



## Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Drucksondierung in feinkörnigen Böden

Markus Uhlig

### Einleitung

Ein häufig angewendetes Verfahren den Baugrund zu erkunden, ist die Drucksondierung. Die Auswertung der Messgrößen Spitzendruck, Mantelreibung und des Porenwasserdruckes erfolgt zumeist in Form von empirischen Beziehungen. Mit fortschreitender Computertechnik wurden neue Auswertungsverfahren entwickelt. Eines dieser Verfahren, die sphärische Hohlräume aufweitung wurde unter Verwendung eines hypoplastischen Stoffgesetzes in dieser Diplomarbeit untersucht. Jedoch können bei diesem Verfahren die numerischen und experimentellen Ergebnisse nicht direkt verglichen werden und werden daher mit Hilfe eines Kalibrierfaktors (hier Formfaktor genannt) zusammengebracht. Zielstellung der Arbeit ist diese Faktoren für einen Boden unter verschiedenen mittleren Spannungen zu ermitteln. Somit lassen sich dann aufgrund von Sondierungsergebnissen der Zustand eines feinkörnigen Bodens bezüglich der Konsistenz, bzw. einer äquivalenten Größe z.B. der Porenzahl bestimmen.

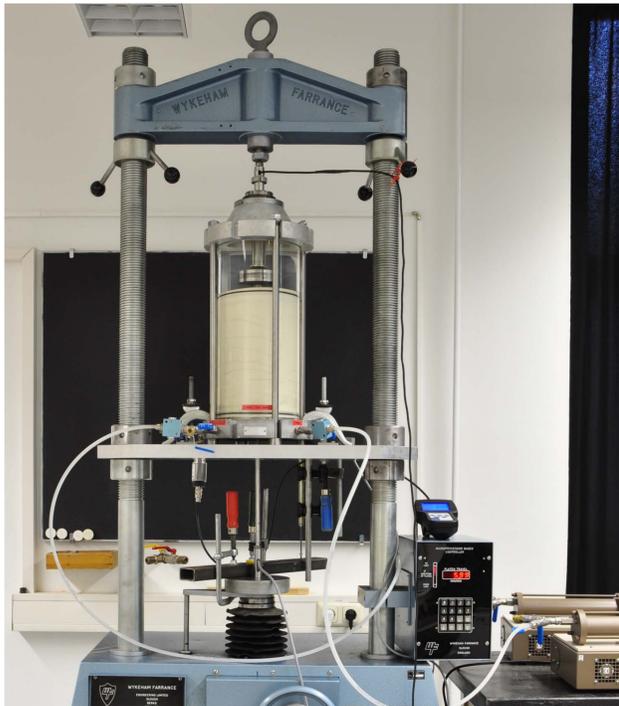


Abb. 1: Versuchsaufbau während der Sondierungen

### Sondierungsversuche

Es wurden sechs Sondierungsversuche durchgeführt.

#### Versuchsboden

Der Versuchsboden entstammt dem Tagebau Hambach und wurde als leicht plastischer Ton klassifiziert. Zur Bestimmung der Stoffgesetzparameter wurden zwei eindimensionale und ein isotroper Kompressionsversuch durchgeführt. Auch wurden Rahmenscherversuche und drainierte konsolidierte Triaxialversuche durchgeführt und verglichen um den Scherparameter Reibungswinkel zu bestimmen. Für die Beurteilung des Kontaktverhaltens zwischen dem Boden und der Reibungshülse der Sonde wurde ein Rahmenscherversuch durchgeführt. Hierbei wurde der Boden auf einer Edelstahlplatte abgesichert.

#### Versuchsanlage

Für die Sondierungsversuche wurde eine neue Versuchsanlage in Betrieb genommen. Die Anlage (Abb. 1) besteht aus einer Triaxialzelle, zwei Druck-Volumen-Reglern und der Sonde. Die Messgrößen (neun verschiedene während eines Sondierversuches) werden mit Hilfe einer LABVIEW-Routine aufgezeichnet. Vor den Sondierungsversuchen erfolgte die Kalibrierung aller Geräte.

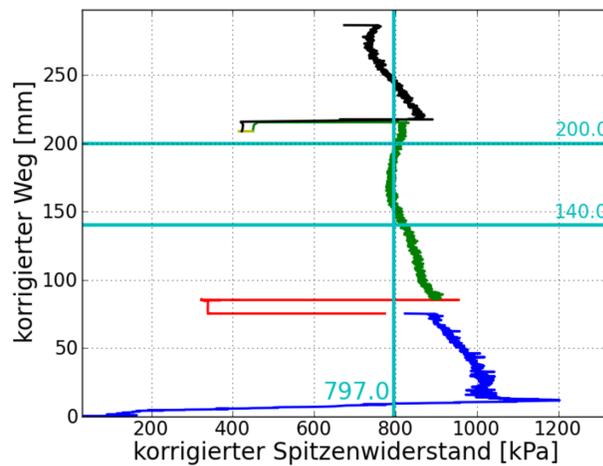


Abb. 2: Bestimmung des Spitzenwiderstandes am Versuch CPT-S- 6 ( $p=200$  kPa).

### Sondierungsversuche

Der Einbauwassergehalt des aufbereiteten Bodens betrug die 1,5-fache Fließgrenze. Dieser wurde zunächst mehrere Wochen in einem Stahlrohr vorkonsolidiert. Danach erfolgte der Einbau der 15 cm Durchmesser mächtigen und ca. 25 cm hohen Bodenzylinder in die Triaxialzelle. Die mit einer Gummimembran geschützten Proben erhielten eine erneute mindestens 11-tägige Konsolidierung unter unterschiedlichen mittleren Spannungen (150-500 kPa). Es folgte die Sondierung der Probe mit einer konstanten Geschwindigkeit. Anschließend wurde die Probe ausgebaut und der Wassergehalt bestimmt. Aus den Wassergehalten wurde die Porenzahl bestimmt.

Die Messgrößen (Spitzenwiderstand, Mantelreibung und Porenwasserdruck) wurde in ein Weg-Sondiergrößen-Diagramm abgetragen (Abb.2). Hierbei wird für jeden Versuch ein Bereich ausgewählt, indem die drei Größen möglichst konstant verlaufen. Der Mittelwert aller Messwerte in diesem Bereich ergibt die Sondiergröße, welche später mit den numerischen Untersuchungen verglichen wurden.

### Numerische Untersuchungen

Die numerischen Untersuchungen wurden mit der Software TOCHNOG durchgeführt.

#### Stoffmodell nach Mašin

Das Stoffmodell nach Mašin ist ein hypoplastisches Stoffmodell, welches das Verhalten von feinkörnigen Böden sehr gut wieder gibt.

Aus den Laborversuchen wurden die Stoffmodellparameter bestimmt. Für die Parameter  $\lambda^*$ ,  $\kappa^*$  und  $N$  wurde der isotrope Kompressionsversuch verwendet. Der Scherparameter  $\varphi'_c$  wurde mit Hilfe der Triaxial- und Rahmenscherversuche bestimmt. Der fünfte Parameter  $r$  ergibt sich aus einer Parameterstudie. Alle Parameter wurden in Abb. 3-rechts zusammenfasst. Zudem werden für die Berechnungen die Zustandsparameter Porenzahl  $e$  und die mittlere Spannung  $p$  benötigt.

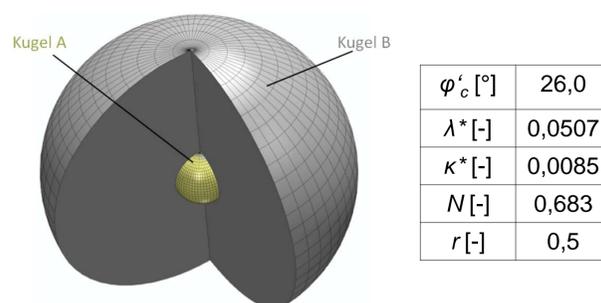


Abb. 3: Modell der sphärischen Hohlräume aufweitung (links) und Zusammenfassung der Parameter für das Stoffgesetz nach Mašin (rechts)

### Sphärische Hohlräume aufweitung

Das hier verwendete Modell der sphärischen Hohlräume aufweitung wird in Abb. 3 (links) dargestellt. Es besteht aus zwei Kugeln. Die graue Kugel B ist mit Boden gefüllt. Die gelbe Kugel A ist hohl und besitzt einen kleinen Startradius. Dieser wird auf geweitet und die dabei entstehenden radialen Spannungen und Porenwasserdrücke auf der Oberfläche der Kugel A berechnet. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe der Finiten Elemente Methode. Die Nachrechnungen erfolgten mit den fünf Mašin-Parametern und den zwei Zustandsgrößen ( $e$  und  $p$ ) aus den Experimenten. Gesucht wird der Peakwert der radialen Spannungen, welcher als Grenzdruck bezeichnet wird.

### Sensitivitätsanalyse

Um den Einfluss von einzelnen Parametern bzw. der Zustandsgrößen auf den Grenzdruck zu untersuchen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurde jeweils eine Größe verändert und die Auswirkung auf den Grenzdruck aufgezeigt. Es konnte eine hohe Sensitivität bei den Parameter  $N$  und  $\lambda^*$  und der Porenzahl  $e$  aufgezeigt werden. Nahezu keinen Einfluss auf die normalkonsolidierten Simulationen hat  $\kappa^*$ .

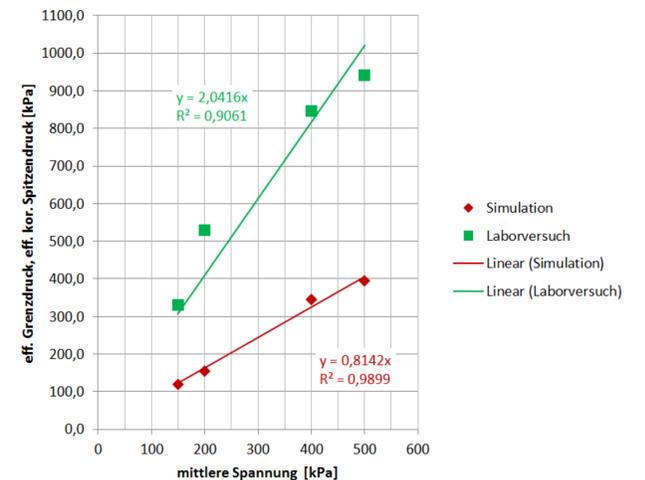


Abb. 4: Bestimmung des Kalibrierfaktors  $k_{q,eff}$

### Ergebnisse und Zusammenfassung

Der Vergleich der experimentellen mit den numerischen Untersuchungsergebnissen erfolgte an vier Versuchen. Die Abb. 4 zeigt beispielhaft den Vergleich des Spitzendruckes (Messgröße) mit dem Grenzdruck aus der numerischen Berechnung. Aus den Anstiegen der beiden linearen Regressionen wurde der Formfaktor zu 0,91 berechnet. Zudem erfolgte eine Betrachtung der aus den Einzelversuchen berechneten Formfaktoren. Hier konnte noch nicht zweifelsfrei festgestellt werden, ob die Formfaktoren spannungsabhängig sind. Hierzu müssten weitere Versuche durchgeführt werden. Auch wurden Formfaktoren für die Porenwasserdrücke der Simulationen und der Experimente und der Mantelreibung, welche unter Berücksichtigung des Kontaktreibungswinkels mit den effektiven Grenzdrücken verglichen wurde, bestimmt.

Mit dieser Arbeit wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit Hilfe der Näherungsmethode Hohlräume aufweitung und Experimenten die Formfaktoren zu bestimmen. Demnach lässt sich für diesen Boden unter Verwendung von Sondier- und Simulationsergebnissen und des Formfaktors der Zustand des Bodens invers berechnen.

#### Projekt

Diplomarbeit

#### Wissenschaftlich Betreuung

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

#### Abgabe

Oktober 2011