

# Korrelation zwischen der Porenwasserdruckentwicklung in undrainierten und der Volumendehnung in drainierten Bedingungen für grobkörnige Materialien

Alina Charlotte Lachmann

## Einleitung

In einem locker gelagerten Boden unter drainierten Bedingungen, bei dem das Wasser aus dem Porenraum abfließen kann, führt eine Scherbelastung zu einem Zusammenrutschen der Körner und einer Volumenänderung. Unter undrainierten Bedingungen mit konstantem Volumen führt die Tendenz zur Verdichtung des Bodens zu einem Aufbau von Porenwasserüberdrücken. Dies legt einen Zusammenhang zwischen dem Verhalten von Sanden unter drainierten und undrainierten Bedingungen nahe.

Zur Untersuchung dieses Zusammenhanges wurden vereinfachte zyklische Scherversuche mit dem am Institut für Geotechnik entwickelten PWD-Tester sowie drainierte Triaxialversuche an Proben unterschiedlicher Lagerungsdichten  $I_D$  durchgeführt.

Es wurden drei enggestufte Sande ähnlicher Korngrößenverteilungen (Abb. 1) mit unterschiedlichen Kornformen untersucht. Neben einem natürlichen Sand (Toyoura Sand, TS) wurden ein Glaskugel-Gemisch (GS) mit runden Körnern und ein Brechsand-Gemisch (BS) scharfen Kanten betrachtet.

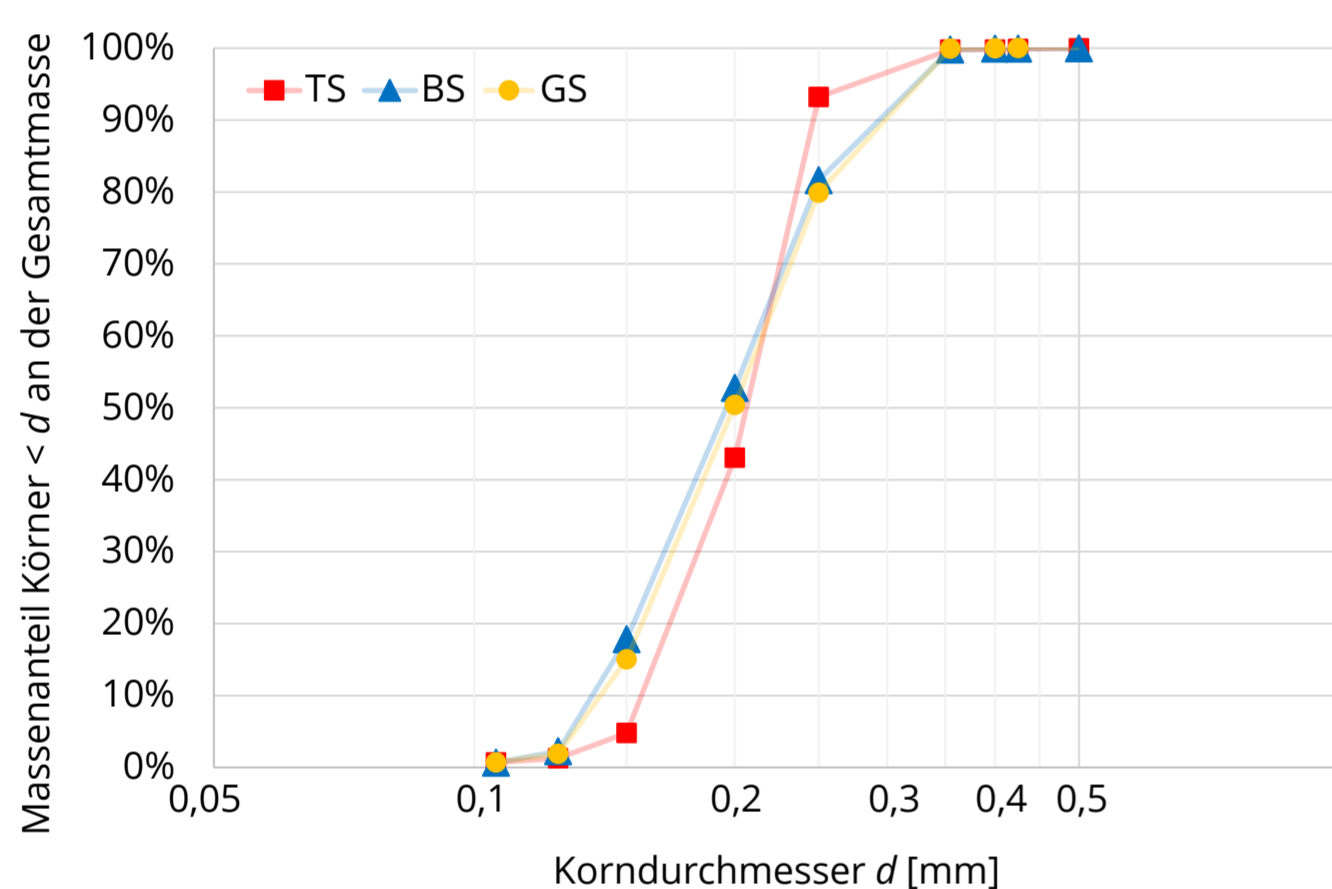


Abb. 1: Korngrößenverteilung der Versuchsböden.

## Undrainierte und drainierte Versuche mit dem PWD-Tester

### Undrainierte Versuche

Gesättigte und entlüftete Proben wurden unter Wasser eingebaut und mittels eines Fallrings unterschiedlich stark verdichtet. Nach einer Konsolidierung auf 60 kPa wurden die Proben bei einer Frequenz von 1 Hz mit einer Auslenkung von 2,4 mm mit geschlossener Drainage gesichert bis der Porenwasserdruck dem Umgebungsdruck entsprach.

Die während der Versuche gemessene Auslenkung wurde aufsummiert und auf die Probenhöhe bezogen, um  $\gamma_{sum}$  zu berechnen. Nach Normierung der Porenwasserdruckänderung wurde diese sowie  $\gamma_{sum}$  über der Durchschnittsbildung geglättet. Durch das Anlegen einer Sekante an die resultierende Kurve bei 40 % und

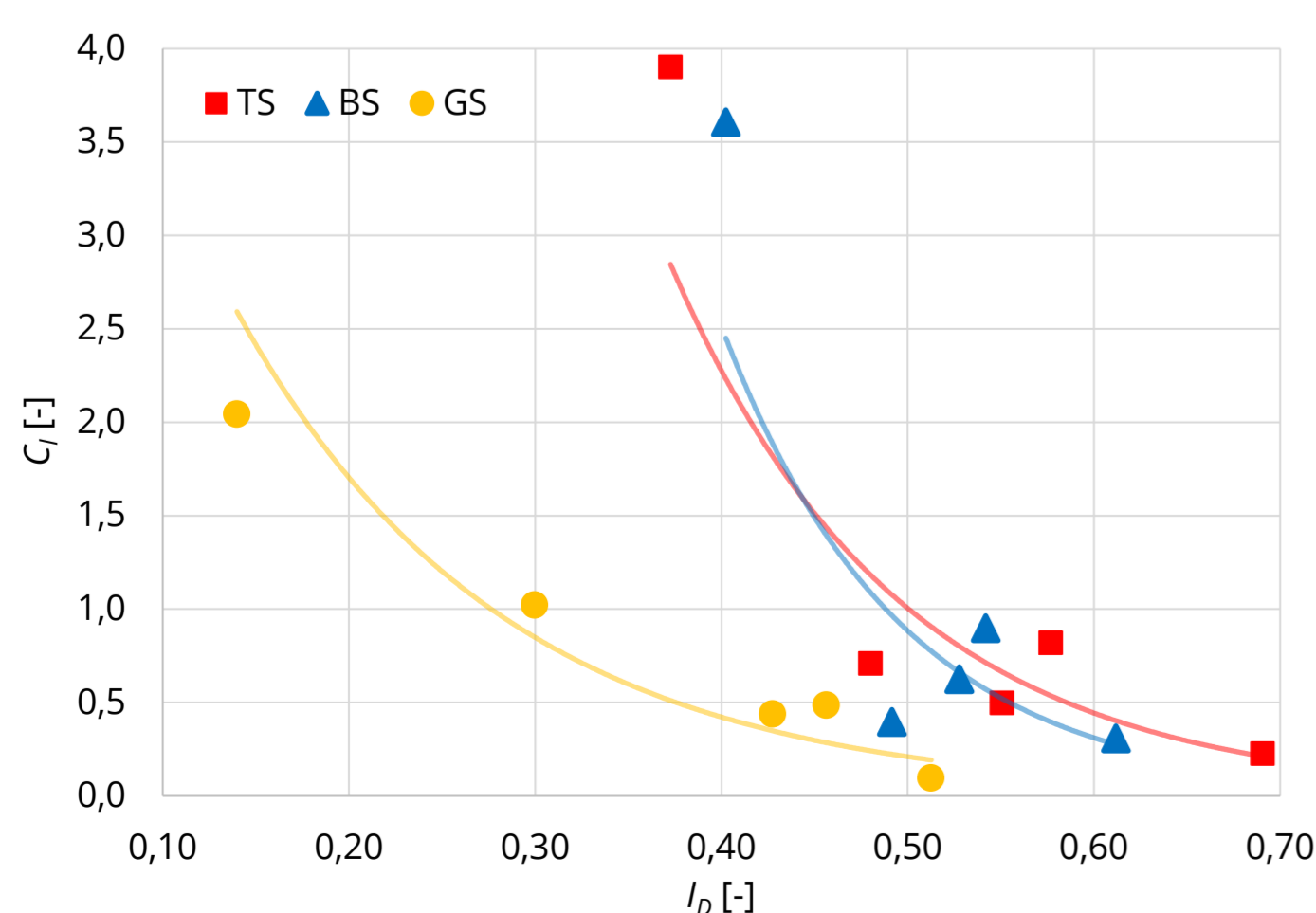


Abb. 2: Rate des Porenwasserdruckaufbaus  $C_f$  in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$  für die untersuchten Sande.

80 % Porenwasserdruckaufbau wurde der Anstieg der Sekante als  $C_f$ , der Rate des Porenwasserdruckaufbaus, bestimmt.  $C_f$  wurde in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte der konsolidierten Probe dargestellt und die Versuchsergebnisse mittels exponentieller Regressionen angenähert (Abb. 2).

### Drainierte Versuche

Die Durchführung und Auswertung der drainierten Versuche erfolgten zur Vergleichbarkeit, soweit möglich, analog zu den undrainierten Versuchen. Unterschiede bei der Durchführung lagen in einer verringerten Scherfrequenz von 0,1 Hz, einer geöffneten Drainage sowie der Erfassung der Volumenänderung der Proben über Aufnahmen des Druck-Volumen-Reglers. Zur Auswertung wurde analog zu  $C_f$  ein neuer Kennwert  $v_f$  als Rate der volumetrischen Dehnungen eingeführt. Dazu wurden die volumetrischen Dehnungen auf den kleinsten Maximalwert der volumetrischen Dehnung aller Versuche normiert.

Die drainierten Versuche wurden außerdem hinsichtlich der axialen Dehnungen über einen nach selbem Konzept gebildeten Kennwert  $a_f$  ausgewertet. Insbesondere bei Brechsand zeigte sich ein abweichendes Verhalten der axialen Dehnungen im Vergleich zu den volumetrischen Dehnungen.

### Undrainiertes und drainiertes Verhalten im Vergleich

Es lässt sich in Abbildungen 2 und 3 ein qualitativ ähnliches Verhalten erkennen.

Sowohl  $C_f$  als auch  $v_f$  nehmen mit zunehmender Probedichte ab. Glaskugeln wiesen in beiden Versuchen die geringsten bezogenen Lagerungsdichten  $I_D$  und die niedrigsten  $C_f$  und  $v_f$ -Werte auf. Auch Brechsand wies in beiden Versuchen einen ähnlichen Verlauf auf. Beim natürlichen Sand konnten sowohl  $C_f$  als auch  $v_f$ -Werte in ähnlicher Höhe wie bei Brechsand ermittelt werden, allerdings über unterschiedlich große Dichtebereiche. Dadurch verläuft die Regressionskurve bei den drainierten Versuchen deutlich steiler als bei den undrainierten.

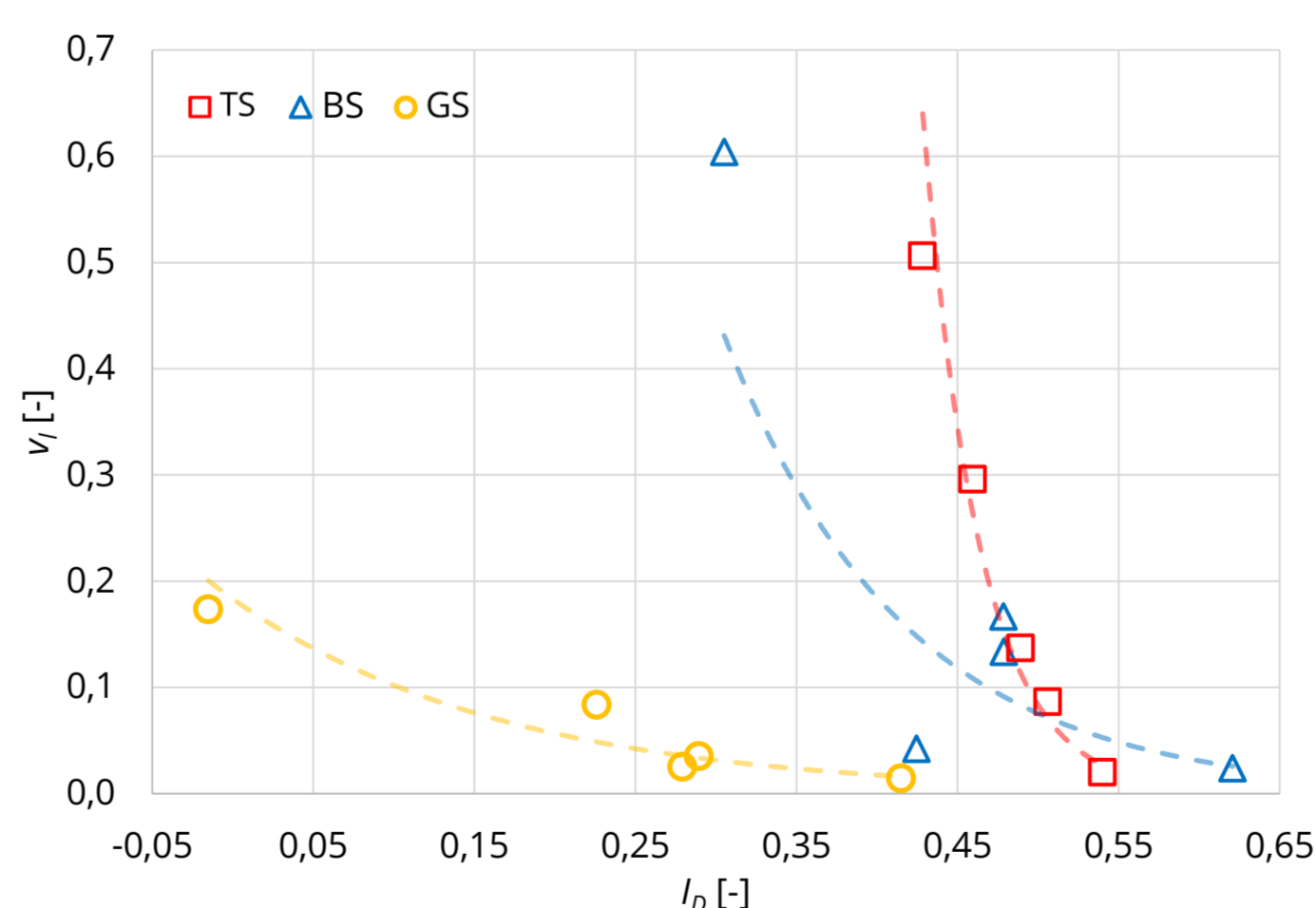


Abb. 3: Rate des volumetrischen Dehnungen  $v_f$  in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$  für die untersuchten Sande.

### Drainierte Triaxialversuche

Der Probeneinbau erfolgte analog zu den Versuchen am PWD-Tester. Es wurden drei Versuche mit unterschiedlichen Dichten bei gleichen Spannungen durchgeführt. Die Scherung erfolgte mit 0,5 mm/min bis zu einem Scherweg von 20 mm.

Die Volumendehnung wurde in Abhängigkeit von der Axialdehnung abgebildet und auf den höchsten Minimalwert der volumetrischen Dehnungen aller Versuche normiert, um die Volumenvergrößerung während der Dilatanz zu betrachten. Analog zu  $C_f$  wurde die Rate der volumetrischen Dehnungen im Triaxialversuch  $t_f$  als Anstieg dieser Sekanten ermittelt.

Die  $t_f$ -Werte wurden in Abhängigkeit von ihrer bezogenen Lagerungsdichte dargestellt (Abb. 4). Es zeigte sich, dass die  $t_f$ -Werte mit zunehmender Dichte sowie mit zunehmender Rundheit der Körner abnehmen: Bei runderen Körnern ist eine geringere Scherbelastung erforderlich, um die gleiche volumetrische Dehnung zu erreichen, wie bei kantigeren Körnern.

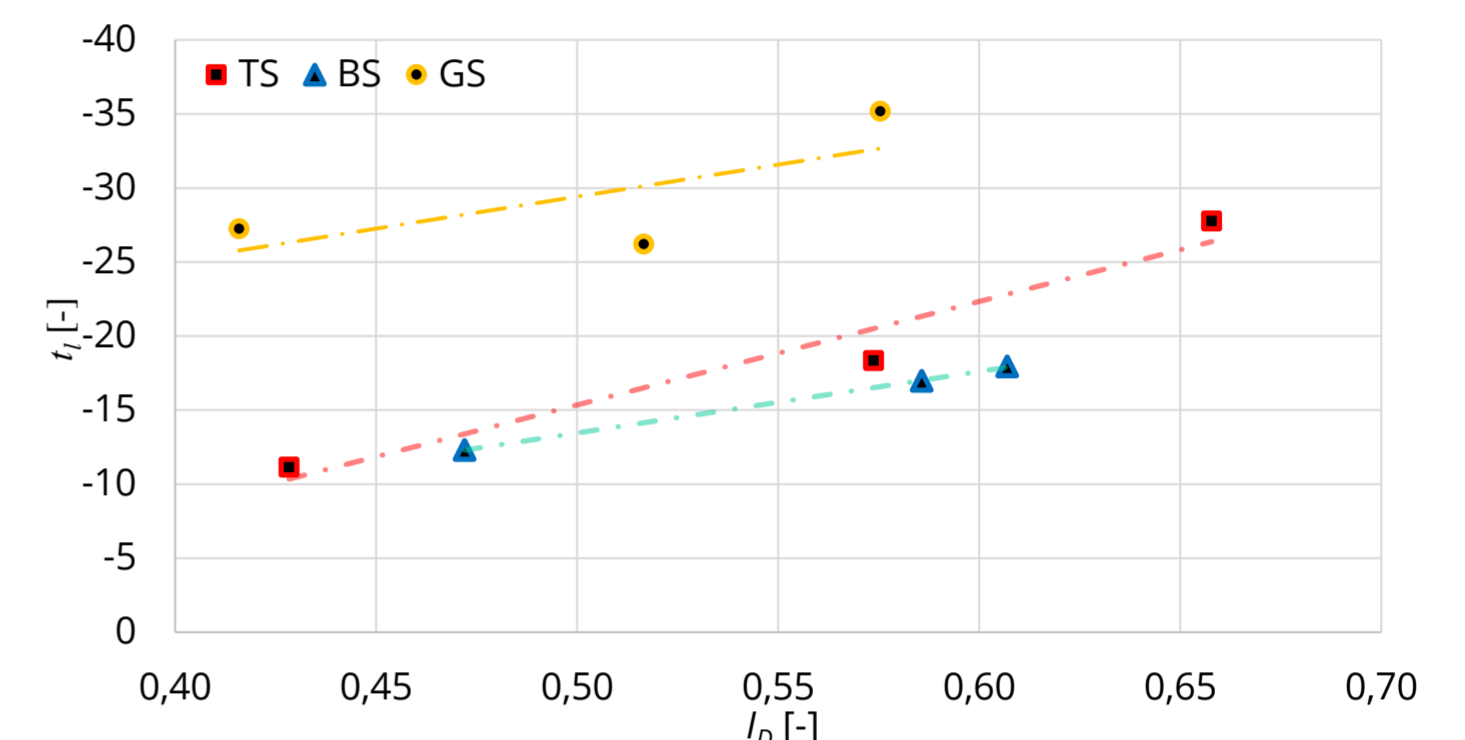


Abb. 4: Rate des volumetrischen Dehnungen  $t_f$  in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$  für die untersuchten Sande.

## Vergleich der Dichteabhängigkeit der untersuchten Materialien

$k$ -Werte (Abb. 5) wurden als Steigung der linearisierten Regressionsgeraden in den Versuchen mit dem PWD-Tester ermittelt und stellen die Dichteabhängigkeit von  $C_f$ ,  $v_f$  und  $a_f$  dar. Bei den Triaxialversuchen wurden die  $k$ -Werte als Steigung der linearen Regressionskurve bestimmt.

Glaskugeln und Brechsand zeigten in allen Versuchen ähnliche  $k$ -Werte, während der natürliche Sand in den drainierten Versuchen deutlich höhere  $k$ -Werte aufwies.

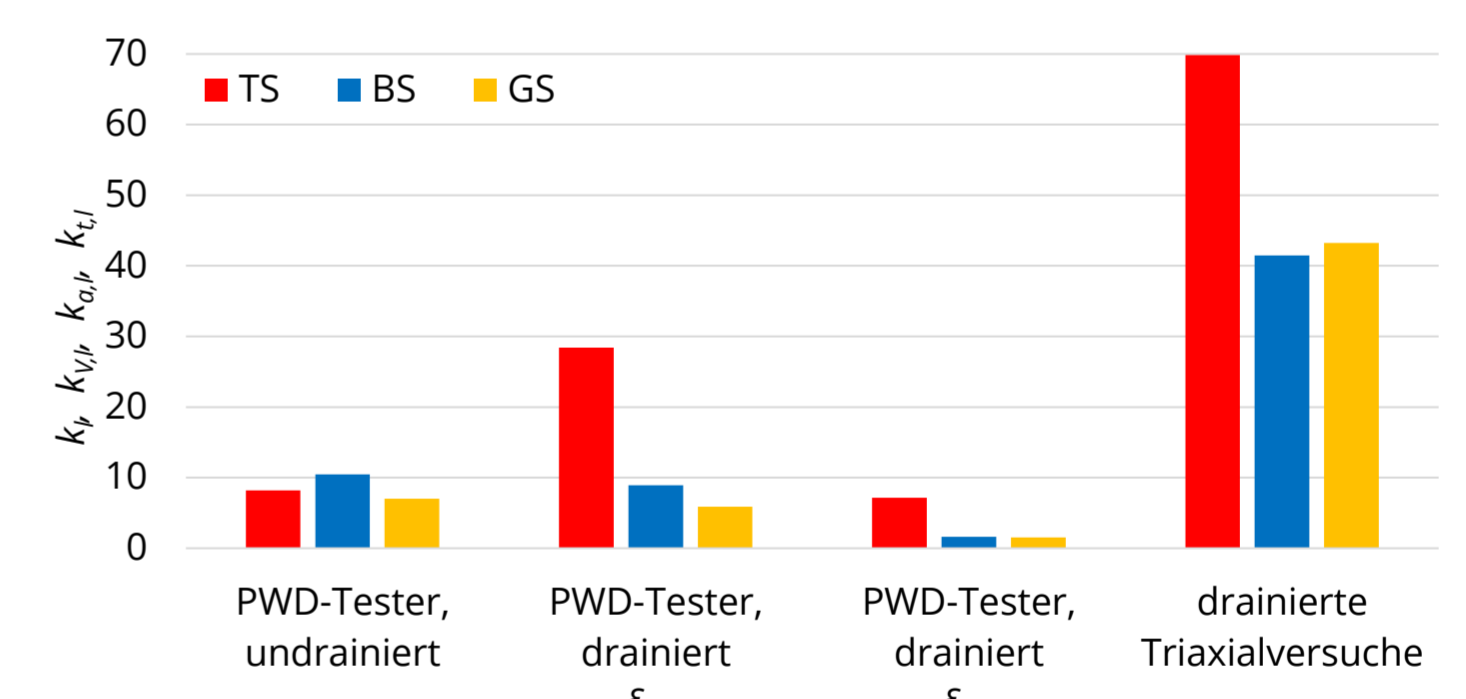


Abb. 5: Dichteabhängigkeiten in den durchgeführten Scherversuchen.

## Zusammenfassung

In den durchgeführten Versuchen konnte eine Beziehung zwischen drainierten und undrainierten Bedingungen im PWD-Tester festgestellt werden. Die Auswertung der Rate des Porenwasserdruckaufbaus  $C_f$  sowie der volumetrischen Dehnungen  $v_f$  ergaben dabei qualitativ ähnliche Ergebnisse. Außerdem ergab sich für die durchgeführten drainierten Versuche für den natürlichen Sand eine deutlich größere Dichteabhängigkeit der Kennwerte  $v_f$ ,  $a_f$  und  $t_f$  als für Brechsand und Glaskugeln.

In den drainierten PWD-Tester Versuchen ließ sich bezüglich der volumetrischen und axialen Dehnungen folgendes feststellen: Während sich natürlicher Sand und Glaskugeln teilweise ähnlich verhielten, zeigte Brechsand deutliche Unterschiede.

**Projekt**  
Diplomarbeit

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

**Wissenschaftliche Betreuung**  
Božana Bačić (M. Sc.)

**Abgabe**  
10/2024