

Rolle der stochastisch verteilten Bodeneigenschaften auf die globale Antwort der diskretisierten Elementversuche

Selma Schmidt

Einleitung

Es existieren eine Vielzahl unterschiedlich komplexer Stoffmodelle zur Beschreibung von Böden und ihrem Verhalten. Die realen Bodeneigenschaften fließen über Parameter in die Modelle ein und müssen anhand von standardisierten Laborversuchen kalibriert werden. Bei solchen Versuchen werden spezielle Spannung- und Dehnungszustände sowie -pfade betrachtet, die eine Entkopplung der Parameter ermöglichen und damit ihre Bestimmung erst möglich macht. Die Spannungen und Dehnungen werden hierbei jedoch nur global an den Rändern der Bodenprobe ermittelt und die Annahme getroffen, dass die so gemessenen Spannungen und Dehnungen für die gesamte Probe gelten. Betrachtet man nun aber z.B. einen Triaxialversuch, so kann im Laufe des Versuchs die Ausbildung einer Scherzone beobachtet werden. Dass die Probe spätestens dann nicht mehr als homogen angesehen werden kann, ist klar, doch vor allem die Tatsache, dass sich eine solche Scherzone überhaupt ausbildet, lässt vermuten, dass auch schon vor deren Existenz keine homogene Probe vorliegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass Inhomogenitäten innerhalb der Probe die Bildung der Scherzone begünstigen und vielleicht sogar induzieren.

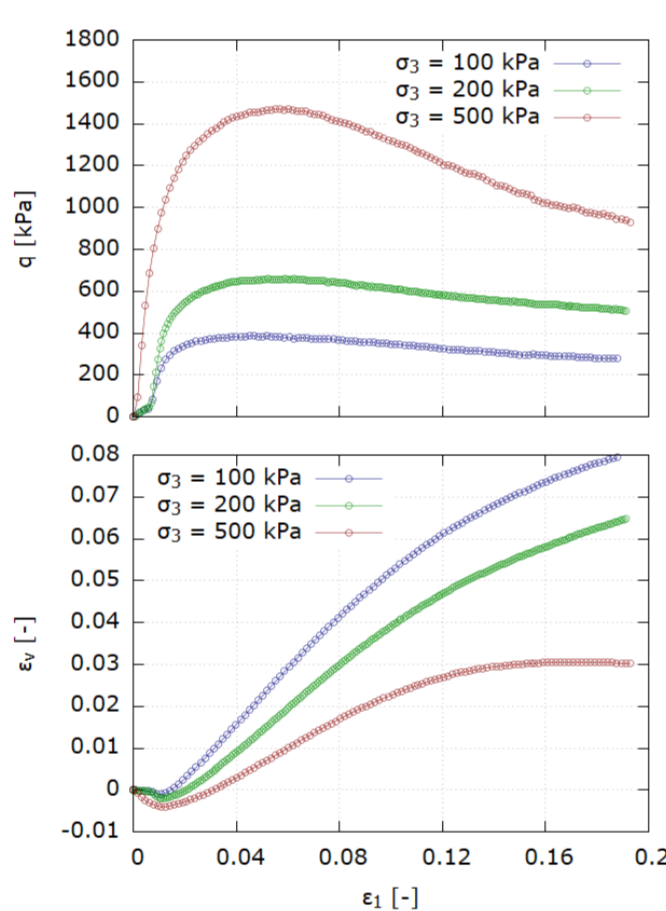
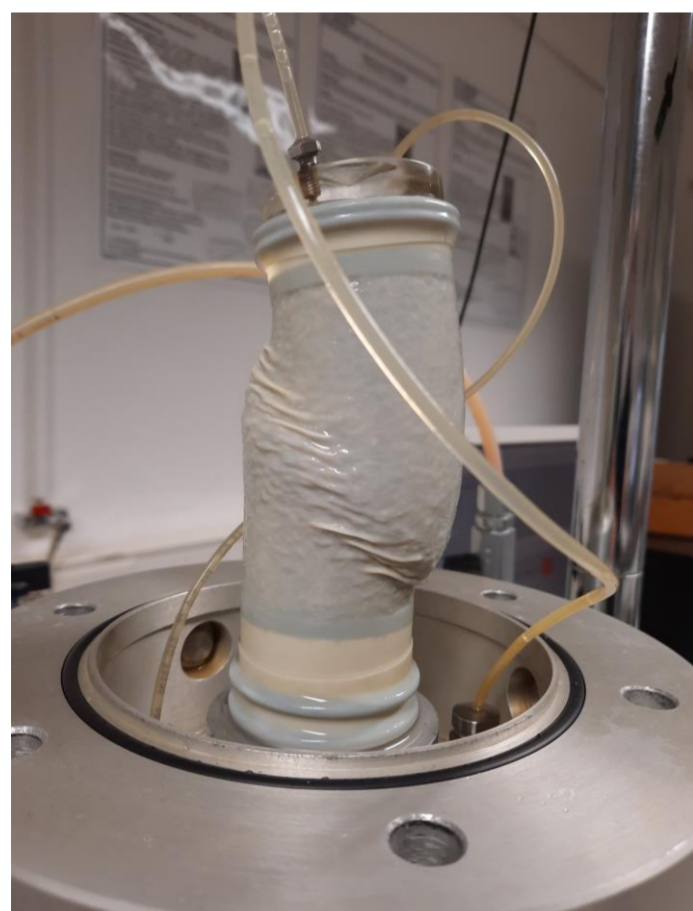


Abb. 1: Links: Sichtbare Scherzone am Ende eines Triaxialversuchs
Rechts: Globales Verhalten während drei dichten, drainierten Triaxialversuchen bei unterschiedlichen Zeldrücken

Stoffmodelle

Es soll nun untersucht werden, welchen Einfluss die heterogene Struktur des Bodens zu Beginn eines Versuchs auf das globale Verhalten während des Versuchs hat und wie verschiedene Stoffmodelle unterschiedlicher Komplexität in der Lage sind, diese Heterogenität und ihre Entwicklung innerhalb der Probe abzubilden. Dazu sollen im Labor durchgeführte Triaxialversuche numerisch nachgerechnet und ihre Ergebnisse verglichen werden. Die numerische Analyse erfolgt mit dem linear-elastisch ideal-plastischen Mohr-Coulomb-Modell, mit dem elasto-plastischen Modified-Cam-Clay-Modell und mit dem hypoplastischen Modell nach von *Wolffersdorff*. Die Kalibrierung der Modelle erfolgt „klassisch“ anhand diverser Laborversuche.

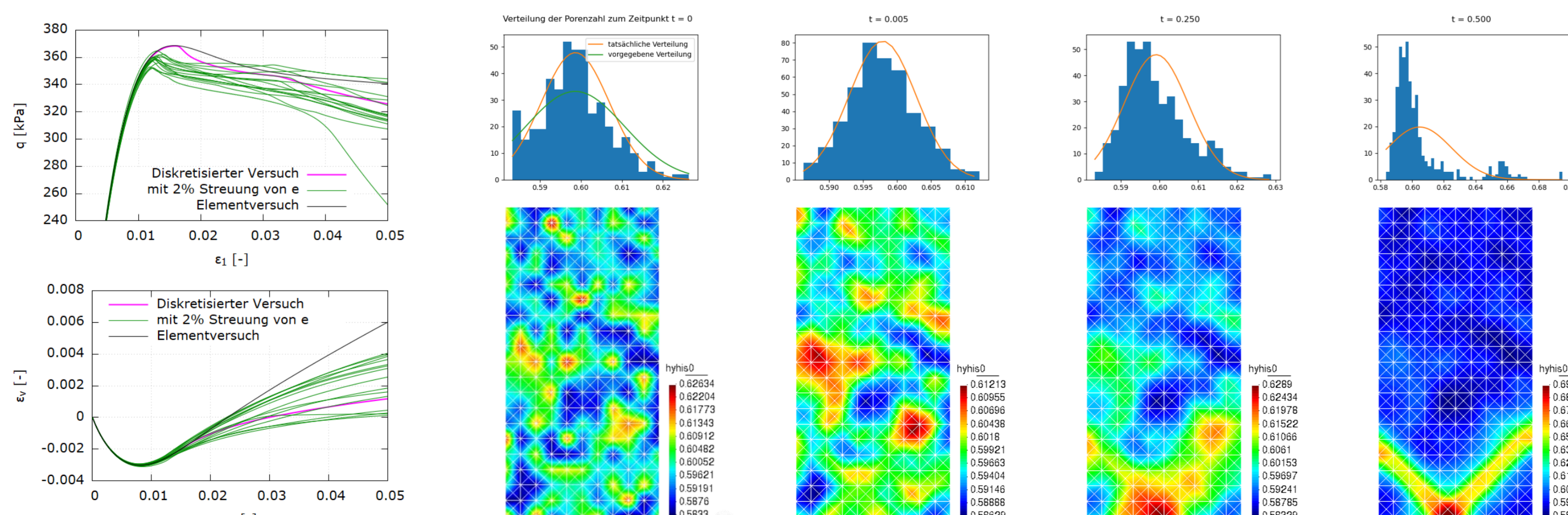


Abb. 2: Links: Spektrum der globalen Antworten von Simulationen des Triaxialversuchs bei 100 kPa Zeldruck mit hypoplastischem Modell und 2% Streuung der Porenzahl im Anfangszustand. Im Vergleich dazu eine Simulation mit konstanten Parametern sowie ein Elementversuch. Rechts: Entwicklung der Verteilung der Porenzahl im Laufe des Triaxialversuchs anhand einer der Simulationen mit anfangs 2% Streuung.

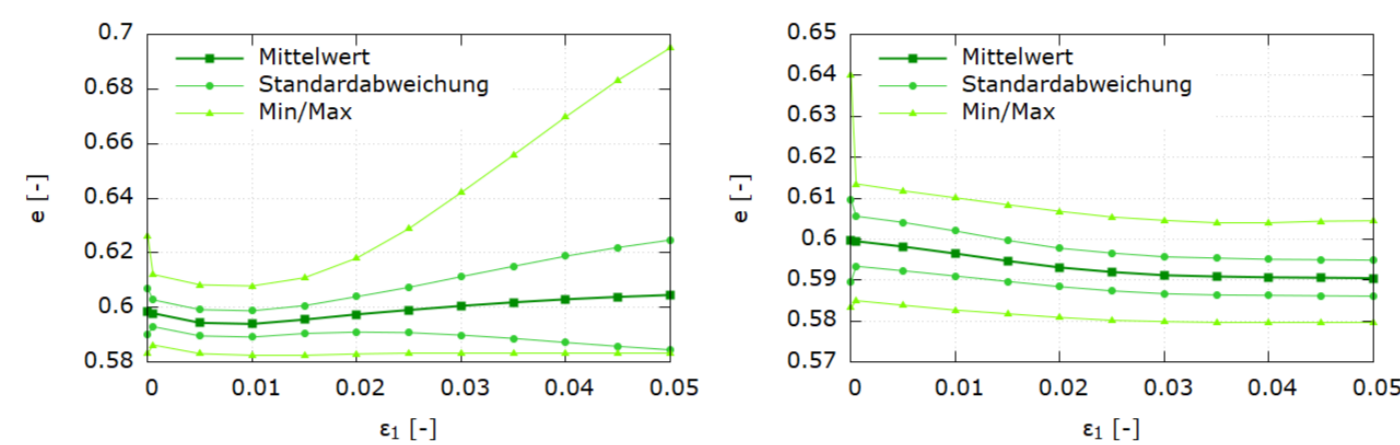


Abb. 3: Entwicklung der Porenzahlstreuung mit hypoplastischem Modell (links) und Modified-Cam-Clay-Modell (rechts).

Numerische Analyse

Die numerische Analyse erfolgte zunächst anhand von 2D-Simulationen unter der Annahme ebener Verformungen. Dabei wurden zunächst Simulationen mit nur einem Element durchgeführt, welche das Verhalten einer den gesamten Versuch über homogenen Probe darstellen. Dann wurden Simulationen mit mehreren Elementen aber konstanten Eigenschaften ausgeführt, die als Referenz für die anschließenden Simulationen mit stochastisch verteilten Eigenschaften dienen sollen. Die Vernetzung erfolgte zunächst auf Basis des Prinzips der repräsentativen Volumenelemente (RVE), sodass jedes der Elemente RVE-Größe hat. In der Projektarbeit wurden solche RVE's genutzt, um die Streuung von Bodeneigenschaften anhand von Röntgentomographien zu untersuchen. Die dort ermittelte Streuung im Anfangszustand wird daher hier auf dem RVE-Netz erzeugt. Für die Rechnung wird das Netz dann in Dreieck-Elemente zerlegt, da diese im Gegensatz zu Vierecken in der Lage sind, eine Scherzone abzubilden.

Einfluss der Streuung der Porenzahl

Der Einfluss der in der Projektarbeit ermittelten Streuung der Porenzahl von 2% im Anfangszustand wurde zunächst mit dem hypoplastischen Modell untersucht. Es wurden 15 Teilversuche mit derselben stochastischen Verteilung simuliert. Da die Knotenwerte jedoch zufällig aus der vorgegebenen Verteilung erzeugt werden, entsteht jedes Mal eine andere räumliche Verteilung. Das Verhalten während der Simulationen wurde analog zu den Experimenten global erfasst. Nach dem Peak ist für die Teilversuche ein breites Spektrum möglicher Antworten zu erkennen, das aus der verschiedenen räumlichen Verteilung der Poren im Anfangszustand resultiert. Diese beeinflusst die Position und die Orientierung der Scherzone stark. Für alle Teilversuche lässt sich jedoch eine Schwächung der Probe erkennen. Der Peak wird deutlich eher und bei geringeren Spannungen erreicht. Die Entwicklung der Porenzahlverteilung ist in Abbildung 2 und 3 dargestellt. Die Porenzahl lokalisiert sich in der Scherzone, wodurch ihre Streuung innerhalb der Probe stark ansteigt und sich die anfängliche Normalverteilung in zwei Bereiche mit zwei Maxima aufsplittet. Dieselben Untersuchungen wurden mit dem Modified-Cam-Clay-Modell durchgeführt. Hier ergibt sich jedoch das Problem, dass durch sehr kleine Werte für λ und κ in den Simulationen quasi keine volumetrische Dehnung und damit auch keine Porenzahländerung entsteht (siehe Abbildung 3).

Einfluss der Streuung des E-Moduls

Da die Porenzahl beim Mohr-Coulomb-Modell als Zustandsvariable nicht enthalten ist, wurde hier eine Streuung des E-Moduls innerhalb der Probe untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Streuung zu einem immer nichtlineareren Verhalten des eigentlich linear-elastischen Stoffmodells führt. Das kann damit begründet werden, dass die einzelnen Elemente die Spannungsgrenzbedingung aufgrund verschiedener E-Moduln bei unterschiedlichen Dehnungen erreichen und sich dadurch global gesehen ein nichtlineares Verhalten ergibt. Bei Erhöhung der Streuung wird dieser Effekt immer stärker und das Verhalten damit immer nichtlinearer. Außerdem konnte eine Lokalisierung der Scherdehnungen in Bereichen mit geringem E-Modul beobachtet werden.

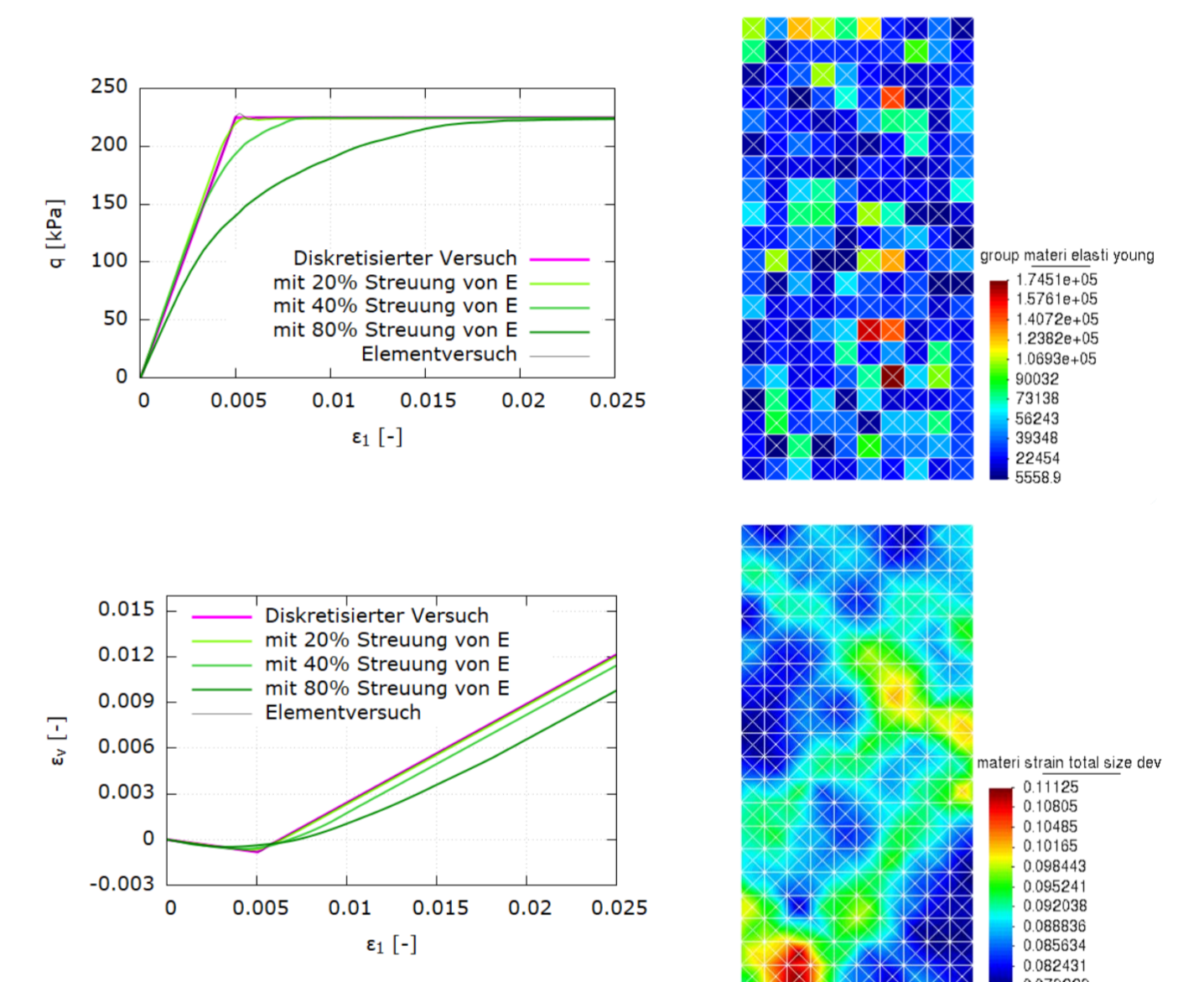


Abb. 4: Links: Einfluss der Streuung des E-Moduls auf die globale Antwort der Simulationen mit dem Mohr-Coulomb-Modell
Rechts: Lokalisierung der Scherdehnungen in Bereichen mit geringem E-Modul bei einer Streuung des E-Moduls von 80%

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Einfluss der Streuung verschiedener Anfangsgrößen auf die globale Antwort diskretisierter Triaxialversuche untersucht. Dabei wurde die Eignung dreier unterschiedlich komplexer Stoffmodelle zur Abbildung der Heterogenität des Bodens und dessen Entwicklung analysiert. Das hypoplastische Modell nach von *Wolffersdorff* war in der Lage, eine stochastische Anfangsverteilung der Porenzahl sowie die Entwicklung dieser Verteilung im Laufe des Versuchs realistisch abzubilden. Es wurde eine Reihe von Teilversuchen mit gleicher stochastischer, aber variierender räumlicher Verteilung durchgeführt und dabei ein breites Spektrum globaler Antworten erhalten. Insgesamt konnte eine Schwächung der Probe durch die Streuung der Porenzahl im Anfangszustand beobachtet werden. Die Streuung des E-Moduls bewirkte bei den Simulationen mit dem linear-elastischen Mohr-Coulomb-Modell ein nichtlineares Verhalten, was auf ein Erreichen der Spannungsgrenzbedingung der Elemente bei verschiedenen Dehnungen zurückzuführen ist.

Die zuletzt durchgeführten 3D-Simulationen erzielten, aufgrund einer Blockierung der Scherzonenausbildung durch die Vernetzung, keine vergleichbaren Ergebnisse.

Projekt

Diplomarbeit

Hochschullehrer

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

Wissenschaftliche Betreuung

Bozana Bacic M. Sc., TU Dresden
Dr.-Ing. Max Wiebicke, TU Dresden

Abgabe

September 2021