

# Untersuchung zur Heterogenität des Verformungsverhaltens einer Sandprobe mittels Röntgentomographie

Selma Schmidt

## Einleitung

Die Beschreibung von Böden – ihrer Struktur und ihres Verhaltens – ist klassisch eine Beschreibung als Kontinuum. Der Boden wird mithilfe einiger Parameter beschrieben, welche auf dessen globaler Antwort in standardisierten bodenmechanischen Versuchen basieren. Dabei wird angenommen, dass die an den Probenrändern auftretenden Spannungen und Verformungen auf die gesamte Probe übertragen werden können, diese also homogen ist. Eine kontinuumsmechanische Bodenbeschreibung ist jedoch nicht in der Lage, diesen korrekt abzubilden. Mikromechanische Prozesse bestimmen das Verhalten und deren Modellierung ermöglicht eine deutlich realitätsnähere Abbildung des Bodens. Mit der Weiterentwicklung der Röntgen-Computertomographie in den letzten Jahren, ist es nun möglich, diese Prozesse näher zu untersuchen und zu beschreiben. Im Laufe eines bodenmechanischen Versuchs kann die Bodenprobe auf der Kornebene analysiert und so dessen Mikrostruktur in verschiedenen Belastungsstadien ermittelt werden. Mithilfe dieses Werkzeugs soll jetzt untersucht werden, ob tatsächlich von einer homogenen Probe im Rahmen bodenmechanischer Versuche ausgegangen werden kann. Dazu wurde ein Triaxialversuch einer Sandprobe analysiert.

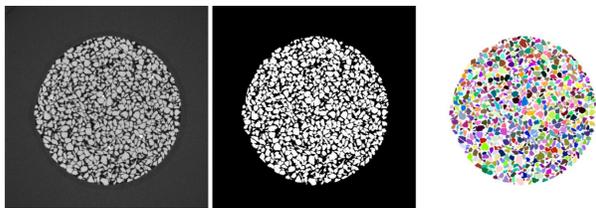


Abb. 1: Schritte der Bildbearbeitung anhand von horizontalen Schnitten. Von links nach rechts: 1. Graustufenbild, 2. binäres Bild, 3. segmentiertes und nummeriertes Bild

## Vorgehensweise bei der Bildanalyse

Das Ergebnis der Röntgen-Computertomographie ist ein Graustufenbild. Um das Bild nun analysieren zu können, muss es zunächst binarisiert, segmentiert und nummeriert werden. Die Binarisierung erfolgt mit einem globalen Grenzwert, der das Bild in zwei Phasen – Korn und Pore – trennt. Auf dieses binäre Bild wird dann ein *topological watershed* angewendet, welcher zu dessen Segmentierung dient, und den identifizierten Körnern werden anschließend eindeutige Nummern zugeordnet.

### Bestimmung der Kontaktstruktur

Anhand dieses segmentierten und nummerierten Bildes soll nun der mikroskopische Zustand der Probe anhand der Kontaktstruktur untersucht werden. Diese lässt sich im Wesentlichen durch zwei Parameter beschreiben: die Koordinationszahl und die Anisotropie der Kontaktorientierungen. Erstere ist die mittlere Anzahl der Kontakte pro Korn und Letztere gibt die Orientierungen der Kontaktflächen wider, sie wird umso größer, desto mehr Kontaktflächen sich in eine Richtung orientieren und ist nahe null bei gleichmäßiger Verteilung in alle Richtungen.

### Berechnung der Porenzahl

Um die Porenzahl zu bestimmen, werden alle Voxel des binären Bildes aufaddiert, mit und ohne geschlossenen Porenraum. Das ergibt das Gesamt- bzw. Feststoffvolumen.

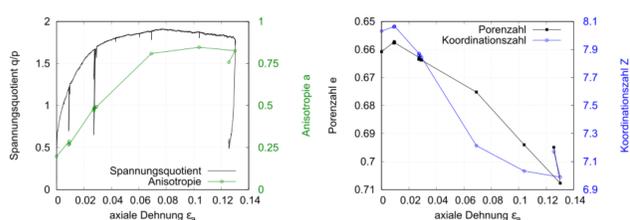


Abb. 2: Ergebnisse der Untersuchung der Gesamtprobe. Entwicklung der Kontaktstruktur im Vergleich zu standardmäßig untersuchten Größen im Rahmen eines Triaxialversuchs.

## Ergebnisse der Gesamtprobe

Die Bildanalyse wurde zunächst an der gesamten Probe in 13 verschiedenen Belastungsstadien durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt. Die Kontaktanisotropie nimmt im Laufe des Versuchs zu, da sich die Kontaktflächen in Richtung der Belastung orientieren. Die Porenzahl steigt infolge dilatantem Verhalten der Probe, während die Koordinationszahl sinkt, da bei Vergrößerung des Porenraumes Kontakte verloren gehen.

## Untersuchung mittels RVE

Anschließend an die Analyse der Gesamtprobe werden nun einzelne Bereiche innerhalb dieser untersucht und deren Entwicklung im Laufe des Versuchs miteinander verglichen.

Außerdem wird die Probe für die Bewertung ihrer Homogenität in Teilvolumen zerlegt. Die Streuung der Ergebnisse innerhalb der Bodenprobe beschreibt dessen Heterogenität. Um solche Untersuchungen durchführen zu können muss aber zunächst eine repräsentative Elementgröße bestimmt werden, also ein RVE.

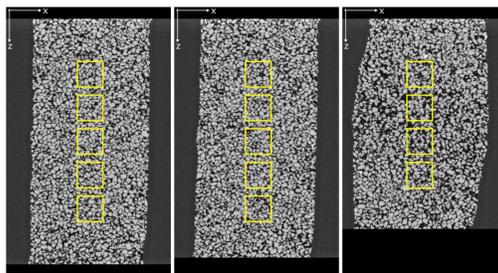


Abb. 3: Position der Volumenelemente anhand von vertikalen Schnitten verschiedener Belastungszustände. Abgebildet sind Elemente der Größe 160 x 160 x 160 Voxel.

### Ermittlung eines RVE

Zur Bestimmung der RVE-Größe werden aus vier (bzw. fünf) verschiedenen Bereichen der Probe Volumenelemente extrahiert und für diese die Kontaktstruktur und Porenzahl ermittelt. Die Größe dieser Elemente wird dabei sukzessive erhöht, begonnen mit 40 x 40 x 40 großen Elementen und bis zu Elementen der Größe 400 x 400 x 400 Voxel. Die Entwicklung der Ergebnisse wird, wie beispielhaft in Abb. 3 zu sehen, mit zunehmender Elementgröße untersucht. Außerdem wird ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt, dessen Resultat mit dem Konvergenzverhalten von Mittelwert und Varianz abgeglichen und daraus die RVE-Größe bestimmt. Die ermittelte RVE-Größe beträgt 120 x 120 x 120 Voxel.

### Entwicklung verschiedener Bereiche

Bei der Untersuchung der Entwicklung unterschiedlicher Bereiche der Probe konnten im Wesentlichen drei prägnante Zonen ausgemacht werden: die Scherzone, der Bereich ober- und unterhalb. Bis zu einer bestimmten Dehnung, welche den Beginn der Scherzonenausbildung markiert, verhalten sich die drei Bereiche sehr ähnlich, beginnen sich dann jedoch sehr unterschiedlich, teilweise sogar gegensätzlich zu entwickeln.

### Bewertung der Homogenität der Probe

Es lässt sich bereits zu Beginn des Versuchs eine deutliche Streuung der Eigenschaften innerhalb der Probe ausmachen, welche der Annahme einer homogenen Probe klar widerspricht. Mit Beginn der Ausbildung der Scherzone nimmt diese Streuung solch ein Ausmaß an, dass die Probe zweifellos als heterogen angesehen werden muss. In Abb. 5 wird anhand von zwei Belastungszuständen gezeigt, wie stark die drei untersuchten Parameter streuen. Es wird außerdem eine Art Scherbereich für jeden dieser Parameter sichtbar, jedoch mit unterschiedlichen Breiten.

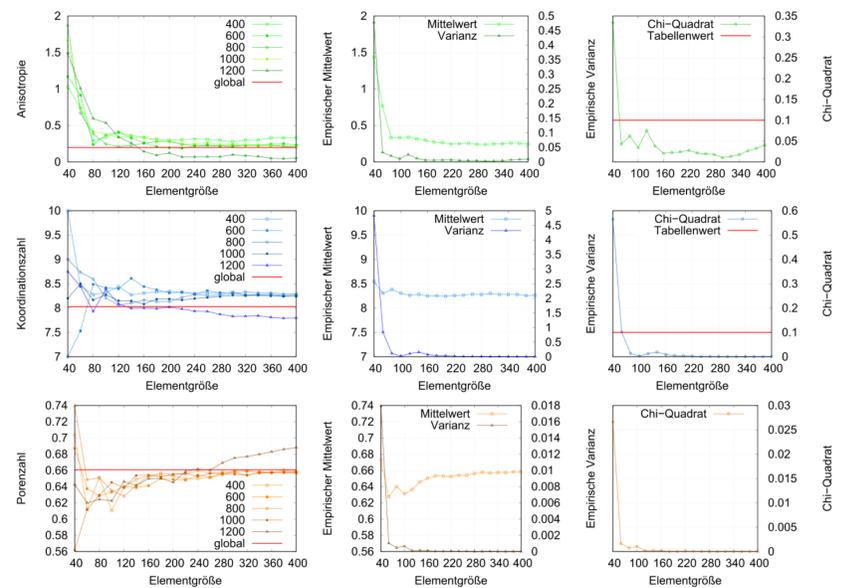


Abb. 4: Ermittlung eines repräsentativen Elements: 1. Entwicklung mit zunehmender Elementgröße, 2. Konvergenzverhalten von Mittelwert und Varianz, 3. Chi-Quadrat-Test

## Zusammenfassung

Es wurde eine Sandprobe im Laufe eines Triaxialversuchs mithilfe der Röntgen-Computertomographie analysiert. Dazu wurden für 13 Belastungszustände die Kontaktstruktur und Porenzahl der Gesamtprobe ermittelt und die Ergebnisse über den Versuchsverlauf dargestellt. Dann wurde ein repräsentatives Element bestimmt. Dies geschah durch Extrahierung von Volumenelementen zunehmender Größe aus verschiedenen Bereichen der Probe und der Ermittlung ihrer Kontaktanisotropie, Koordinations- und Porenzahl. Durch eine Analyse der Entwicklung der Ergebnisse mit Veränderung der Elementgröße sowie der Durchführung eines Chi-Quadrat-Tests, konnte eine RVE-Größe bestimmt werden. Mithilfe dieses RVE wurde dann die Entwicklung unterschiedlicher Probenbereiche im Laufe der Belastung miteinander verglichen und eine Aussage zur Homogenität der Probe getroffen.

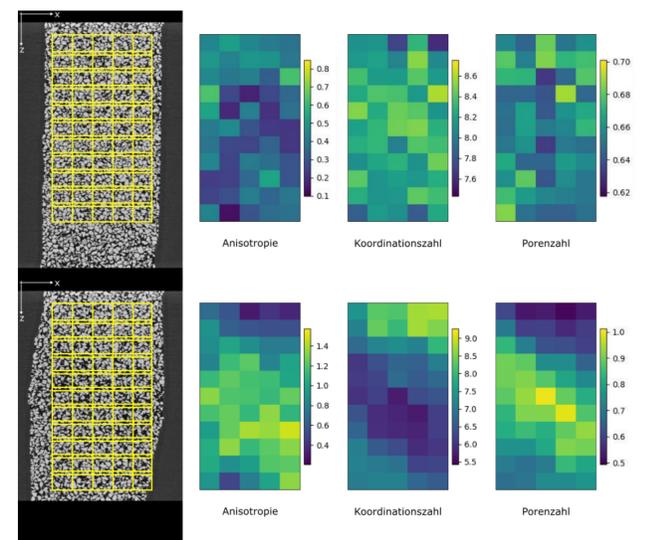


Abb. 5: Streuung der drei Parameter: Kontaktanisotropie, Koordinations- und Porenzahl, zu Beginn des Versuchs (oben) und nach Ausbildung der Scherzone (unten). Links: Position der RVE anhand von vertikalen Schnitten.

### Projekt

Projektarbeit

### Hochschullehrer

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

### Wissenschaftliche Betreuung

Dr.-Ing. Max Wiebicke, TU Dresden

### Abgabe

Februar 2021