

Implementierung des hypoplastischen Stoffgesetzes in ABAQUS zur Anwendung bei dynamischer Bodenverdichtung

Rosa Elena Ocaña Atencio, Holger Pankrath, Alexander Knut, Ralf Thiele
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Fakultät Bauwesen
rosa.ocana@htwk-leipzig.de

Abstract

Im Rahmen des Projektes DynIm der G² Gruppe Geotechnik der HTWK Leipzig wird die Weiterentwicklung von Verfahren zur Baugrundverdichtung angestrebt. Dazu sind numerische Simulationen von Verdichtungsverfahren notwendig. Hierfür wird das hypoplastische Stoffgesetz mit der Erweiterung der intergranularen Dehnungen in das Programm ABAQUS implementiert. Dies erfordert die Kalibrierung der Stoffparameter für das Bodenmaterial sowie die Validierung der Ergebnisse anhand von Modellversuchen im Labor.

1. Hintergrund und Motivation

Die Verdichtung von Böden kommt bei einer Vielzahl von Bauvorhaben als Maßnahme zur Baugrundverbesserung zum Einsatz. Dadurch wird ein Zusammendrücken von Boden verursacht, was zu einer Verringerung des Porenraums führt, und somit eine Erhöhung der Dichte und der Tragfähigkeit bringt.

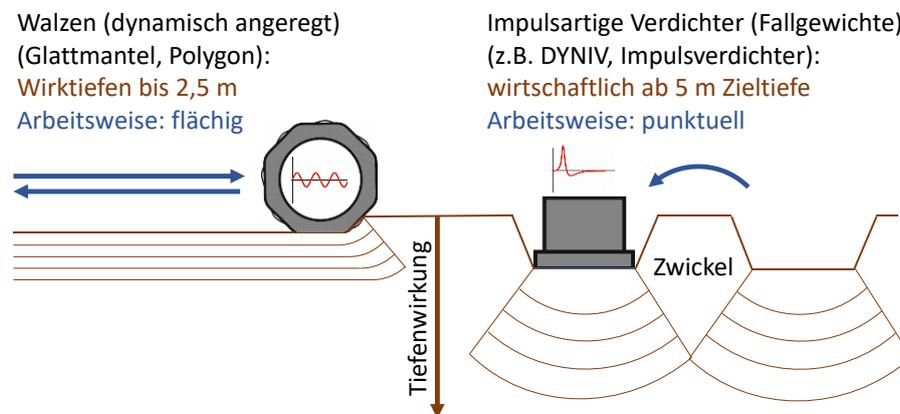


Abbildung 1: dynamische Verdichtung mit flächiger Arbeitsweise sowie impulsartige Verdichtung mit punktueller Arbeitsweise [Quelle: G² Gruppe Geotechnik]

Für Einzel- und Streifenfundamente von Gebäuden sowie Straßen und Dammbauwerke ist eine Verdichtung des Untergrundes bis in einer Tiefe von 5,0 m i.d.R. notwendig. Diese Verdichtung erfolgt meistens durch statische oder dynamisch angeregte Walzen bzw. der Kombination aus Walzenzug und Plattenverdichter. Dieses Verfahren erreicht durch seine Arbeitsweise eine hohe Flächenleistung, aber nur eine maximale Wirktiefe von 2,5 m^[1]. Andere Systeme, wie Impulsverdichter und dynamische Intensivverdichter, erreichen deutlich größere Wirktiefen^[2]. Bei diesen Verfahren wird ein Fallgewicht aus einer bestimmten Fallhöhe auf einen Verdichtungsfuß oder direkt auf den Boden fallen gelassen. Sie sind allerdings erst ab einer

Tiefe von ca. 5,0 m wirtschaftlich, da ihr Einsatz sehr kostenintensiv ist. Aktuell steht der Baupraxis kein Gerät oder Verfahren mit effektiver Arbeitsweise für die Verdichtung von Böden im Tiefenbereich von 2,0 bis 5,0 m zur Verfügung.

Die G² Gruppe Geotechnik der HTWK Leipzig beschäftigt sich seit Jahren mit dieser Problematik. Mit dem Ziel ein neues Verdichtungswerkzeug inklusive Ausführungsprinzip für den vorher erwähnten Tiefenbereich zu entwerfen, sind die Forschungsprojekte ECompact im Jahr 2012 und DynIm im Jahr 2016 entstanden. In einem interdisziplinären Arbeitsteam wurden drei Prüfwerkzeuge zur Untersuchung von bestehenden und perspektivischen Verdichtungssystemen entwickelt:

- Feldversuche an realen Geräten
- Modellversuche im Labor unter Begleitung von optischen Messmethoden
- numerische Simulationen mit dem Programm ABAQUS.

Durch ständige Prüfung und Validierung dieser Werkzeuge miteinander konnten die unterschiedlichen Verdichtungsverfahren präzise analysiert werden.

Der Focus des vorliegenden Beitrages liegt an die Weiterentwicklung der numerischen Simulationen. Sie ermöglichen eine genaue Analyse des Bodenverhaltens während eines Verdichtungs Vorganges. Die Flächen- bzw. Tiefenwirkung eines Systems kann dabei genauer bestimmt werden, als mit herkömmlichen Prüfverfahren im Feld. Außerdem können unterschiedliche Ergebnisgrößen erfasst werden, welche dem besseren Verständnis über die unterschiedlichen Mechanismen bei einem Verdichtungs Vorgang dienen. Die Simulationsergebnisse erfordern eine ständige Nachprüfung und Validierung, um ihre Aussagekraft zu bewerten. Hierzu sind die oben genannten Prüfwerkzeuge von Nutzen.

Mit ABAQUS wurden mehrere Parameterstudien zu den unterschiedlichen Systemen durchgeführt. Die Simulationen erfolgten stets für nichtbindige Böden, u.a. für einen regional typischen Sand. Innerhalb des ECompact-Projektes wurde mit dem elastoplastischen Stoffgesetz nach Drucker-Prager mit der Erweiterung einer hydrostatischen Kappe gearbeitet. Dieses Stoffgesetz hat allerdings Nachteile bei der Abbildung von dynamischen Verdichtungs Vorgängen^[3].

Um das Bodenverhalten besser abzubilden, wurde entschieden, das hypoplastische Stoffgesetz mit der Erweiterung der intergranularen Dehnungen zu verwenden. Da es nicht im Programm enthalten ist, wurde es mittels einer Subroutine von der Website www.soilmodels.info^[4] in ABAQUS eingebunden.

2. Implementierung des hypoplastischen Stoffgesetzes

Die Implementierung des hypoplastischen Stoffgesetzes teilt sich in zwei Schritte:

- Kalibrierung der Stoffparameter des Versuchsmaterials
- Validierung der Ergebnisse der Kalibrierung

Die Kalibrierung der Stoffparameter erfolgte anhand von Elementversuchen in ABAQUS/Standard. Simulationen von Verdichtungs Vorgängen erfordern komplexe Modelle mit einer hohen Anzahl an Freiheitsgraden und Elementen. Bevor das neue Stoffgesetz dazu

verwendet wird, müssen die Ergebnisse der Kalibrierung an einem einfachen Modell geprüft werden. Dazu eignet sich ein im Projekt DynIm entwickelter Modellversuch im Labor.

2.1 Kalibrierung der Stoffparameter

Die in den Tabellen 1 und 2 angegebenen Stoffparameter des Sandes wurden anhand von Laborversuchen und numerischen Simulationen in ABAQUS/Standard ermittelt.

Tabelle 1: Bestimmung der hypoplastischen Stoffparameter

<i>Parameter</i>	<i>Bestimmungsweise</i>
kritischer Reibungswinkel φ_C	Schüttkegelversuch
Granulathärte h_s und Exponent n	Ödometerversuch (lockere Probe) nach DIN 18135:2012-04
Porenzahl e_{d0} , e_{c0} und e_{i0}	Dichtebestimmung nach DIN 18126:1996-11
Exponent α	Triaxialversuch nach DIN 18137-2:2011-04
Exponent β	Ödometerversuch (dichte Probe) nach DIN 18135:2012-04
Erhöhungsfaktoren m_R und m_T Maximalwert der intergranularen Dehnungen R Exponenten β_r und χ	Abschätzung aus der Literatur

Der kritische Reibungswinkel und die Porenzahlen wurden direkt aus Laborversuchen bestimmt. Die Granulathärte und die Exponenten n , α und β wurden anhand von Simulationen der entsprechenden Laborversuche kalibriert. Die Versuche wurden mit nur einem axialsymmetrischen Element abgebildet.

Tabelle 2: Parameter des regionalen Sandes

φ_C	h_s	n	e_{d0}	e_{c0}	e_{i0}	α	β	m_R	m_T	R	β_r	χ
32,4	3300 MPa	0,26	0,4841	0,7502	0,8627	0,25	1,5	5	2	1.10^{-04}	0,5	6

2.2 Validierung der Ergebnisse

Zur Validierung der Ergebnisse der Kalibrierung der Stoffparameter wurde ein bereits bestehender Modellversuch zur Durchführung von optischen Messungen am Boden ausgewählt. Der Versuchsrahmen wurde in rechteckiger Form gebaut (Abbildung 2). Eine behinderte Seitendehnung wird durch die starre Stahlkonstruktion gewährleistet. Die Probe kann durch die verschiebbare Kopfplatte zusammengedrückt werden. Die Acrylglasfront dient optional der Aufnahme von Bodenverschiebungen mit einer Kamera. Die Messwerte (Belastung und Verschiebung) wurden außerhalb der Probe durch die Prüfpresse und einen Wegaufnehmer aufgenommen.

Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Bei der ersten Reihe wurden lockere Proben mit Lagerungsdichten (D) von 0,26 bis 0,28 eingebaut. Die zweite Versuchsreihe erfolgte an mitteldichten Proben mit Lagerungsdichten von 0,46 und 0,48. Die Belastung wurde

stufenweise (20, 40, 80, 160, 320, 640 und 1000 kN/m²) aufgebracht und jeweils 20 Minuten gehalten.

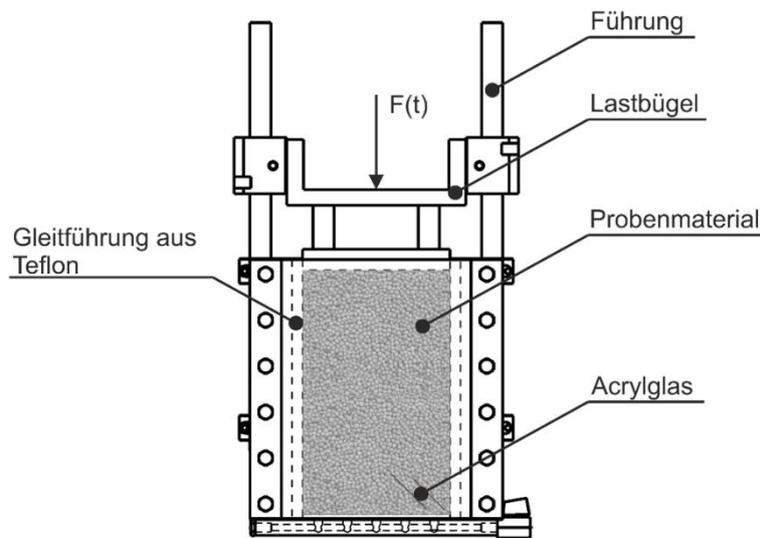


Abbildung 2: Skizze des Versuchsrahmens [Quelle: G² Gruppe Geotechnik]

Die Probe wurde in zwei Dimensionen und im ebenen Verzerrungszustand in ABAQUS/Standard nachgebildet. Beide Seiten des Modells wurden in horizontaler Richtung fixiert. Die untere Seite wurde in vertikaler Richtung unverschieblich gelagert. Nach einer Sensitivitätsanalyse bezüglich der Anzahl der verwendeten Elemente, wurde das Netz mit 943 CPE4-Elementen ausgewählt. Die Last wurde an die obere Seite des Modells angebracht.

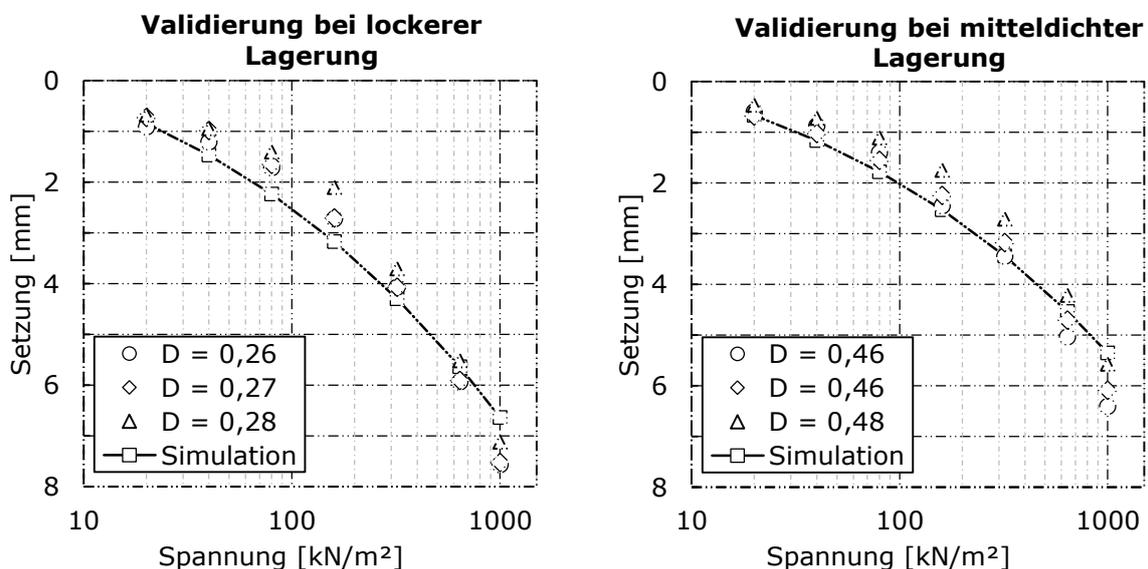


Abbildung 3: Vergleich der Messwerte mit den Ergebnissen aus der numerischen Simulation

Die Abbildung 3 zeigt die maximalen Setzungen am Ende jeder Laststufe. Die Ergebnisse der Simulation stimmen mit den Messwerten bei beiden Lagerungsdichten gut überein. Die Numerik zeigt größerer Setzungen als die Laborversuche bis 320 kN/m². Andererseits sind die berechneten Verschiebungen im oberen Spannungsbereich (640 – 1000 kN/m²) niedriger als die Messwerte. Diese Besonderheit ist bei beiden Lagerungsdichten zu sehen.

Unstimmigkeiten zwischen der Numerik und den Messwerten bedeuten nicht unbedingt, dass die Kalibrierung der Stoffparameter mangelhaft ist. Versuche mit kleiner Skalierung sind oft nicht fehlerfrei, beispielweise kann die Homogenität der Probe und die Glättung ihrer Oberfläche nicht zu 100 % gewährleistet werden. Reibungseffekte wurden in der Simulation nicht berücksichtigt, diese sind allerdings bei dem Laborversuch nicht ausgeschlossen. Sie könnten zu geringeren Setzungen im Labor führen. Allerdings ist dieser Effekt nicht über den gesamten Kurvenverlauf zu beobachten. Die höheren Setzungen bei 1000 kN/m² deuten auf eine nicht ausreichende Steifigkeit des Versuchsrahmens bei hohen Lasten hin. Dies könnte zu einer Aufweitung des Rahmens und dementsprechend zur größeren Verschiebungen führen.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulationsergebnisse entsprechen annähernd den Messwerten. Ob ihre Unterschiede auf die Numerik oder auf den Versuchsaufbau bzw. -Durchführung zurückzuführen sind, muss noch geprüft werden. Dafür werden die Steifigkeit des Versuchsaufbaus sowie der Einfluss der Reibung zwischen Boden und Rahmen untersucht.

Weiterführend sollen dynamische Versuche für die Validierung durchgeführt und simuliert werden. Damit soll belegt werden, dass das hypoplastische Stoffgesetz für die Simulation von dynamischen Verfahren bzw. als Prüfwerkzeug geeignet ist. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Validierung, soll das Stoffgesetz bei Studien zu Verdichtungs Vorgängen verwendet werden.

Erklärung

Die verwendeten Daten für diesen Beitrag stammen aus dem Projekt DynIm (Mittelgeber: BMWi / MF150157).

Literaturverzeichnis

- [1] Thiele, R.; Kloubert, H-J: Erfahrungen im Einsatz eines Walzenzuges mit Polygonbandage zur Tiefenverdichtung, In: Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. (FVB) [Hg.], 2006, Heft 34, S. 315–326
- [2] Adam, D.: Aktuelle Entwicklungen im Erd- und Grundbau für Straßen und Eisenbahnen, In: Tagungsband zur 9. Erdbaufachtagung Bauakademie Sachsen [Hg.], 2013, S.13-77
- [3] Pistor, Johannes, et al. 2012. Numerische Simulation zur Wirkungsweise verschiedener Bandagetypen bei der Verdichtung mit Walzen im Erdbau. [Hg.] Dietmar Adam und Richard A. Herrmann. 2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik am 13. und 14. September 2012 an der TU Wien. Wien : Eigenverlag des Instituts für Geotechnik, TU Wien, 2012, S. 229-246. ISBN: 978-3-9501738-1-9
- [4] G. Gudehus, A. Amorosi, A. Gens, I. Herle, D. Kolymbas. D. Mašín, D. Muir Wood, R. Nova, A. Niemunis, M. Pastor, C. Tamagnini, and G. Viggiani. The soilmodels.info project. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 32(12):1571-1572, 2008