

Zürn, Jochen; Mugele, Luis; Stutz, Hans Henning

Experimentelle Untersuchungen zur partiellen Drainage im bodenmechanischen Elementversuch

Verfügbar unter / Available at:

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/113716>

Vorgeschlagene Zitierweise / Suggested citation:

Zürn, Jochen; Mugele, Luis; Stutz, Hans Henning (2023): Experimentelle Untersuchungen zur partiellen Drainage im bodenmechanischen Elementversuch. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Ohde Kolloquium 2023. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 7-11.



Experimentelle Untersuchungen zur partiellen Drainage im bodenmechanischen Elementversuch

Jochen Zürn M.Sc., Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik

Luis Mugele M.Sc., Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik

Prof. Dr.-Ing. Hans Henning Stutz, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik

Einführung

Bei der Durchführung klassischer Triaxialversuche an vollständig gesättigten Böden wird zwischen den beiden Extremfällen des drainierten und des undrainierten Versuchs unterschieden. Dabei wird entweder die volumetrische Verformung (undrainiert) oder die Porenwasserdruckänderung (drainiert) der Probe versucht auszuschließen. In gesättigten Böden in situ kommt es jedoch häufig zu Situationen, in denen sowohl Porenwasserdruckänderungen als auch volumetrische Verformungen simultan auftreten. Dies ist im Allgemeinen als partiell drainiertes Problem bekannt. Beispiele hierfür sind die Gründung von Offshore-Pfählen oder Wellenbelastungen auf Bauwerke.

Die vorliegende Arbeit präsentiert einen experimentellen Ansatz, bei dem die volumetrische Verformung und die Porenwasserdruckänderung einer Probe in einem global undrainierten Triaxialversuch über die Kompressionssteifigkeit einer im Versuchsaufbau eingeschlossenen, definierten Gasblase gekoppelt wird. Somit ergeben sich sowohl volumetrische Verformungen als auch Porenwasserdruckänderungen in der Probe, welche jeweils als homogene Felder angenommen werden können. Im Vergleich zu gängigen Methoden in der Literatur, bei denen der Ausflusswiderstand der Drainage variiert wird (Suzuki et al. 2020; Umehara et al. 1985), können durch diesen neuartigen Ansatz partielle Drainagebedingungen bei ratenunabhängigen Stoffverhalten unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit als auch Probengeometrie erreicht werden. Somit ergeben sich unkonventionelle Spannungs- bzw. Dehnungspfade, welche zwischen den bekannten drainiertem bzw. undrainierten Materialverhalten liegen. Daten einer Versuchsreihe von 6 monotonen Triaxialversuche an Karlsruher Feinsand (KFS) und deren Simulationen mit einem hypoplastischen Stoffmodell bestätigen das vorgestellte Versuchskonzept.

Versuchsaufbau und Versuchsmaterial

Die partielle Drainagebedingung wird durch einen Umbau eines vorhandenen Triaxialversuchsstands erreicht. Der Versuch ist in Abbildung 1 schematisiert dargestellt. Die Probe ist an eine Bürette mit eingeschlossener Gasblase hydraulisch angeschlossen. Die Gasblase hat den Luftdruck u_a , welcher auf das Porenwasser wirkt. Das anfängliche Gasvolumen $V_{a,0}$ ist bekannt und kann vor Versuchsbeginn eingestellt werden. Der anfängliche Luftdruck $u_{a,0}$ wird mit dem Porendruckaufnehmer unter Berücksichtigung der hydrostatischen Spiegelhöhe h_0 gemessen. Eine Volumenänderung der Probe bewirkt ein aus- bzw. einfließen von Wasser. Dieser Wasserfluss führt zu einer Änderung der Gasblasengröße

$$V_a = V_{a,0} - A \cdot \Delta h \quad (1)$$

und des Luftdrucks u_a . Mit dem Gesetz von Boyle-Mariotte $u_a \cdot V_a = \text{const.}$, den bekannten Anfangsgrößen $u_{a,0}$, $V_{a,0}$, h_0 , der Grundfläche A der Bürette und dem gemessenen Porenfluiddruck u_f kann die Spiegelhöhenänderung Δh berechnet werden:

$$V_a = \frac{V_{a,0} \cdot u_{a,0}}{u_f - (h_0 - \Delta h) \cdot \gamma_w} \quad (2)$$

Der Versuch wird in einem klimatisierten Raum durchgeführt, um die Temperatur der Gasblase über die Versuchsdauer konstant zu halten. Eine Temperaturänderung aufgrund der Kompression/Extension der Gasblase kann aufgrund der gering gewählten Belastungsgeschwindigkeiten ausgeschlossen werden. Die Versuche wurden mit Karlsruher Feinsand (KFS) durchgeführt. Die zugehörige Korngrößenverteilung ist in Abbildung 2 dargestellt. Tabelle 1 zeigt Kennwerte des untersuchten Quarzsandes.

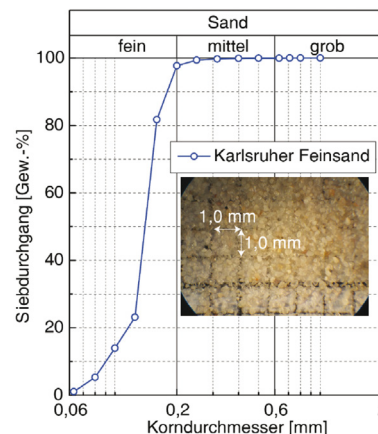
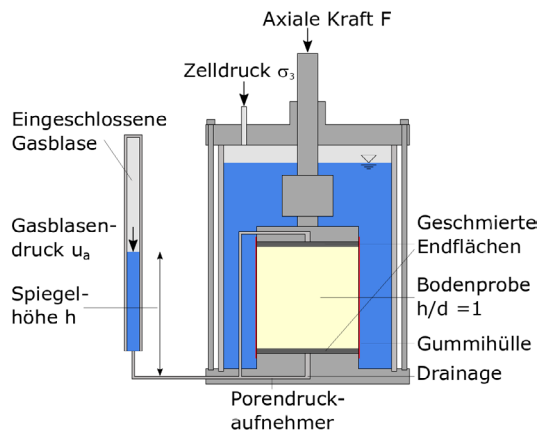


Abbildung 4: Schematisierter Versuchsaufbau Abbildung 2: KGV von KFS (Knittel et al. 2021)

Tabelle 1: Kennwerte von KFS (Wichtmann 2016)

d_{50} [mm]	C_u [-]	ρ_s [g/cm ³]	$\rho_{d,max}$ [g/cm ³]	$\rho_{d,min}$ [g/cm ³]	$M_{c,PTL}$ [-]	$M_{c,FL}$ [-]
0,14	1,5	2,65	1,580	1,290	1,221	1,414

Versuchsergebnisse

Es wurden vier monotone Triaxialversuche mit eingeschlossener Gasblase von einem isotropen Anfangsspannungszustand $p_0 = 200$ kPa und mitteldichter Lagerungsdichte durchgeführt. Die Anfangsbedingungen der Versuche sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Um den Einfluss der Gasblase auf das Probenverhalten zu untersuchen wurde das Gasblasenvolumen $V_{a,0}$ variiert. Versuch Nr. 3 wurde mit gleichem Gasblasenvolumen wie Versuch Nr. 2, aber einer 10-fach reduzierten Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt, um die Geschwindigkeitsunabhängigkeit des Versuchsaufbau zu zeigen. Das Versuchsprogramm wurde mit einem drainierten und einem undrainierten Triaxialversuch ergänzt.

Tabelle 2: Übersicht über die durchgeführten Versuche vor Versuchsbeginn

Versuch Nr.	$I_{D,0}$ [-]	$V_{a,0}$ [cm ³]	\dot{s} [mm/min]	K_m [MPa]
1	0,42	53,66	0,1	13,22
2	0,38	19,49	0,1	35,80
3	0,39	19,49	0,01	35,70
4	0,39	1,04	0,1	554,30
undrainiert	0,41	-	0,1	4467,23
drainiert	0,41	-	0,1	0,5

Der Kompressionsmodul der Substanz K_m , bestehend aus Luft, Wasser und den Körner, kann mittels mit dem Ansatz einer Serienschaltung der drei Konstituenten mit den Kompressionsmodulen $K_m = 2,2$ GPa, $K_w = u_a$ und der Annahme $K_s = 100$ GPa berechnet werden. Diese werden über die Volumenanteile n' gewichtet:

$$K_m = [n'(1 - S')/K_a + n' S'/K_w + (1 - n')/K_s]^{-1} \quad (3)$$

Da K_m über die Volumenanteile n' gewichtet wird, müssen hierfür nicht nur die Volumenanteile innerhalb der Probe, sondern die Volumenanteile der Drainageleitungen und der Bürette mitbetrachtet werden. Die ermittelten Werte K_m sind ebenfalls in Tabelle 2 aufgeführt. Im Vergleich von Versuch Nr. 1,2 und 4 zeigt sich, dass eine Vergrößerung von $V_{a,0}$ zu einer deutlichen Reduzierung von K_m führt. Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

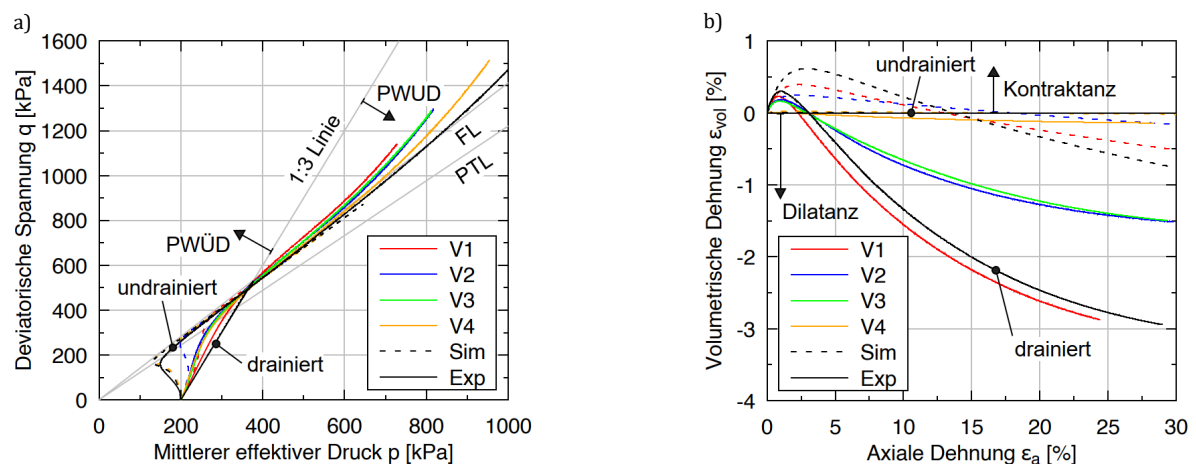


Abbildung 3: Versuchsergebnisse und Nachrechnungen monotonen Triaxialversuche: a) Spannungspfad im p - q Diagramm b) Dehnungspfad im ϵ_a - ϵ_{vol} Diagramm (Zürn et al. 2023)

Die Spannungs- bzw. Dehnungspfade aller partiell drainierten Versuche liegen zwischen den Versuchsergebnissen des drainierten bzw. undrainierten Versuchs. Ebenso können für diese Versuche sowohl Änderungen im Volumen als auch vom Porenwasserdruck beobachtet werden. Mit der Größe der Gasblase kann das Verhalten der Probe in Richtung eines drainiertes oder undrainiertes Versuchs verändert werden. Dies zeigt sich gut bei den Versuchen Nr. 1 und 4, die ähnliche Versuchsergebnisse wie der drainierte bzw. undrainierte Versuch liefern. Versuche mit großer

Gasblase zeigen dabei ein Verhalten, dass näher am drainierten Fall liegt. Versuch Nr. 2 und 3 liefern sehr ähnliche Versuchsergebnisse und zeigen, dass sich mit dem Versuchsaufbau Belastungsratenunabhängig partiell drainierte Bedingungen testen lassen.

Elementestsimulationen

Die gezeigten Versuchsergebnisse können zur Validierung bzw. der Prüfung fortgeschrittener Stoffmodelle herangezogen werden. Eine solche Formulierung stellt die Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung (Hypo+ID) (Niemunis und Herle 1997) dar. Für die tensorielle Beziehung zwischen der Spannungsrate $\dot{\sigma}$ (objektiv, Jaumann) und der Dehnungsrate $\dot{\epsilon}$ gilt:

$$\dot{\sigma} = M(\sigma, e, \mathbf{h}, \dot{\epsilon}) : \dot{\epsilon} \quad (4)$$

Der Zustand des Bodens wird dabei durch die Zustandsvariablen Spannung σ , Porenzahl e und intergranulare Dehnung \mathbf{h} beschrieben. Die verwendeten Stoffmodellparameter für Karlsruher Feinsand sind der Literatur (Wichtmann 2016) entnommen (Tabelle 2.6, Set II).

Die Simulationsergebnisse, welche ebenfalls in Abbildung 3 abgebildet sind, geben die experimentellen Beobachtungen qualitativ wieder. Die anfängliche Kontraktanz zeigt sich bei großem Kompressionsmodul in einer Relaxation der effektiven Spannungen (Porenwasserüberdruck) und bei geringem Kompressionsmodul in einer Verdichtung. Nach einem relativ langen Scherweg ergibt sich ein dilatantes Verhalten, welches sich in Verspannungseffekten bzw. Auflockerungen zeigt. Quantitativ unterschieden sich die Simulationsergebnisse teils signifikant von den Versuchsergebnissen. Sowohl die Größenordnung der Dilatanz bzw. der Kontraktanz als auch die zum Übergang von der kontraktanten Phase zur dilatanten Phase erforderliche Dehnung unterscheidet sich teils erheblich.

Zusammenfassung

Die Verwendung der Kompressionssteifigkeit einer eingeschlossenen Gasblase stellt einen einfachen Ansatz dar, um zeitunabhängige partielle Drainagebedingungen in einem Triaxialversuch zu erreichen. Die Zeitunabhängigkeit des Ansatzes konnte experimentell nachgewiesen werden. Durch Variation des Gasblasenvolumens $V_{a,0}$ ist es möglich die Drainagebedingungen in Richtung drainierter bzw. undrainierter Bedingungen zu beeinflussen. Nachrechnungen zeigen jedoch eine unzulängliche Abbildung der Dilatanz in der Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung.

Literatur

- Knittel, L.; Triantafyllidis, T. (2021): Mehrdimensionale hochzyklische Beanspruchungen im Experiment und im Finite-Elemente-Modell. In: Bautechnik 98, H. 9, S. 627-639.
- Niemunis, A.; Herle, I. (1997): Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. In: Mechanics of Cohesive-frictional Materials 2, S. 279-299
- Suzuki, Y.; Carotenuto, P.; Dyvik, R.; Jostad, H.P. (2020): Experimental Study of Modeling Partially Drained Dense Sand Behavior in Monotonic Triaxial Compression Loading Tests. In: Geotechnical Testing Journal 43, no. 5, S. 1174-1190.
- Umehara, Y.; Zen, K.; Hamada, K. (1985): Evaluation of soils liquefaction potentials in partially drained conditions. In: Soils and Foundations 25, no. 2, S. 57-72.

Wichtmann, T. (2016): Soil behaviour under cyclic loading – experimental observations, constitutive description and applications. Habilitation, Karlsruher Institut für Technologie.

Zürn, J.; Mugele, L.; Stutz, H.H. (2023): Novel experimental method for rate-independent triaxial tests with partial drainage conditions. (In Vorbereitung)