

Bestimmung charakteristischer Scherparameter

Barbara Schneider-Muntau, Fabian Schranz, Wolfgang Fellin

Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Geotechnik und Tunnelbau, Technikerstr. 13, A-6020 Innsbruck

Abstract

The shear strength of soils, usually represented as friction angle and cohesion, is an important input parameter for all geotechnical calculations. The shear strength can be assessed in the laboratory either by a triaxial or a direct shear test. From the laboratory test results, the characteristic values for friction angle and cohesion have to be determined for the calculations - according to the norm – as conservative estimation of the mean value. Friction angle and cohesion are usually assumed to be statistically independent variables, resulting in unrealistically low shear strengths. Friction angles and cohesion are obviously correlated, since they are parameters of a linear regression. Confidence hyperbolas can be determined in a statistical evaluation taking into account the statistical dependency on friction angle and cohesion. A linearization of the confidence hyperbolas then provides an upper and a lower limit of the dependent shear parameters. Typical examples are used to demonstrate the determination of the characteristic shear strength from the laboratory test results with the above mentioned approaches. It is shown, that when evaluating with parameters considered to be independent, a relatively large statistical reduction of the mean shear strength to the characteristic shear strength is necessary. If the parameters are considered statistically dependent, this reduction is considerably smaller. The characteristic shear strength can be determined more precisely with the second method (i. e. with less reduction from the mean value) if more load steps (e. g. six) are selected instead of the usual three load steps.

Zusammenfassung

Die Scherfestigkeit von Böden, meist dargestellt als Reibungswinkel und Kohäsion, ist ein wichtiger Eingangsparameter für alle geotechnischen Berechnungen. Die Scherfestigkeit kann im Labor im Triaxialversuch oder im Rahmenscherversuch ermittelt werden. Aus den Laborversuchsergebnissen sind für die Berechnungen charakteristische Werte für Reibungswinkel und Kohäsion abzuleiten, die - laut Norm - als vorsichtige Schätzung der Mittelwerte festgelegt werden können. Meistens werden Reibungswinkels und Kohäsion als statistisch unabhängige Variablen angenommen, was zu unrealistisch niedrigen charakteristischen Scherfestigkeiten führt. Reibungswinkel und Kohäsion sind offensichtlich korreliert, da sie Parameter einer linearen Regression sind. Bei einer statistischen Auswertung unter Berücksichtigung der statistischen Abhängigkeit von Reibungswinkel und Kohäsion können Konfidenzhyperbeln bestimmt werden. Eine Linearisierung der Konfidenzhyperbeln liefert dann eine obere und eine untere Grenzen der abhängigen Scherparameter. Anhand typischer Beispiele wird die Ermittlung

der charakteristischen Scherfestigkeit aus den Laborversuchsergebnissen mit den verschiedenen Ansätzen demonstriert. Es zeigt sich, dass bei Auswertung mit als unabhängig betrachteten Parametern, eine relative große statistische Abminderung der mittleren Scherfestigkeit auf die charakteristische Scherfestigkeit notwendig ist. Betrachtet man die Parameter als statistisch abhängig, ist diese Abminderung wesentlich kleiner. Die charakteristische Scherfestigkeit kann mit der zweiten Methode nochmals genauer (d.h. mit weniger Abminderung vom Mittelwert) bestimmt werden, wenn statt der üblichen drei Laststufen mehr Laststufen (z.B. sechs) gewählt werden.

1. Einleitung

Zur Beurteilung der allermeisten geotechnischen Fragestellung ist eine Kenntnis der Scherfestigkeit notwendig. Diese wird herkömmlicherweise mit den beiden Parametern Reibungswinkel ϕ und Kohäsion c der linearisierten Versagenskurve beschrieben. Nach dem EC 7 sollen als Eingangsparameter charakteristische Werte nach dem Teilsicherheitskonzept zu Designwerten abgemindert werden. Charakteristische Scherparameter sind weiterhin als vorsichtige Schätzung der Mittelwerte festzulegen, wenn örtliches Versagen ausgeschlossen ist. Meistens wird dazu die statistische Unabhängigkeit des Reibungswinkels ϕ von der Kohäsion c angenommen. Die beiden sind aber offensichtlich korreliert, da sie Parameter einer linearen Regression sind. Die Vernachlässigung der Korrelation führt in der Regel zu unrealistisch niedrigen charakteristischen Scherfestigkeiten [5]. Zur Berücksichtigung der Korrelation schlagen [2] vor, die Konfidenzhyperteln der linearen Regression für die Scherparameter in Rahmenscherversuchen im gewünschten Spannungsbereich zu linearisieren und dasselbe für Triaxialversuche in der üblichen Auswertung im $s - t$ Diagramm anzuwenden unter Berücksichtigung der Abhängigkeit von s und t . Anhand typischer Beispiele wird die die Bestimmung der Mittel- und charakteristischen Werte dargestellt.

2. Laborversuche

Die Scherparameter eines Bodens werden in Scherversuchen bestimmt. In der Geotechnik finden dazu zwei Versuche Anwendung, der Rahmenscherversuch und der Triaxialversuch. Die Versuche erfolgen normalerweise weggesteuert, das bedeutet, dass die Bodenprobe bis zum Versagen verformt wird. Dadurch kommt zu einer Zunahme der Kräfte bis zum Erreichen eines Peaks, der entweder das Ende des Versuchs markiert oder zu einer Entfestigung nach dem Peak. Zur Auswertung werden aus den Kräften Spannungen berechnet und zur Bestimmung der Scherfestigkeit die Peakspannungen herangezogen, siehe Abb. 1.

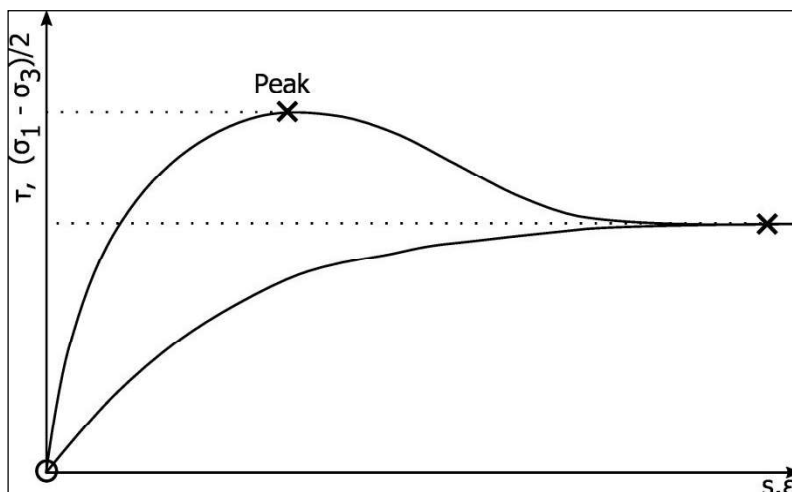


Abb. 1: Schematischer Spannungs-Dehnungsverlauf mit Darstellung der Peakfestigkeit für einen dichten Versuch (mit Peak) und einen lockeren Versuch (ohne Peak). Dabei beschreiben τ und s den Rahmenscherversuch und $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ und ϵ den Triaxialversuch.

2.1 Rahmenscherversuch

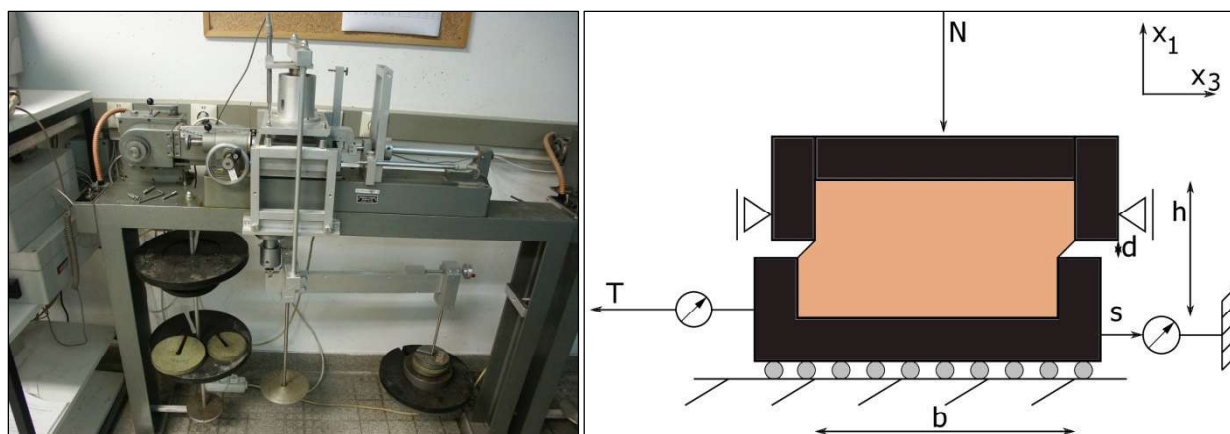


Abb. 2: Rahmenscherversuch, Versuchsstand und schematischer Aufbau.

Der hier dargestellte Rahmenscherstand kann Proben mit Abmessungen 10 x 10 cm in der Länge (b in Abb. 2) und 2 cm in der Höhe (h in Abb. 2) untersuchen. Der Spalt zwischen beiden Rahmen wird bei Versuchen meist auf 1 mm eingestellt (d in Abb. 2). Laut Norm [3] darf das Größtkorn maximal 1/5 der kleinsten Probenabmessung betragen. Diese Probenabmessungen erfordern ein Absieben des Materials auf 4 mm, wenn die Gesamtprobenhöhe h als kleinste Probenabmessung betrachtet wird und sogar auf 0.2 mm, wenn der Spalt als kleinste Probenabmessung betrachtet wird. In [4] wird zudem empfohlen den mittleren Korndurchmesser auf 1/20 bis 1/10 der Scherfugendicke zu beschränken, was einem mittleren Korndurchmesser von 0.05 - 0.1 mm entsprechen würde. Vor dem Abscheren, wird die Probe im Stand durch eine vertikale Belastung N konsolidiert. Nach abgeschlossener Konsolidierung wird einer der beiden Rahmen bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit gezogen, die dabei auftretende Kraft T wird gemessen. Aus der vertikalen Belastung N und den Probenabmessungen kann die Normalspannung σ und aus der horizontalen Kraft T und den Probenabmessungen die Schubspannung τ berechnet werden.

Tab. 1: Eckdaten Rahmenscherversuch

Scherfugenbildung	Vorgegeben im Spalt
Größtkorn	1/5 der kleinsten Probenabmessung
Hauptspannungsrichtung	Unbekannt
Normal- und Schubspannung	In der Scherfuge bekannt

2.2 Triaxialversuch

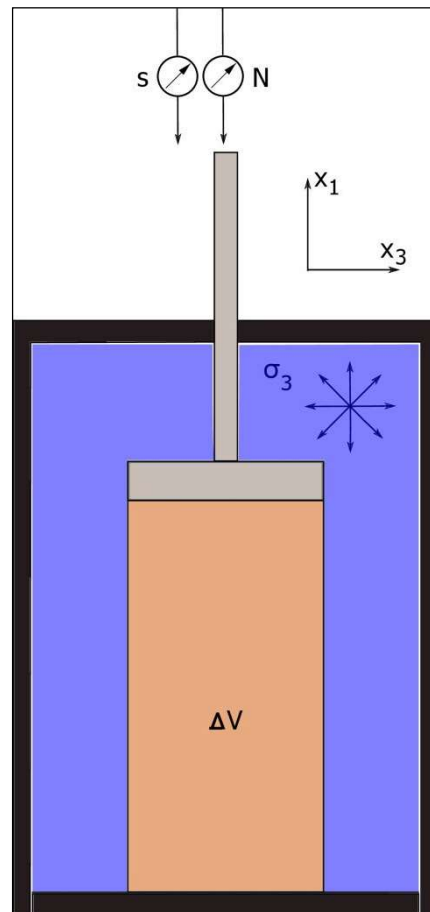


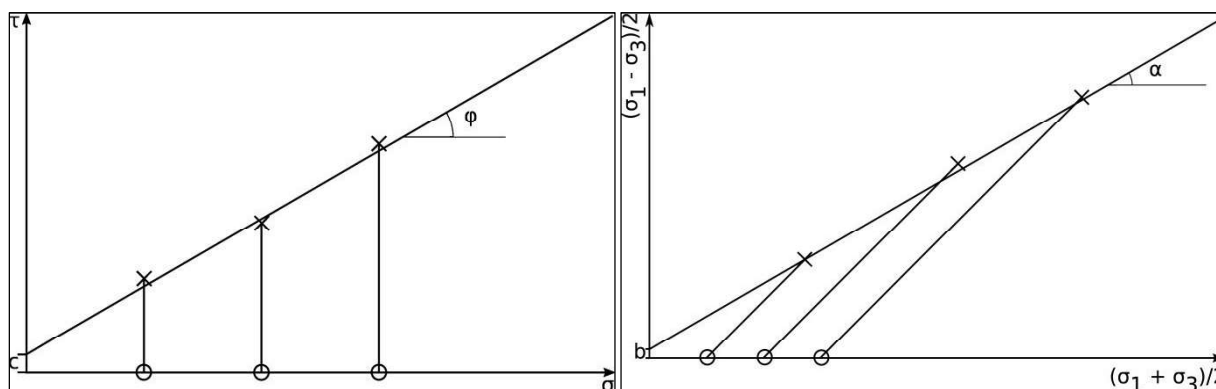
Abb. 3: Triaxialversuch, Versuchsstand und schematischer Aufbau.

Triaxialversuche werden an zylindrischen Proben durchgeführt. Bei den hier beschriebenen Triaxialversuchen handelt es sich um konsolidierte, drainierte (CD) Triaxialversuche. Als maximales Größtkorn kann wieder 1/5 der kleinsten Probenabmessung herangezogen werden [1]. Die kleinste Probenabmessung ist dabei der Probendurchmesser. In Abb. 3 ist ein Probekörper mit 15 cm Durchmesser und 30 cm Probenhöhe dargestellt, der ein Größtkorn von 30 mm zulässt. Die Konsolidierungsspannung wird hier über den Zelldruck σ_3 aufgebracht, siehe Abb. 3. Nach Abschluss der Konsolidierung wird die Probe durch ein Verschieben des Stempels gestaucht, die dafür notwendige Kraft N wird aufgezeichnet. Aus der Axialkraft N und dem Zelldruck σ_3 kann die Axialspannung σ_1 berechnet werden. Der Zelldruck σ_3 bleibt während des Versuchs konstant. σ_1 und σ_3 entsprechen dabei auch den Hauptspannungen.

Tab. 1: Eckdaten Triaxialversuch

Scherfugenbildung	Frei im Probekörper
Größtkorn	1/5 der kleinsten Probenabmessung
Hauptspannungsrichtung	Bekannt
Normal- und Schubspannung	In der Scherfuge unbekannt

3. Parameterbestimmung durch lineare Regression



(a) Rahmenscherversuch, die Kreuze markieren die Peakspannungen. Das Abscheren startet bei $\tau=0$ (Kreise).

(b) Triaxialversuch, die Kreuze markieren die Peakspannungen. Das Abscheren startet bei $\sigma_1 = \sigma_3$, daher $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 = 0$.

Abb. 4: Auswertungen Peakspannung.

3.1 Rahmenscherversuch

Für die Auswertung des Rahmenscherversuchs wird davon ausgegangen, dass die in der vorgegebenen Scherfuge wirkenden Spannung aus den gemessenen Kräften bestimmt werden können. Das bedeutet, dass die Normalspannung σ und die Schubspannung τ , die in der Scherfuge wirken, direkt aus der Normalkraft N und der Schubkraft T berechnet werden. Nachdem der Versuch bei drei verschiedenen Normalkraftstufen (Konsolidierungen) durchgeführt wird, ergeben sich die Scherparameter ϕ und c aus einer linearen Regression durch die Peakspannungen τ_p der Versuchswerte (Kreuze in Abb. 4(a)) bei bekannter Normalspannung σ (Konsolidierungsdruck, Kreise in Abb. 4(a)).

3.2 Triaxialversuch

Anders als beim Rahmenscherversuch können Normal- und Schubspannung im Triaxialversuch nicht direkt ermittelt werden. Dafür sind die Hauptspannungen σ_1 und σ_3 bekannt. Die axiale Spannung σ_1 folgt aus der gemessenen Axialkraft N und dem Zelldruck σ_3 während die horizontale Spannung σ_3 dem aufgetragenen Zelldruck entspricht. Für die Auswertung des drainierten Triaxialversuches wird von einer homogenen Probenverformung ausgegangen, deshalb kann der Versuch als Elementversuch betrachtet werden. Die Horizontalspannung σ_3 (Zelldruck) wird als Versuchsrandbedingung eingestellt, dient der Konsolidierung und wird während des Versuches konstant gehalten. Zur Auswertung wird die maximal auftretende Vertikalspannung σ_{1p} bei bekannter Horizontalspannung σ_3 herangezogen. Die Auswertung des Triaxialversuches erfolgt meistens in der $s - t$ Darstellung der Spannungen, im

Spannungspfaddiagramm, Abb. 4(b). Dabei sind s die Summe der beiden Hauptspannungen in horizontaler und in vertikaler Richtung:

$$s = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$$

und t die Deviatorspannung:

$$t = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$$

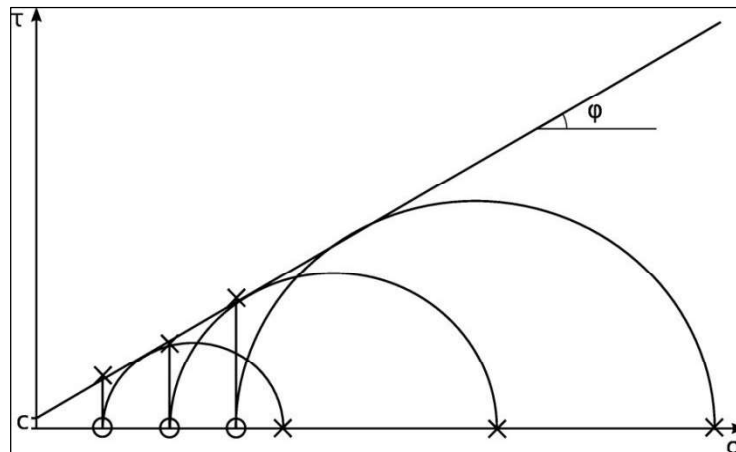


Abb. 5: Darstellung Scherversuch und Triaxialversuch im $\tau - \sigma$ -Diagramm. Die Rahmenscherversuche als Pfad erkenntlich, die Triaxialversuche als Mohr'sche Spannungskreise. Die Versuche starten bei den gleichen Konsolidierungsspannungen (Kreise).

Genauso wie beim Rahmenscherversuch folgen die Parameter dieser Regression α und b aus einer linearen Regression in $s - t$ -Diagramm, Abb. 4(b). Nachdem sowohl in s als auch in t die abhängige (σ_3) und die unabhängige (σ_1) Variable auftreten, muss für eine Berechnung der Regressionsgerade erst eine Trennung der Variablen durchgeführt werden und die so berechnete Regressionsgerade in der Folge dann wieder in die $s - t$ -Darstellung umformuliert werden. Um die Regression bestimmen zu können, müssen auch die Triaxialversuche an mindestens drei Laststufen (Konsolidierungsdrücken) durchgeführt werden, siehe Abb. 4(b). Aus den Parametern α und b können über folgende Beziehungen

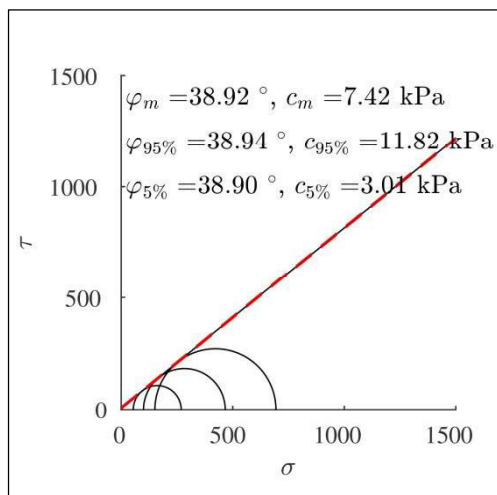
$$\sin \phi = \tan \alpha$$

und

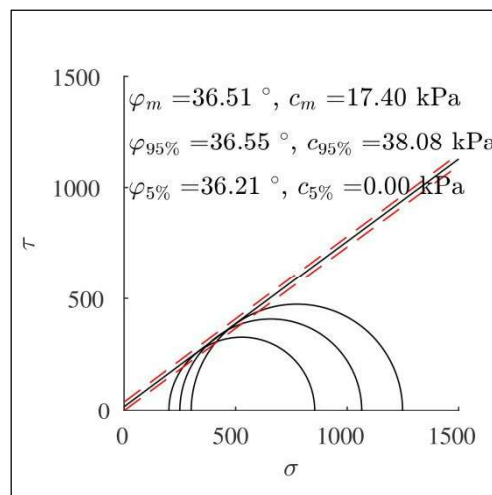
$$c = b / \cos \phi$$

die Scherparameter ϕ und c berechnet werden. Die Ergebnisse eines Triaxialversuches können auch im $\tau - \sigma$ -Diagramm dargestellt werden. Für die Triaxialversuch sind dabei keine Pfade zu sehen, sondern Mohr'sche Spannungskreise, diese starten als Punkt (Kreis in Abb. 5), und wachsen an bis sie im Grenzzustand die Scherkurve berühren, Abb. 5.

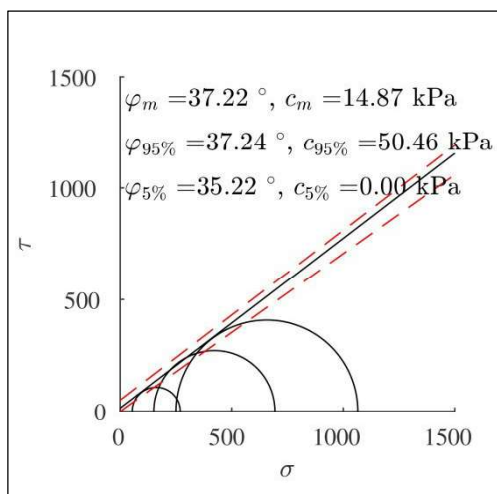
4. Ergebnisse der Triaxialversuche



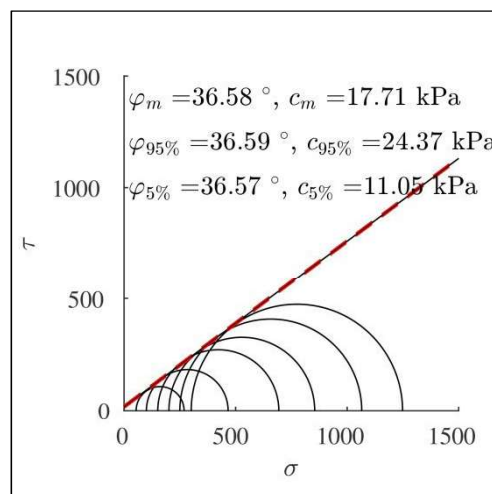
Laststufen 50, 100, 150 kPa



Laststufen 200, 250, 300 kPa



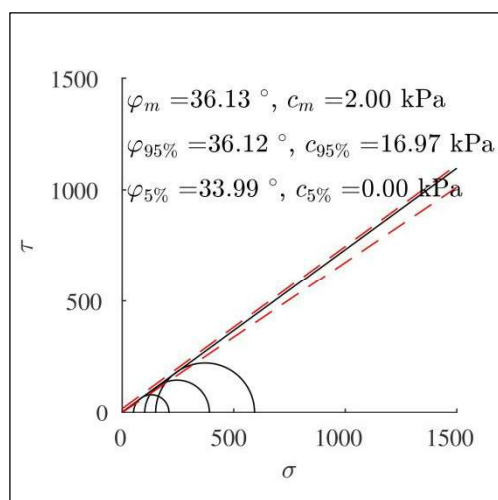
Laststufen 50, 150, 250 kPa



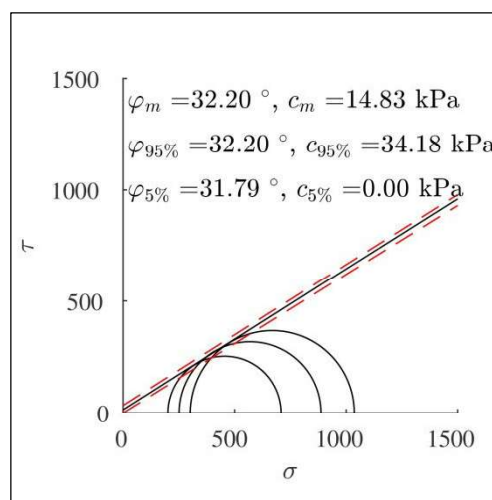
Laststufen 50, 100, 150, 200, 250, 300 kPa

Abb. 6: Triaxialversuche, Feinsand, verschiedenen Laststufen

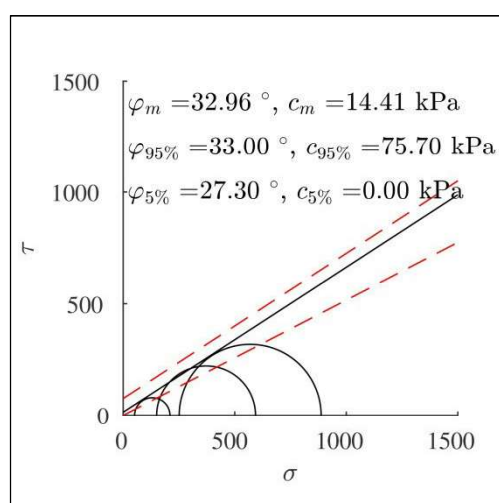
Um den Einfluss der Auswertung bei Triaxialversuchen zu demonstrieren, werden Versuchsergebnisse an zwei Bodenproben vorgestellt. Wie oben beschrieben, sind zur Bestimmung der Scherparameter durch lineare Regression mindestens drei unterschiedliche Laststufen notwendig. Hier wurden sechs Laststufen untersucht (50, 100, 150, 200, 250, 300 kPa) und die Ergebnisse in verschiedenen Kombinationen ausgewertet, siehe Abb. 6 und 7. Eine erste Versuchsreihe wurde an einem Feinsand (0.1 - 0.5 mm) durchgeführt, Abb. 6. Für die zweite Serie an Versuchen wurde ein natürlicher, weitgestufter Boden verwendet, mit Korngrößen vom 0 - 30 mm, Abb. 7.



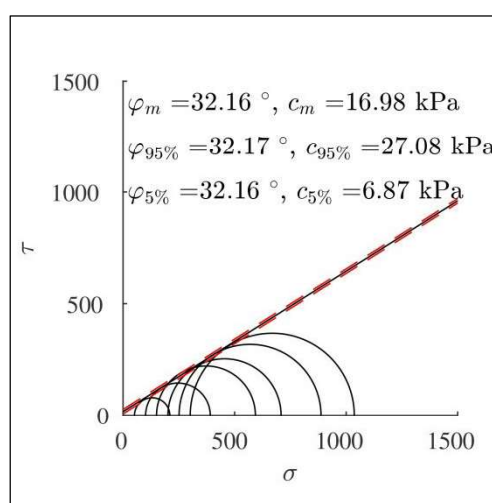
Laststufen 50, 100, 150 kPa



Laststufen 200, 250, 300 kPa



Laststufen 50, 150, 250 kPa



Laststufen 50, 100, 150, 200, 250, 300 kPa

Abb. 7: Triaxialversuche, Sand, verschiedenen Laststufen

5. Empfohlene Parameter

Für geotechnische Berechnungen soll ein charakteristischer Wert für Reibungswinkel und Kohäsion eingesetzt werden, wobei ein charakteristischer Wert als vorsichtig geschätzter Mittelwert definiert ist. Meist ist in Bauprojekten nicht genug Geld für vielzählige Laborversuche vorhanden und es wird nur ein Versuch mit drei Laststufen zur Bestimmung der Scherfestigkeit durchgeführt und damit dann die charakteristischen Werte für Reibungswinkel und Kohäsion festgelegt. Statistisch kann der Forderung nach einem vorsichtig geschätzten Mittelwert mit z.B. einer unteren Schranke nachgekommen werden. Eine objektive Möglichkeit dies zu tun, ist den Bereich zu ermitteln, in dem mit 90% Wahrscheinlichkeit die Versuchsergebnisse liegen. Die hier durchgeführten 6 Laststufen lassen folgende Auswertung zu: Betrachtet man die Parameter ϕ und c als unabhängig und nimmt an, dass die Ergebnisse der sechs Laststufen auch verschiedene Ergebnisse von Triaxialversuchen zu einem Material sein können, dann kann aus drei willkürlich gewählten Laststufen ein Versuchsergebnis eines üblichen Triaxialversuches generiert werden. Die Laststufen wurden daher drei Mal willkürlich kombiniert und aus den so erhaltenen

Scherparametern der Mittelwert und die Standardnormalverteilung der beiden Parametern ϕ und c berechnet, siehe Abbildung 8

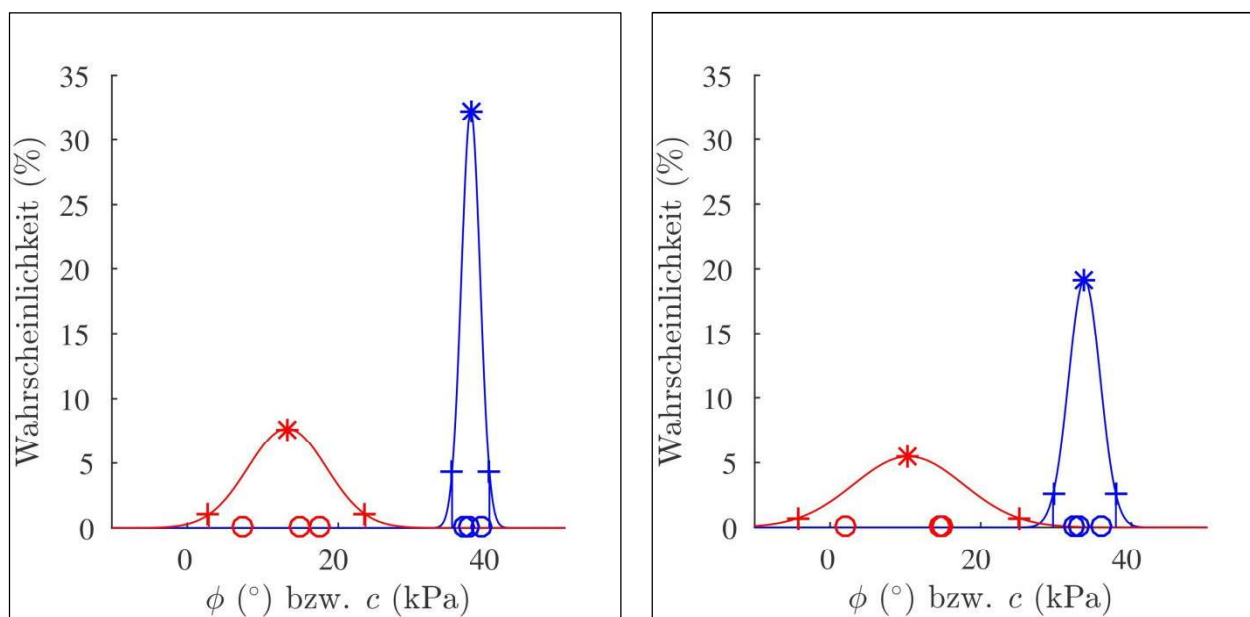


Abb. 8: Standardnormalverteilung Versuchsergebnisse, Reibungswinkel ϕ in blau, Kohäsion c in rot, links für den Feinsand, rechts für den natürlichen Boden. Die Kreise markieren dabei die Parameter aus den drei Kombinationen von jeweils drei Laststufen von insgesamt 6 Laststufen und die Sterne die daraus gebildeten Mittelwerte. Als Striche sind die 5% und 95% Konfidenzgrenzen zu erkennen.

und Tabellen 3 und 4. Dabei wurden die Laststufen 50, 100 und 150 kPa zu einem Versuch zusammengefasst, die Laststufen 200, 250, 300 kPa zu einem zweiten und die Laststufen von 50, 150, 250 kPa zu einem dritten. In Abbildung 8 ist der Bereich in dem 90% Wahrscheinlichkeit die Werte für die Kohäsion und für den Reibungswinkel liegen durch die vertikalen Linien begrenzt worden. Nachdem eine negative Kohäsion nicht möglich ist, wird der aus Standardnormalverteilung folgende negative Bereich nicht berücksichtigt. Als Parameter ergeben sich dadurch für den Feinsand eine Spanne für den Reibungswinkel zwischen 35.07° und 40.03° und für die Kohäsion von 2.85 kPa und 23.61 kPa und für den natürlichen Boden eine Spanne zwischen 29.59° und 37.93° bzw. 0 kPa und 24.98 kPa.

Tab. 3: Parameter Feinsand, Parameter als unabhängig betrachtet

Laststufen in kPa	ϕ in $^\circ$	ϕ_{mean} in $^\circ$	$\phi_{95\%}$ in $^\circ$	$\phi_{5\%}$ in $^\circ$	$\Delta\phi$ in $^\circ$	c in kPa	c_{mean} in kPa	$c_{95\%}$ in kPa	$c_{5\%}$ in kPa	Δc in kPa
50, 100, 150	38.92	37.50	40.03	35.07	5.04	7.42	13.23	23.61	2.85	20.76
200, 250, 300	36.51					17.40				
50, 150, 250	37.22					14.87				

Tab. 4: Parameter Natürlicher Boden, Parameter als unabhängig betrachtet

Laststufen in kPa	ϕ in $^\circ$	ϕ_{mean} in $^\circ$	$\phi_{95\%}$ in $^\circ$	$\phi_{5\%}$ in $^\circ$	$\Delta\phi$ in $^\circ$	c in kPa	c_{mean} in kPa	$c_{95\%}$ in kPa	$c_{5\%}$ in kPa	Δc in kPa
50, 100, 150	36.13	33.76	37.93	29.59	8.34	2.00	10.41	24.98	0.00	24.98
200, 250, 300	32.20					14.83				
50, 150, 250	32.96					14.40				

Tab. 5: Parameter Feinsand, Parameter als abhängig betrachtet

Laststufen in kPa	ϕ_{mean} in °	$\phi_{95\%}$ in °	$\phi_{5\%}$ in °	$\Delta\phi$ in °	c_{mean} in kPa	$c_{95\%}$ in kPa	$c_{5\%}$ in kPa	Δc in kPa
50, 100, 150	38.92	38.94	38.90	0.04	7.42	11.82	3.01	8.81
200, 250, 300	36.51	36.55	36.21	0.34	17.40	38.08	0.00	38.08
50, 150, 250	37.22	37.24	35.22	2.02	14.87	50.46	0.00	50.46
50, 100, 150, 200, 250, 300	36.58	36.59	36.57	0.02	17.70	24.37	11.05	13.32

Tab. 6: Parameter natürlicher Boden, Parameter als abhängig betrachtet

Laststufen in kPa	ϕ_{mean} in °	$\phi_{95\%}$ in °	$\phi_{5\%}$ in °	$\Delta\phi$ in °	c_{mean} in kPa	$c_{95\%}$ in kPa	$c_{5\%}$ in kPa	Δc in kPa
50, 100, 150	36.13	36.12	33.99	2.14	2.00	16.97	0.00	16.97
200, 250, 300	32.20	32.20	31.79	0.41	14.83	34.18	0.00	34.18
50, 150, 250	32.96	33.00	27.30	5.70	14.40	75.70	0.00	75.70
50, 100, 150, 200, 250, 300	32.16	32.17	32.16	0.01	16.98	27.08	8.87	18.21

Nachdem meist nur ein einziger Versuch mit drei Laststufen zur Verfügung steht, wird in [2] daher vorgeschlagen die Abhängigkeit der Parameter ϕ und c zu berücksichtigen und die Streuung der drei Laststufen zu nutzen, um daraus eine Bandbreite an plausiblen Parametern zu erhalten, siehe Tabellen 5 und 6. In den Abbildungen 6 und 7 sind die Konfidenzgrenzen (5% und 95% -Konfidenzgrenze) als rot gestrichelte Linien als im relevanten Spannungsbereich linearisierte Konfidenzhyperbeln mit den entsprechenden Scherparametern dargestellt. Das führt dazu, dass für den Feinsand im niedrigeren Spannungsniveau die Werte zwischen 38.90° und 38.94° für die Reibungswinkel und zwischen 3.01 kPa und 11.82 kPa für die Kohäsion schwanken. Im hohen Spannungsbereich liegen diese Werte zwischen 36.21° und 36.55° für die Reibungswinkel bzw. zwischen 0.00 kPa und 38.08 kPa für die Kohäsion. Noch größer werden die Schwankung, wenn zur Auswertung drei zufällig gewählte Spannungsniveaus betrachtet werden (35.22° und 37.24° für die Reibungswinkel bzw. 0.00 kPa und 50.46 kPa für die Kohäsion). Deutlich enger beieinander liegen die Werte für Reibungswinkel und Kohäsion, wenn zur Auswertung 6 Lastniveaus herangezogen werden (36.57° und 36.59° für die Reibungswinkel bzw. 11.05 kPa und 24.37 kPa für die Kohäsion). Die größeren Schwankungen bei der Kohäsion ergeben sich durch die hyperbolische Form der Konfidenzgrenzen, die trotz der Linearisierung im entsprechenden Spannungsbereich einen großen Abschnitt auf der Ordinate für die Kohäsion bedingen. An den Versuchsergebnissen an natürlichem Boden sind die gleichen Tendenzen erkennbar, die Schwankungsbreite ist aber deutlich größer (27.30° und 33.00° für die Reibungswinkel bzw. 0.00 kPa und 75.70 kPa für die Kohäsion, bei zufällig ausgewählten Laststufen).

6. Schlussfolgerungen

Betrachtet man die beiden Parameter der linearen Regression Reibungswinkel ϕ und Kohäsion c als voneinander unabhängig, so ist es aus nur einem Versuch mit drei Laststufen nicht möglich einen statistisch abgesicherten Mittelwert zu bestimmen, denn dieser Versuch liefert nur einen Parametersatz. Betrachtet man hingegen Reibungswinkel ϕ und Kohäsion c als voneinander abhängig, da sie beide die Parameter ein und derselben linearen Regression darstellen, kann aus der Güte der Regression (der

Abweichungen der Peakspannungen, der drei einzelnen Laststufen von der Regressionsgerade) ein Konfidenzintervall mit 90% Wahrscheinlichkeit gebildet werden. Dadurch ergeben sich Bandbreiten für den Reibungswinkel ϕ von 2.02° (Feinsand), bzw. 5.70° (natürlicher Boden) und für die Kohäsion c von 50.46 kPa und 75.70 kPa. Werden im Labor statt der drei Laststufen sechs Laststufen durchgeführt, wird das Band der Konfidenzgrenzen deutlich schmaler (ϕ von 0.02° (Feinsand) und 0.01° (natürlicher Boden) bzw. c von 13.32 kPa und 18.21 kPa). Vor allem für den Reibungswinkel liegen die möglichen Werte innerhalb einer sehr geringen Bandbreite. Werden die Parameter als voneinander unabhängig betrachtet, können sechs Laststufen so kombiniert werden, dass sich drei Versuche ergeben. Daraus gebildete Konfidenzintervalle führen zu deutlich größeren Bandbreiten für den Reibungswinkel (ϕ von 5.04° (Feinsand) und von 8.34° (natürlicher Boden)) und die Kohäsion (c von 20.76 kPa und 24.98 kPa).

Als charakteristische Parameter können die 5% Fraktilwerte interpretiert werden. Dies liefert für einen Versuch mit drei Laststufen für den Reibungswinkel Werte zwischen 25.22° und 38.90° (Feinsand), bzw. 27.30° und 33.99° (natürlicher Boden) und für die Kohäsion Werte zwischen 0.00 kPa und 3.01 kPa (Feinsand) bzw. 0.00 kPa (natürlicher Boden). Stehen zur Auswertung sechs Laststufen zur Verfügung, dann entspricht der 5% Fraktilwert für den Reibungswinkel 36.57° (Feinsand) bzw. 32.16° (natürlicher Boden) und für die Kohäsion 11.05 kPa (Feinsand) bzw. 8.87 kPa (natürlicher Boden), wenn die Scherparameter als voneinander abhängig betrachtet werden. Werden Reibungswinkel ϕ und Kohäsion c als voneinander unabhängig angenommen, dann liegt der 5% Fraktilwert, mit 35.07° (Feinsand) bzw. 29.59° (natürlicher Boden) für den Reibungswinkel und 2.85 kPa (Feinsand) bzw. 0.00 kPa (natürlicher Boden) für die Kohäsion, deutlich darunter.

Literatur

- [1] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18137-2:2011-04: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 2: Triaxialversuch. Beuthverlag.
- [2] Fellin, W.; Berghamer, S.; Renk, D. (2009): Konfidenzgrenzen der Scherfestigkeit als Grundlage zur Festlegung charakteristischer Scherparameter. In Geotechnik 32(1), S. 30-36.
- [3] Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM B 4416: 1978 06 01: Erd- und Grundbau; Untersuchung von Bodenproben; Grundsätze für die Durchführung und Auswertung von Scherversuchen. Austrian Standards.
- [4] Shibuya, S.; Mitachi, T.; Tamate, S. (1997): Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear. In Geotechnique 47(4), S. 769-790.
- [5] Schuppener, B. (1999): Die Festlegung charakteristischer Bodenkennwerte Empfehlungen des Eurocodes 7 Teil 1 und die Ergebnisse einer Umfrage. In Geotechnik, Sonderheft, S. 32-35.10