

Einflüsse auf Ergebnisparameter bei bodenmechanischen Laborversuchen

Jonathan Beil, Hermann Busse, Alexander Knut, Julian Röntgen, Friedemann Sandig

HTWK Leipzig, Fakultät Bauwesen, GEONETIC, Karl-Liebknecht-Str. 132, 04277 Leipzig

Kurzfassung

Bei bodenmechanischen Laborversuchen sind Streuungen der Ergebniswerte in der Regel durch das Bodenmaterial zu begründen. Teilweise sind sie jedoch auch auf Einflüsse aus der Durchführung des Versuches zurückzuführen. So wurde bei vergleichenden Untersuchungen mehrerer Labore starke systematische Abweichungen bei der Ermittlung der Scherparameter, mit Hilfe des Rahmenscherversuches beobachtet. Diese Abweichungen werden im vorliegenden Beitrag systematisch im Hinblick auf konkrete Einflussgrößen untersucht. Dabei wurde die in der statistischen Versuchsplanung verbreitete Methode nach Taguchi verwendet und durch eine Varianzanalyse (ANOVA) sowie eine Mittelwertanalyse (ANOM) ausgewertet. Im Beitrag wird die Streuung des Mittelwerts von Peak- und Restreibungswinkel eines enggestuften Sandes analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählte Methode der Probenkörperherstellungsmethoden einen signifikanten und dominierenden Einfluss auf die Ergebnisgrößen hat.

1. Einleitung

Der Rahmenscherversuch ist ein genormter Versuch zur Ermittlung der Scherparameter (Reibungswinkel und Kohäsion) eines Bodens. Dazu wird eine Probe in einen horizontal geteilten Rahmen eingebaut, mit einer Normalkraft N beaufschlagt und somit konsolidiert. Nach abgeschlossener Konsolidation wird eines der Rahmenteile mit konstanter Geschwindigkeit verschoben, wodurch eine horizontale Kraft aufgebracht wird (Abbildung 1). Die dabei gemessene Scherspannung in Relation zur Normalspannung ist Grundlage für die Ermittlung des Reibungswinkels (DIN EN ISO 17892-10). Trotz der Standardisierung, variieren die Ergebnisse unterschiedlicher Labore in Vergleichenden Untersuchungen teilweise um $\pm 15\%$ (Erik Schwiteilo, 2018). Da der Reibungswinkel und die Kohäsion, die mit dem Rahmenscherversuch ermittelt werden, für eine Vielzahl von geotechnischen Bemessungsaufgaben und Standsicherheitsuntersuchungen benötigt werden, ist eine hohe Qualität und damit einhergehend eine gute Vergleichbarkeit der ermittelten Daten von Bedeutung. Im vorliegenden Beitrag wurden insbesondere diejenigen Einflussgrößen untersucht welche in der nationalen sowie internationalen Normung unpräzise oder nicht eindeutig beschrieben sind und dem ausführenden Labor somit Spielraum bei der Durchführung des Versuches lassen.

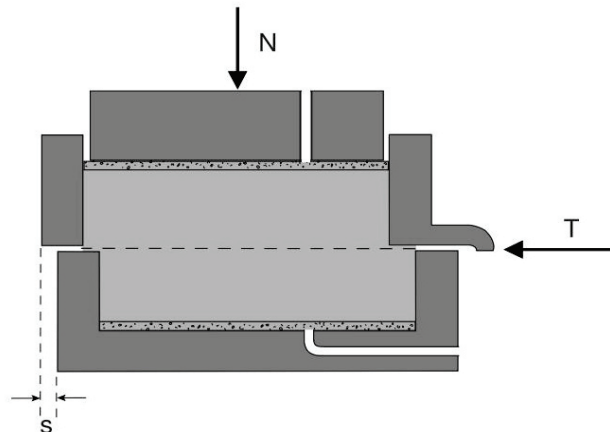


Abbildung 1 Prinzipskizze Rahmenscherversuch (Kolymbas, 2019)

2. Methodik und Material

Für die Versuchsdurchführung wurde ein enggestufter Mittelsand ohne Feinanteile gewählt. Dieser wurde trocken mit zwei verschiedenen, etablierten Methoden eingebaut. Durch die Einschränkung auf trockene Proben ohne Feinanteil soll die Reproduzierbarkeit erhöht und vor allem die Streubreite der Ergebnisse möglichst geringgehalten werden. Diese gewählten unabhängigen Randbedingungen reduzieren die Untersuchungen auf die abhängigen Ergebnisgrößen Peak- und Restreibungswinkel, da grobkörnige Böden keine tatsächliche Kohäsion aufweisen (Boley, 2012, S. 44). Der Peak-Reibungswinkel beschreibt die Tragfähigkeit bei maximaler Lastaufnahme, wohingegen der Restreibungswinkel die Tragfähigkeit nach großer Scherdeformation beschreibt.

Als Einflussfaktoren wurden die Schergeschwindigkeit (SG), das Öffnungsmaß des Scherspalt (SP), die Probengeometrie (PG) sowie die Probenherstellungsmethode (PM) gewählt, da diese Parameter entweder nach Normung eine Einstellbarkeit zulassen (*DIN EN ISO 17892-10*) oder ihnen in der Literatur zumindest in gewissem Maß ein Einfluss zugeschrieben wird (Fu et al., S. 7). Außerdem wurde untersucht, ob eine Wechselwirkung zwischen Scherspalt und Schergeschwindigkeit vorhanden ist (WW).

Die Probenherstellungsmethoden „Air Pluviation“ (AP) und Vibration unter statischer Auflast (V) sind für trockenes Material gut geeignet und besitzen eine hohe Reproduzierbarkeit (Miura & Toki, S. 68). Bei „Air Pluviation“ wird mittels eines Siebturms das Material in den Scherkasten eingebracht und überschüssiges Material abgezogen (Abbildung 2). Bei Einbau durch Vibration wird eine entsprechende Menge an Material in den Scherkasten mittels eines Trichters locker eingebracht und durch Vibration unter statischer Auflast auf die gewünschte Dichte verdichtet (Abbildung 3).



Abbildung 2 Air Pluviation

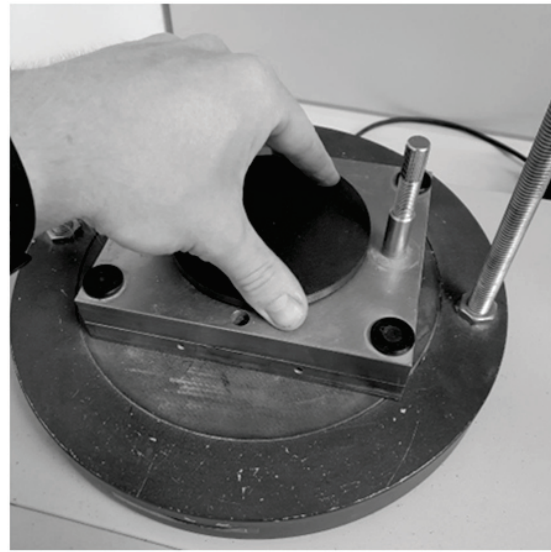


Abbildung 3 Vibration

Mittels der Taguchi Methode wurde ein hochvermengerter teilfaktorieller Versuchsplan erstellt (Tabelle 1), anhand dessen die Untersuchung durchgeführt wurde. Jede der dort gezeigten Versuchsanordnungen wurde drei Mal wiederholt, um statistische Relevanz zu gewährleisten. Die Ergebnisse wurden mittels einer angepassten Varianzanalyse (ANOVA¹) und Mittelwertanalyse (ANOM²) ausgewertet. Bei der Mittelwertanalyse wird die mittlere Abweichung einer Faktorstufe vom Gesamtmittelwert analysiert und somit bestimmt, in welcher Richtung sich diese Einstellung auswirkt. Bei der Varianzanalyse werden die einzelnen Faktorstufen auf ihre prozentuale Wirkung auf die Zielgröße untersucht.

Tabelle 1 Hochvermengte teilfaktorielle Versuchsmatrix nach Taguchi

Experiment Nr.	Faktorzuweisung				
	SG [mm/min]	SP [mm]	WW	PG [cm ²]	PH
1	0,2	0,1	1	40	AP
2	0,2	0,1	1	70	V
3	0,2	0,3	2	40	AP
4	0,2	0,3	2	70	V
5	0,5	0,1	2	40	V
6	0,5	0,1	2	70	AP
7	0,5	0,3	1	40	V
8	0,5	0,3	1	70	AP

¹ ANOVA (Abk.) Analysis of Variance

² ANOM (Abk.) Analysis of means

3. Ergebnisse

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Varianzanalyse (ANOVA) als die prozentualen Effekte der Einflussgrößen auf den Peak-Reibungswinkel dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Probenherstellungsmethode den größten Einfluss auf das Ergebnis aufweist. Deutlich geringer, jedoch trotzdem signifikant, zeigt die Probengeometrie Einfluss auf den Peak-Reibungswinkel. Scherspalt und Schergeschwindigkeit weisen keinen signifikanten Einfluss auf. Der Fehler F2 steht für die Zufallsstreuung sowie für alle Einflüsse von nicht untersuchten Faktoren. Mit 7,77% fällt dieser Fehler verglichen mit den signifikanten Einflussgrößen gering aus, was die Auswahl der Einflussfaktoren bestärkt.

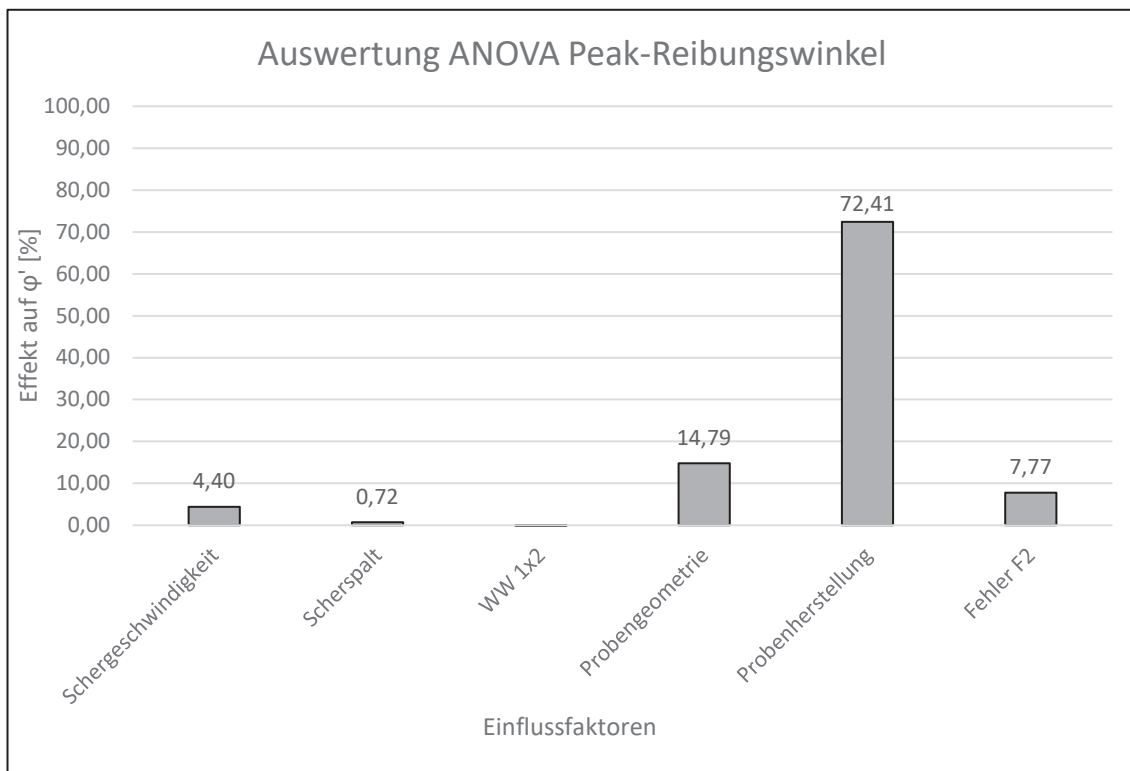


Abbildung 4 Ergebnisse Varianzanalyse (ANOVA) Peak-Reibungswinkel

Die Ergebnisse der Mittelwertanalyse (ANOM) zeigen, dass die ermittelten Peak-Reibungswinkel der mittels Air Pluviation hergestellten Proben deutlich größer sind als die der durch Vibration erzeugten Proben. Ein kleinerer Scherkasten verursacht ebenso einen größeren Peak-Reibungswinkel verglichen mit dem größeren Scherkasten (Abbildung 5). Die dort sichtbaren Einflüsse aus Scherspalt und Schergeschwindigkeit sind auf die Streuung der Ergebnisse zurückzuführen, da in der Varianzanalyse deutlich wurde, dass diese Einflussfaktoren keinen signifikanten Einfluss besitzen. Signifikante Einflüsse auf den Restreibungswinkel konnten nicht nachgewiesen werden.

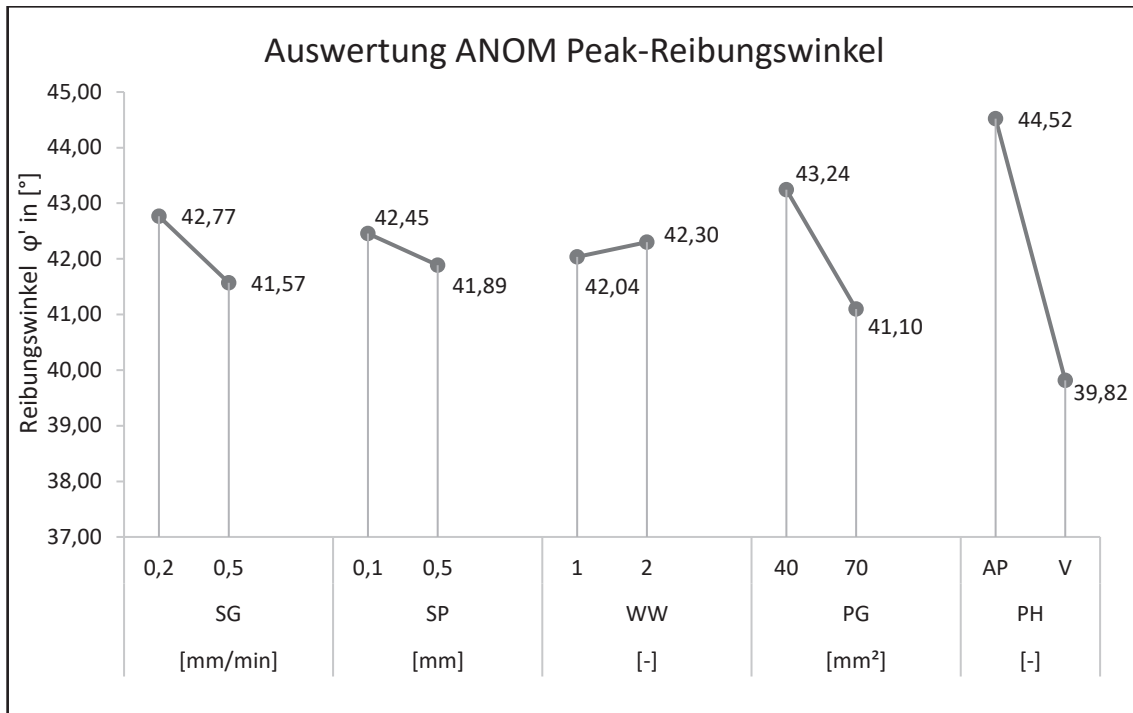


Abbildung 5 Ergebnisse Mittelwertanalyse (ANOM) Peak-Reibungswinkel

4. Diskussion

Die Beobachtungen der eigenen experimentellen Arbeit zeigen, dass der Reibungswinkel stark von der Methode der Probenherstellung abhängt. Dies wird mit der unterschiedlichen Ausbildung des Korngerüsts, welche durch die Herstellungsmethode verursacht wird, begründet. Es wird angenommen, dass die Kornkontakte in eine Vorzugsrichtung ausgerichtet sind und so die geometrisch bedingte Anisotropie (Ning Guo, 2013), einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Für die vibrierende Methode der Probenherstellung scheint sich diese Vorzugsrichtung parallel zur Scherbelastung auszubilden, was in einer geringeren Lastaufnahme während der Deformation und somit in einem geringeren Peak-Reibungswinkel resultiert.

Das Korngerüst wird durch den Schervorgang umgeordnet. Partikel orientieren sich in einem neuen, über alle Versuche ähnlichen, Ordnungszustand was in den Experimenten eine immer gleiche Restscherfestigkeit zur Folge hat.

5. Fazit

Bei der Ausführung und Auswertung des Scherversuchs wird der konkreten Methode der Probekörperherstellung, sowie dem Scherkastendurchmesser in der Regel kaum Aufmerksamkeit gewidmet. Die Untersuchungen zeigen allerdings eine Abweichung des Mittelwerts des Reibungswinkels durch unterschiedliche Probenherstellungsmethoden um knapp 5°. Je nach betrachteten Grenzzustand kann dieser Wert erhebliche Auswirkungen auf den ermittelten Ausnutzungsgrad haben, verstärkt durch die Unsicherheiten ergebend aus Probenentnahme und Probenanzahl. Um diese Unsicherheiten zu mindern, und somit sowohl angemessen wirtschaftlich als auch sicherheitsrelevant bemessen zu können, wird empfohlen, die Einbauvariante möglichst der lokalen Untergrund-

genese anzugleichen und zu dokumentieren. Weiterhin werden im aktuellen Normenentwurf des EC7-1 (prEN 1997-1:2022-10) statistische Verfahren zur Ermittlung des repräsentativen (vormals charakteristischen) Wertes als Basis für die Bemessung zugelassen. Diese Methoden erlauben eine unmittelbare Berücksichtigung der Unsicherheiten aus der Kennwertermittlung in Form eines Variationskoeffizienten. Eine kürzlich vorgeschlagene Erweiterung dieser Methoden (Tafur, Ziegler, 2022) liefert einen praktischen Leitfaden für den Umgang mit diesen Unsicherheiten bei der Ermittlung der Kennwerte als Basis für die geotechnische Bemessung.

Literaturverzeichnis

- DIN EN ISO 17892-10:2019-04, Geotechnische Erkundung und Untersuchung. Laborversuche an Bodenproben Teil 10 direkte Scherversuche.* Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- prEN 1997-1:2022-10 (2022). Eurocode 7: Geotechnical Design - Part 1: General Rules.* Draft.
- Boley, C. (2012). *Handbuch Geotechnik: Grundlagen - Anwendungen - Praxiserfahrungen.* Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Erik Schwiteilo, I. H. (2018). *Bewertung von Scherversuchen aus Vergleichsuntersuchungen an feinkörnigem Boden.* Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden.
- Kolybas, D. (2019). *Geotechnik.* Springer Vieweg Berlin, Heidelberg.
- Fu, W., Zheng, X., Lei, X. & Deng, J. (2015) *Using a modified direct shear apparatus to explore gap and size effects on shear resistance of coarse-grained soil.* *Particle Technology* 23, S. 82–89.
- Guo, Ning; Zhao, Jidong (2013): *The signature of shear-induced anisotropy in granular media.* *Computers and Geotechnics* 47, S. 1–15.
- Miura, S. & Toki, S. (1982) *A Sample Preparation Method and its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand.* *Soils and Foundations* 22, S. 61–77.
- Tafur, E.; Ziegler, M. (2022) *Harmonisierung in der Geotechnik – eine statistische Methode zur Ermittlung der repräsentativen Werte geotechnischer Kenngrößen unter Berücksichtigung von Vorinformationen.* *Geotechnik* 45, S. 178–196.