3 Vergleich des maximalen Streubereiches des Fallkegelversuches und des Flügelsondenversuches mit den studentischen Daten bei korrekter Versuchsdurchführung

Quellen

[1] WROTH, C.P.; WOOD, D.M.: *The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils*. 1978

Hochschullehrer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, TU Dresden

Wissenschaftlich Betreuung

Dipl.-Ing. Markus Uhlig, TU Dresden

Abgabe

Dezember 2017