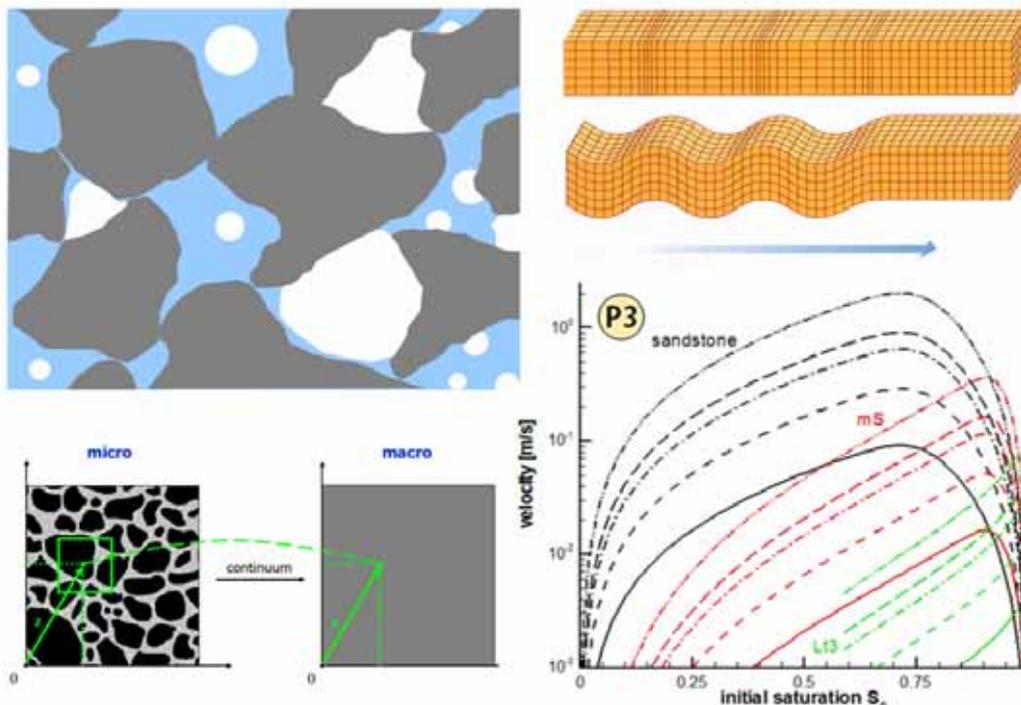


VERÖFFENTLICHUNGEN

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
Skr. 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

Vorwort des Herausgebers

Die vorliegende Arbeit von Frau Dr. B. Albers umfasst die kontinuumsmechanische Modellbildung und die theoretische und numerische Wellenanalyse für einkomponentige, zweikomponentige und dreikomponentige Medien. Das Hauptaugenmerk liegt auf teilgesättigten poroelastischen Medien, für die ein lineares Modell entwickelt wird, das auf dem Biot-Modell und dem Wilmanski-Modell für gesättigte poröse Medien basiert. In diesem Modell sind sowohl der Feststoff als auch zwei nichtmischbare Porenfluide deformierbar. Durch eine Volumenmittelung werden die Eigenschaften der Mikroebene auf die Makroebene übertragen. Die Materialparameter des makroskopischen Modells werden durch ein systematisches Mikro-Makro-Verfahren aus messbaren mikroskopischen Größen bestimmt. Neben Sandstein, der mit drei unterschiedlichen Porenmischungen gefüllt ist, wird das akustische Verhalten von elf mit Wasser und Luft gefüllten Bodenarten untersucht, die in DIN 4220 klassifiziert sind. Die Wellenausbreitungsanalyse prognostiziert das Auftreten von vier Schallwellen im teilgesättigten porösen Körper. Dies sind drei Kompressionswellen und eine Transversalwelle. Ihre Phasengeschwindigkeiten und Dämpfungen werden in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Sättigungsgrad untersucht. Die Scherwelle und die schnellste Longitudinalwelle sind in der Bodendynamik bekannt. Die beiden langsameren Longitudinalwellen sind von geringerer praktischer Bedeutung, weil ihre Dämpfung sehr groß ist. Sie werden durch das Auftreten der Porenfluide hervorgerufen. Ihre theoretische Untersuchung ist aber trotzdem wichtig, weil sie für die Bestimmung von Oberflächenwellen benötigt werden. Vergleiche mit anderen Autoren bestätigen ein Phänomen der schnellen Longitudinalwelle, das für die Entwicklung zerstörungsfreier Prüfmethode, z.B. zur Warnung vor Erdbeben, genutzt werden kann: Bei einem hohen Sättigungsgrad steigt deren Geschwindigkeit bis zum Doppelten ihrer sonstigen Größe an. Oberflächenwellen haben aber im Allgemeinen eine geringere Dämpfung als Körperwellen und können deshalb noch besser zur Entwicklung zerstörungsfreier Prüfmethode dienen. Um das Modell praktisch anwendbar zu machen, werden die für das Modell benötigten Parameter sowie die Ergebnisse der Wellenanalyse im Anhang für jede Bodenart in Tabellen und Abbildungen zusammengefasst. Die vorliegende Arbeit eröffnet Möglichkeiten für weitere bodendynamische Forschungen, insbesondere für die Oberflächenwellenanalyse zur Weiterentwicklung zerstörungsfreier Prüfmethode.

Berlin, im Februar 2010

Stavros A. Savidis

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

Habilitationsschrift an der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung der Venia legendi für das Fach
Mechanik

vorgelegt von

Dr.-Ing. Bettina Albers

Eingereicht: 22. Oktober 2008

Lehrprobe: 12. März 2009

Kolloquium: 25. Januar 2010

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. S.A. Savidis (TU Berlin)

Prof. Dr.-Ing. K. Wilmanski (University of Zielona Gora)

Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. E. Bauer (TU Graz)

Berlin 2010

D 83

Danke!

Es gibt viele Personen und Institutionen, denen ich danken möchte, weil sie entweder zur Entstehung dieser Habilitationsschrift beigetragen haben oder in anderer Weise geholfen haben, mich der Habilitation näher zu bringen.

An erster Stelle danke ich Professor Dr. Krzysztof Wilmanski, der nun schon mein gesamtes wissenschaftliches Leben begleitet, und der mich mit seiner Begeisterung für die Erforschung von Phänomenen in porösen Medien angesteckt hat. Ich bewundere sein außergewöhnlich umfassendes Wissen in sehr vielen Bereichen und bin ihm von Herzen dankbar, dass er mir immer als Diskussionspartner und Berater zur Seite steht.

Professor Wilmanski war Forschungsgruppenleiter der Forschungsgruppe "Kontinuumsmechanik" im Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik in Berlin. Während meiner dortigen Beschäftigung (1997-2005) ist der Teil dieser Arbeit über die Ausbreitung von Körper- und Oberflächenwellen in gesättigten porösen Medien entstanden. Ich habe die Zeit im WIAS als sehr angenehm empfunden und danke den ehemaligen Kollegen für dieses positive Umfeld.

Die Untersuchung von ungesättigten porösen Medien habe ich im Rahmen einer "Eigenen Stelle" durchgeführt, die drei Jahre lang von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert wurde. Selbstverständlich bin ich für diese Unterstützung meiner Forschung sehr dankbar. Diese Stelle ist am Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik – Degebo der Technischen Universität Berlin angesiedelt gewesen. Ich danke dem Direktor, Professor Dr. Stavros Savidis für die freundliche Aufnahme am Fachgebiet, für die Freiheit, die mir gewährt wurde, meine Ideen umzusetzen und selbständig zu arbeiten, und nicht zuletzt natürlich für die Übernahme der Begutachtung.

Ein weiteres Gutachten hat Professor Dr. Erich Bauer (TU Graz) übernommen. Es gilt ihm ein herzlicher Dank dafür, dass er sozusagen als Bindeglied zwischen Mechanik und Bodenmechanik gewirkt hat. Diverse Diskussionen mit ihm haben diese Arbeit sicherlich bereichert. Auch dem Vorsitzenden der Habilitationskommission, Herrn Professor Dr. Yuri Petryna möchte ich dafür danken, dass er für dieses Amt zur Verfügung stand und stets bereit war, das Verfahren voran zu treiben.

Auch die Kolleg(inn)en an der TU Berlin haben für eine angenehme Arbeitsatmosphäre gesorgt. Zuerst möchte ich natürlich den Assistenten des Fachgebiets danken, besonders dem Akademischen Rat, Dr. Frank Rackwitz. Zum Beispiel die gemeinsamen Mittagessen haben zur Auflockerung der Arbeitstage beigetragen. Aber auch die studentischen Mitarbeiter, die Labormitarbeiter und die Sekretärin, Frau Hadzik-Schulz, tragen zu einem gut funktionierenden Fachgebiet bei. Die DFG bewilligte auch die Mitarbeit einer studentischen Hilfskraft. Im Laufe der drei Jahre waren mir zwei studentische Mitarbeiter behilflich. Ich danke vor allem Dirk Kleist, aber auch Panos Cyrannos für ihre Mitwirkung.

Im Rahmen der Habilitation ist ein gewisses Lehrkontingent zu erbringen. Ich danke Professor Dr. Renato Lancellotta (Polytechnikum Turin, Italien), Professor Dr. Erich Bauer und Professor Dr. Martin Schanz (TU Graz, Österreich) sowie Professor Dr. Bernd Zastra (TU Dresden) für die Übertragung von Lehraufträgen. Ein weiterer Dank gilt Professor Dr. Krzysztof Wilmanski und Dr. Carlo Lai für die Einladung als Vortragende bei einem CISM-Kurs (International Center for Mechanical Sciences) in Udine, Italien.

Es war eine sehr schöne Erfahrung, dass ich einige Monate am Technion – Israel Institute

of Technology – verbringen durfte und dort meine Arbeit mit Professor Dr. Jacob Bear besprechen konnte. Ich danke ihm dafür sehr herzlich.

"Die Arbeit ist nicht das ganze Leben" und deshalb entschuldige ich mich bei meiner Familie, allen voran bei meinem Ehemann, Dieter, und bei meiner Mutter dafür, dass sie in den letzten Jahren manchmal ein bißchen zurückstecken mussten und danke ihnen für ihr Verständnis.

Bettina Albers

Summary

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.

Zusammenfassung

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 Spannungstensoren 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, $P1$, $P2$ und $P3$. Ihre Phasengeschwindigkeiten und Dämpfungen werden in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Sättigungsgrad, d.h. dem Anteil des benetzenden Porenfluids am Hohlraumvolumen, bestimmt. Die $P1$ -Welle ist hauptsächlich durch das Skelett bestimmt. Die $P2$ -Welle zeigt in Abhängigkeit von der Sättigung ein ähnliches Verhalten wie für Suspensionen: In ihrer Geschwindigkeit tritt ein starkes Minimum auf. Die $P3$ -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 $P1$ -Wellengeschwindigkeit, das für die Entwicklung zerstörungsfreier Prüfmethode, 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.

Contents

Introduction	1
I Fundamentals	7
1 Fundamentals of continuum modeling and porous media	9
1.1 Introduction	9
1.2 One-component media	9
1.3 Multi-component bodies; porous media	13
2 Glance on some microstructural variables	20
2.1 Porosity	20
2.1.1 Changes of porosity	21
2.2 Saturation	22
2.3 Surface tension and capillarity	23
3 Basic knowledge about waves	29
4 Bulk waves in an one-component elastic medium	35
5 Surface waves in one-component media	39
5.1 Introduction	39
5.2 Rayleigh waves in homogeneous elastic media	39
5.3 Waves in a layer of an ideal fluid and Love waves	41
5.4 Surface waves in elastic heterogeneous materials	44
II Saturated Porous Media	47
1 Modeling saturated porous media	49
1.1 Introduction	49
1.2 Full Model	49
1.3 Biot's model	51
1.4 Simple Mixture Model	54
2 Micro-macro transitions in two-component porous media	57
2.1 Introduction	57
2.2 Summary of the governing equations (Full Model)	57
2.3 Micro-macro transition procedure	59
2.4 Fundamental equations for compressibilities	60

2.5	Gedankenexperiments	61
2.6	A numerical example	63
2.7	Some remarks	65
3	Bulk waves in two-component poroelastic media	67
3.1	Introduction	67
3.2	Propagation of acoustic fronts in two-component media	67
3.3	Monochromatic waves in two-component media	69
3.3.1	General relations	69
3.3.2	Longitudinal waves	70
3.3.3	Transversal waves	74
3.4	Group velocities	75
3.5	Some remarks	77
4	Influence of Poisson's number and porosity	79
4.1	Introduction	79
4.2	Relation between Full Model and Biot's Model	80
4.3	Material parameters – Gassmann relations	82
4.4	Propagation of fronts of weak discontinuity waves	84
4.5	Monochromatic bulk waves	90
4.5.1	Transversal wave	91
4.5.2	Longitudinal waves	92
4.6	Some remarks	94
5	Influence of the coupling parameters	99
5.1	Introduction	99
5.2	Summary of the governing equations (Full Model)	100
5.3	Propagation conditions of monochromatic waves	101
5.3.1	Transversal wave	102
5.3.2	Longitudinal waves	103
5.4	Numerical analysis of the dispersion relation	104
5.5	Some remarks	107
6	Surface waves	109
6.1	Introduction	109
6.2	Boundary conditions	110
6.3	Surface waves at the free boundary of a saturated porous medium	112
6.3.1	Construction of a solution for a semiinfinite medium	114
6.3.2	Numerical procedure and parameters	119
6.3.3	Numerical results	120
6.3.4	Summary of results for boundary porous medium/vacuum	126
6.4	Surface waves at the boundary of a saturated porous medium with a fluid	128
6.4.1	Construction of the solution	129
6.4.2	Procedure and parameters	134
6.4.3	Numerical results	135
6.4.4	Summary of results for boundary porous medium/fluid	139
6.5	Comparison of the surface wave analyses to results of other authors	141
6.6	Some remarks	144

III	Partially Saturated Porous Media	145
1	Mechanical behavior of partially saturated porous media	147
2	Micro-macro transitions in three-component porous media	155
2.1	Introduction	155
2.2	Linear three-component model for poroelastic media	156
2.3	Relative permeability parameters	158
2.4	Spherical static deformations	160
2.5	Intermediate results	163
2.6	Material parameters in the limits $S_0 = 1$ and $S_0 = 0$	166
2.7	Santos, Corberó & Douglas approach	169
2.8	Gedankenexperiments for compressibilities	176
2.8.1	Average pressure in the pores	177
2.8.2	Compressibility tests	177
2.9	Numerical examples	178
2.10	Some remarks	181
2.11	Some coefficients used in the micro-macro-transition	182
3	Wave propagation in partially saturated rocks	187
3.1	Introduction	187
3.2	General propagation condition of monochromatic waves	187
3.2.1	Transversal wave	188
3.2.2	Longitudinal waves	189
3.3	Numerical analysis of the wave propagation	190
3.3.1	Wave velocities in the limit values of frequency and saturation . . .	191
3.3.2	Discussion of numerical results	192
3.4	Some remarks	213
4	Hyperbolicity of the model	215
4.1	Introduction	215
4.2	Summary of field equations	215
4.3	Conditions for hyperbolicity of the model	216
4.4	Some remarks	218
5	On results of other authors	221
5.1	Experimental results	221
5.2	Theoretical results	224
5.2.1	Modeling	224
5.2.2	Body waves	228
5.2.3	Surface waves	235
5.2.4	Waves in further soil textures	235
6	Further soil textures	239
6.1	Introduction	239
6.2	Soil classification	239
6.3	Determination of material parameters of some soil textures	240
6.4	Wave velocities and attenuations	246
6.4.1	Dependence on the frequency	246

6.4.2	Dependence on the initial saturation	247
6.4.3	Comparison by normalization with respect to sand (mS)	249
6.4.4	Comparison of three chosen soil textures	250
6.5	Some remarks	251
Final remarks		261
IV Appendices and tables		263
A Soil classification by means of DIN 4220		265
B Tables of material parameters in the limit $S_0 = 1$		279
C Summary of properties of chosen texture types		281
C.1	Sandstone	282
C.2	Pure sand (mS)	283
C.3	Loam sand (St2)	284
C.4	Silt sand (Su4)	285
C.5	Sand loam (Slu)	286
C.6	Normal loam (Ls2)	287
C.7	Clay loam (Lts)	288
C.8	Sand silt (Us)	289
C.9	Loam silt (Ut3)	290
C.10	Clay silt (Ut4)	291
C.11	Silt clay (Lt3)	292
C.12	Loam clay (Tt)	293
Bibliography		293
Index		311