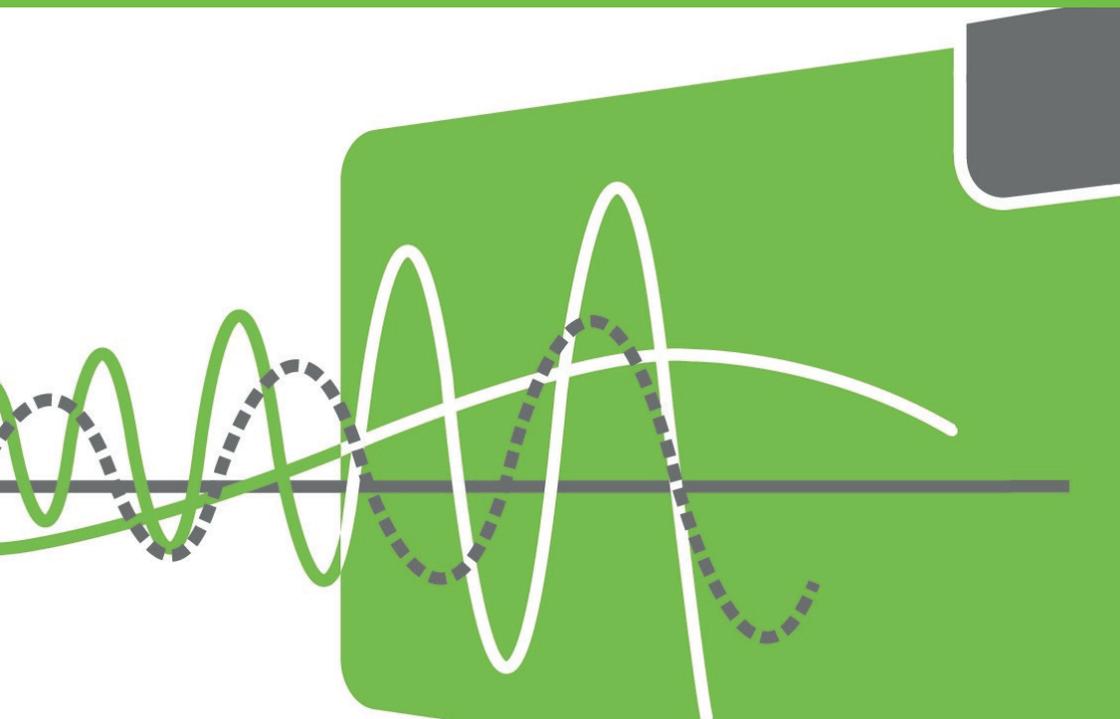
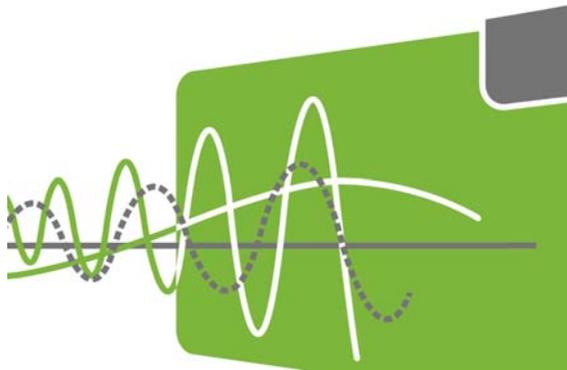


Kontinuumsmechanische Beschreibung und
transiente, numerische FEM Simulation eines
hyperelastischen, zweiphasigen Materials
unter Berücksichtigung von Osmose und
Schädigung mit Anwendungsbeispielen
für den Gelenkknorpel

Daniel Albrecht





**Kontinuumsmechanische Beschreibung und
transiente, numerische FEM Simulation eines
hyperelastischen, zweiphasigen Materials unter
Berücksichtigung von Osmose und Schädigung mit
Anwendungsbeispielen für den Gelenkknorpel**

Von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen der Technischen Universität
Dortmund zur Erlangung der Würde des Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Daniel Albrecht

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Tim Ricken
apl. Prof. Dr.-Ing. Joachim Bluhm

Tag der Einreichung: 30.07.2018
Tag der mündlichen Prüfung: 22.03.2019

TU Dortmund
Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
Lehrstuhl Mechanik Statik Dynamik
August-Schmidt-Str. 6, 44227 Dortmund

Berichte aus dem Bauwesen

Daniel Albrecht

**Kontinuumsmechanische Beschreibung und
transiente, numerische FEM Simulation eines
hyperelastischen, zweiphasigen Materials unter
Berücksichtigung von Osmose und Schädigung mit
Anwendungsbeispielen für den Gelenkknorpel**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7197-9

ISSN 0945-067X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Einordnung in die medizinische Entwicklung	1
1.2	Motivation und Problemstellung	1
1.3	Ziel der Arbeit	4
1.3.1	Patientenspezifische Behandlungsmöglichkeiten	5
1.4	Gliederung der Arbeit	6
2	Stand der Forschung	7
2.1	Aufbau des Gelenkknorpel	7
2.1.1	Mikroskopischer Aufbau	8
2.2	Mechanische Eigenschaften des Gelenkknorpels	10
2.2.1	Bildgebungsverfahren	12
2.3	Stand der Forschung	14
2.3.1	Das Modell von MABUMA, MARKERT und EHLERS	14
2.3.2	Das Modell von FEDERICO, GRILLO und HERZOG	16
2.3.3	Das Modell von PIERCE und RICKEN	17
2.3.4	Gegenüberstellung der Modelle	18
2.3.5	Schädigung von Biomaterialien	18
2.4	Problemstellung	18
2.5	Thematische Vorgehensweise	22
2.6	Experimentelle Arbeiten	23
3	Kontinuumsmechanische Grundlagen	25
3.1	Einsteinsche Summenkonvention	25
3.2	Basissysteme	26
3.3	Multiplikationen für Tensoren	27
3.4	Theorie poröser Medien	27
3.4.1	Volumen- und Saturierungsbedingungen	29

3.4.2	Masse und Partialdichte	29
3.4.3	EULERSche und LAGRANGESche Betrachtungsweise	30
3.4.4	Kinematik	30
3.4.5	Deformation und Verzerrung	32
3.4.6	Materielle Zeitableitungen	33
3.5	Bilanzsätze	34
3.5.1	Massenbilanz	34
3.5.2	Impulsbilanz	36
3.5.3	Drehimpulsbilanz	38
3.5.4	Energiebilanz	39
3.6	Der Strukturtensor \mathbf{M}_0	43
3.7	Spannungstensoren	43
3.7.1	Arbeitskonjugierte Paare	44
3.8	Linearisierung der Spannungs- und Verzerrungstensoren	44
3.9	Invarianten	45
4	Konstitutive Modellbildung	47
4.1	Annahmen für die konstitutive Modellbildung	48
4.2	Auswertung der Entropiegleichung	50
4.2.1	Freie HELMHOLTZ-Energien	51
4.3	Endgültige Entropiegleichung	52
4.4	Spannungen beider Phasen	53
4.5	Bestimmung des Materialtensors	56
4.6	Auswertung der Sickergeschwindigkeit	57
4.7	Osmose	59
4.7.1	Spannungen aus osmotischem Druck	62
4.8	Erweiterung des Modells um dem Aspekt der Schädigung	63
4.8.1	Ermittlung des Spannungstensors und Materialtensors infolge Schädigung	67
5	Numerische Umsetzung	69
5.1	Schwache Formulierungen	70
5.1.1	Randbedingungen	74
5.2	Numerische Approximierung	75
5.2.1	NEWTON-Verfahren	79
6	Simulationsergebnisse	81

6.1	Materialparameter	82
6.1.1	Viskoelastische Materialparameter	82
6.1.2	Osmose- und Schädigungsparameter	85
6.1.3	Anmerkung zum DARCY-Koeffizienten	85
6.2	Validierung der Osmose	86
6.3	Knorpelscheibe	91
6.3.1	Konvergenzstudie an der Knorpelscheibe	94
6.3.2	Wahl der Kollagenfaserverteilungsfunktion	95
6.3.3	Simulation der Relaxation	97
6.3.4	Studie zu transversal-isotropen Materialparametern k_1 und k_2	100
6.4	Schädigungssimulationen	102
6.4.1	Test des Schädigungsmodells	103
6.4.2	Erweiterung des Schädigungsansatzes	104
6.4.3	Schädigung unter zyklischer Belastung	107
7	Zusammenfassung und Ausblick	111
8	Appendix	115
8.1	Appendix A1	115
8.2	Appendix A2	116
8.3	Appendix A3	119
8.4	Appendix A4	119
8.5	Appendix A5	120
8.6	Appendix A6	123
8.7	Appendix A7	126
8.8	Appendix A8	130