

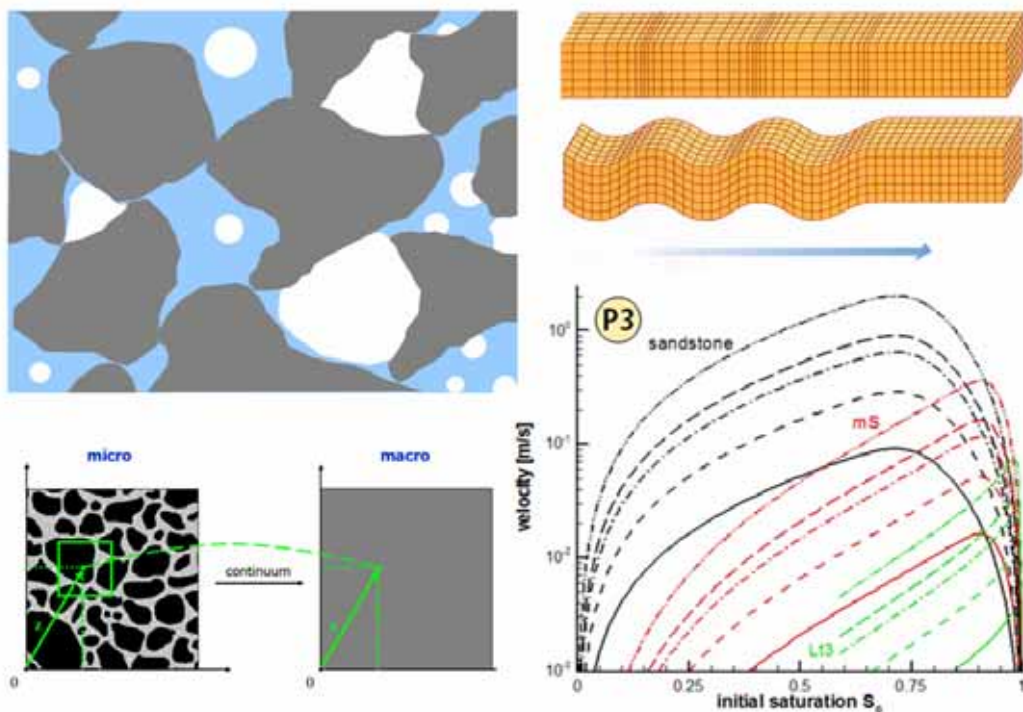
VERÖFFENTLICHUNGEN

des Grundbauinstitutes
der Technischen Universität Berlin

Herausgegeben von S.A. Savidis

HEFT 48

Modeling and Numerical Analysis of Wave Propagation in Saturated and Partially Saturated Porous Media



Bettina Albers

Berlin 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Habil.-Schr., 2010

Adresse des Instituts:

Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik - Degebo
Technische Universität Berlin
Schr. TIB1-B7
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin

Telefon: (030) 314-72341
Telefax: (030) 314-72343
E-Mail: info@grundbau.tu-berlin.de
Internet: <http://www.grundbau.tu-berlin.de>

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9008-5
ISSN 0342-3905

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

B.Albers: Modeling and Numerical Analysis of Wave Propagation in Saturated and Partially Saturated Porous Media

Für die Wellenausbreitungsuntersuchung in teilgesättigten poroelastischen Medien wird ein lineares, hyperbolisches Modell für einen dreikomponentigen Körper, bestehend aus einem deformierbaren Feststoff und zwei nichtmischbaren Porenfluiden, entwickelt. Grundlage für dieses kontinuumsmechanische Modell sind zwei Modelle für gesättigte poröse Medien: Das klassische Biot-Modell, das in den Spannungstensorsen Kopplungsterme enthält, und das auf der Mischungstheorie basierende Simple Mixture Modell von Wilmanski, in dem die Porosität als eigenes Feld auftritt und eine Bilanzgleichung erfüllt. Die makroskopischen Materialparameter müssen entweder durch ein Mikro-Makro-Verfahren aus den meßbaren mikroskopischen Größen bestimmt werden oder man greift auf Beziehungen von Santos, Corberó & Douglas zurück, die für den dreikomponentigen Körper zu den Gassmann-Relationen für gesättigte poröse Medien analog sind. Die Wellenausbreitungsanalyse prognostiziert das Auftreten von vier Schallwellen im teilgesättigten porösen Körper – einer Transversalwelle, S , und drei Kompressionswellen, P_1 , P_2 und P_3 . Ihre Phasengeschwindigkeiten und Dämpfungen werden in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Sättigungsgrad, d.h. dem Anteil des benetzenden Porenfluids am Hohlraumvolumen, bestimmt. Die P_1 -Welle ist hauptsächlich durch das Skelett bestimmt. Die P_2 -Welle zeigt in Abhängigkeit von der Sättigung ein ähnliches Verhalten wie für Suspensionen: In ihrer Geschwindigkeit tritt ein starkes Minimum auf. Die P_3 -Welle ist nur vorhanden, wenn mindestens zwei nichtmischbare Porenfluide auftreten. Ihre Geschwindigkeit wird auf den zwischen ihnen herrschenden Kapillardruck zurückgeführt. Dieser geht durch ein empirisches Gesetz nach van Genuchten in das Modell ein. Neben der Wellenanalyse von Sandstein, der mit drei unterschiedlichen Porenmischungen gefüllt ist, wird das akustische Verhalten von elf, mit Wasser und Luft gefüllten, nichtkonsolidierten Bodenarten untersucht. Die nötigen Materialparameter werden teilweise aus experimentellen Daten bestimmt, aber größtenteils der Deutschen Norm DIN 4220 entnommen. Modellparameter und Ergebnisse der Wellenanalyse sind im Anhang für jede Bodenart in Tafeln und Abbildungen zusammengefasst. In einem Überblick über die Geschichte der Wellenausbreitungsuntersuchung teilgesättigter Böden werden sowohl theoretische als auch experimentelle Ergebnisse anderer Autoren besprochen. Sie bestätigen ein Phänomen der P_1 -Wellengeschwindigkeit, das für die Entwicklung zerstörungsfreier Prüfmethoden, z.B. zur Warnung vor Erdbeben, genutzt werden kann: Bei einem hohen Sättigungsgrad steigt diese Geschwindigkeit bis zum Doppelten ihrer sonstigen Größe an.

Der Untersuchung teilgesättigter Böden gehen Grundlagen voran. Außer einer kurzen Einführung in die kontinuumsmechanische Modellbildung werden im ersten Teil der Arbeit allgemeine Begriffe der Akustik eingeführt und sowohl Körper- als auch Oberflächenwellen in einkomponentigen Körpern analysiert. Die Modellierung mehrkomponentiger Medien verlangt die Einführung von zusätzlichen mikrostrukturellen Variablen wie z.B. der Porosität. Es werden Modelle vorgestellt, die diese in verschiedener Weise berücksichtigen. Sie werden eingesetzt, um wichtige Fragen für den einfacheren Fall der gesättigten porösen Medien zu klären. So wird das Mikro-Makro-Verfahren auch für zweikomponentige Materialien vorgestellt und die Ausbreitung monochromatischer Wellen in solchen Medien untersucht. Dabei wird der Bestimmung des Einflusses von Porosität und Poisson-Zahl sowie verschiedener Kopplungen besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Für gesättigte poröse Körper werden auch Oberflächenwellen am freien Rand und an der Grenze zu einem Fluid untersucht, weil ihre theoretische Untersuchung die Grundlage für die Entwicklung einer zerstörungsfreien Prüfmethode für den Baugrund darstellen kann. Für ungesättigte poröse Medien liegen solche Ergebnisse noch nicht vor.

B.Albers: Modeling and Numerical Analysis of Wave Propagation in Saturated and Partially Saturated Porous Media

In order to investigate the propagation of waves in partially saturated poroelastic media, a linear hyperbolic model for a three component medium consisting of a deformable solid and two immiscible pore fluids is developed. Basis for this continuum mechanical model are two models for saturated porous media: the classical Biot Model which contains couplings in the stress tensors and the Simple Mixture Model by Wilmanski which is based on the mixture theory and in which the porosity is an own field satisfying a balance law. Macroscopic material parameters have to be determined from their measurable microscopic counterparts either by a micro-macro-transition or using relations for the three-component body by Santos, Corberó & Douglas which are analogous to the Gassmann relations for saturated porous media. The wave propagation analysis predicts the existence of four sound waves in partially saturated porous media – one transversal wave, S, and three compressional waves, P1, P2 and P3. Their phase speeds and attenuations are determined in dependence on frequency and degree of saturation, i.e. of the fraction of the wetting pore fluid to the whole void volume. The P1-wave is mainly driven by the skeleton. The P2-wave shows a similar behavior to the sound wave in suspensions: its speed has a deep minimum in dependence on the saturation. The P3-wave only exists if at least two immiscible pore fluids occur. Its speed is attributed to the capillary pressure between the pore fluids. This enters the model by use of an empirical law by van Genuchten. Besides the wave analysis of sandstone filled by three different pore-mixtures the acoustic behavior of eleven unconsolidated soil types, filled by water and air, is studied. Necessary material parameters are partly taken from experimental data but mainly gathered from the German standard DIN 4220. Model parameters and the results of the wave analysis are summarized in tables and illustrations in an appendix. In an overview of the history of wave propagation analysis of partially saturated soils both theoretical and experimental results of other authors are discussed. They confirm a phenomenon of the speed of the P1-wave which may be used for the development of nondestructive testing methods, e.g. to warn against landslides: at a high degree of saturation this speed increases up to the double of its value for other saturations.

The investigation of partially saturated soils is preceded by the presentation of some fundamentals. Besides a short introduction to continuum mechanical modeling in the first part of the work general notions of acoustics are introduced as well as both body and surface waves in one-component media are analyzed. The modeling of multi-component media requires the introduction of additional microstructural variables, as for example, of porosity. Some models are presented which account for them in different manner. The models are applied to solve some important problems for saturated porous media because, even though they possess certain properties common with three-component models, their analysis is simpler than this of three-component materials. Some of these topics, as for instance the presentation of the micro-macro-procedure and the investigation of the propagation of monochromatic bulk waves is afterwards extended to three-component materials. Special attention is devoted to the determination of the influence of porosity and Poisson's number as well as of various couplings appearing in the models for saturated porous media. For saturated porous media also surface waves at the free boundary and at the interface with a fluid are investigated because their theoretical analysis may be the basis for the development of a nondestructive testing method of construction sites. Such results for unsaturated media are still missing.