Zur Kopplung finiter Element Approximationen und zellbasierter Fuzzy-Modelle

Holistischer Modellansatz zur Simulation hydro-ökologischer Prozesse

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie

der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Inform. Tino Schonert

geboren am 15.04.1978 in Brandenburg an der Havel

2007

Hauptreferent:

Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt

Koreferent:

Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann

Tag der Promotion: 24. 08. 2007

Berichte aus der Bauinformatik

Tino Schonert

Zur Kopplung finiter Element Approximationen und zellbasierter Fuzzy-Modelle

Holistischer Modellansatz zur Simulation
hydro-ökologischer Prozesse

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Hannover, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6648-6
ISSN 1612-6262

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

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Kopplung unterschiedlicher Modellansätze auf der Basis finiter Element Approximationen und zellbasierter Fuzzy-Modelle. Während sich erstere insbesondere im Bereich der Strukturmechanik und Strömungsmechanik zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen etabliert haben, können zellbasierte Modelle überwiegend dann zum Einsatz kommen, wenn kein mathematisches Modell existiert, sich jedoch das Systemverhalten und Abhängigkeiten regelbasiert formulieren lassen. Hierzu wird ein fuzzybasierter Modellansatz als alternative Modellbeschreibung vorgestellt, mit dem sich die zeitliche Entwicklung und Zustandsänderung der Systemgrößen durch linguistische Expertenregeln beschreiben lässt. Zur mathematischen Repräsentation der unscharfen linguistischen Konstrukte und Beschreibungsformen bietet sich vor allem die Theorie unscharfer Mengen (engl: *fuzzy set theory*) an.

Die Anwendbarkeit des fuzzybasierten Modellansatzes wird im Rahmen der Modellbildung und Simulation hydro-ökologischer Prozesse im Küstenbereich untersucht. Zur Beschreibung der überwiegend physikalischen Prozesse im Gewässer, wie Seegang, Strömung und Transport, wird ein holistisches Modellsystem auf der Basis stabilisierter finiter Elemente genutzt. Die Berücksichtigung benthischer Ökosysteme, am Beispiel des Seegrasbewuchses, und deren Interaktion auf Hydro- und Morphodynamik erfolgt durch Abbildung der komplexen regelbasierten Wirkzusammenhänge in Form eines dynamischen Fuzzy-Systems. Die numerische Simulation dieser fuzzy-regelbasierten Modellansätze durch zellbasierte Modelle erfordert die Erweiterung des klassischen Konzepts Zellulärer Automaten als vollkommen diskretes Simulationswerkzeug.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Kopplung dieser unterschiedlichen Modellapproximationen. Die prinzipiellen Unterschiede erfordern geeignete Strategien zur Modellkopplung, die eine konsistente Übertragung der Systemgrößen von einem Modell ins andere gewährleisten. Neben einer konservativen geometrischen Interpolation ist vor allem der Einsatz geeigneter Fuzzifizierungs- und Defuzzifizierungsmethoden erforderlich, die eine konsistente Abbildung stetiger und diskreter Modellparameter erlauben. Darüber hinaus werden geeignete Ansätze, die die Interaktion zwischen Bewuchs, Strömung und Morphodynamik durch Berücksichtigung der biomechanischen Eigenschaften wiedergeben im Rahmen einer physikalisch phänomenologischen Kopplung vorgestellt.

Die Integration der entwickelten Modellansätze und Kopplungsstrategien in ein holistisches Modellsystems ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung und Simulation hydro-, morphodynamischer und ökologischer Prozesse. Anhand erster qualitativer Untersuchungen des gekoppelten hydro-ökologischen Modellsystems wird die Anwendbarkeit des fuzzybasierten Ansatzes sowie die Tragfähigkeit des vorgestellten Kopplungsschemas gezeigt.

Schlüsselwörter: *fuzzy-basierte Modellansätze, finite Elemente, Kopplung, hydro-ökologische Simulation*

Abstract

This dissertation concentrates on the coupling of different model paradigms based on finite element approximations and cellbased fuzzy models. Continuous valued model approximations are widely used in structure mechanics and hydromechanics to solve the related partial differential equations. Discrete cellbased fuzzy models can be used to describe natural processes where no equivalent mathematical formulation exists. However system behaviour and dependencies can be specified with linguistic rules. To describe this linguistic knowledge, a fuzzy-based model approach is introduced which allows an alternative model description. The concepts of fuzzy set theory enable a mathematical representation of unsharp linguistic constructs and formulations.

The applicability of the fuzzy-based model approach is demonstrated in modeling and simulation of hydro-ecological processes in coastal engineering. For the description of the physical processes like waves, currents and transport, a holistic model system based on time-dependent partial differential equations is used.

The consideration of benthic ecosystems like seagrass vegetation and especially the interaction with hydro- and morphodynamic processes, is facilitated by a rule-based formulation in form of dynamic fuzzy system. The numerical approximation is performed by a stabilized finite element method for hydro- and morphodynamic processes and by a cellbased fuzzy model for the simulation of ecological processes. The numerical simulation of the fuzzy rule-based model approach needs to extends classical discrete cellular automata concepts.

This thesis mainly focuses on analysis and presentation of suitable coupling strategies for continuous approximations and discrete fuzzy models. The fundamental differences require special transfer and coupling strategies which allow for a consistent coupling scheme. This comprises conservative geometric interpolation, suitable fuzzification and defuzzification methods for transfer continuous and discrete state values as well as coupling of different time scales. Furthermore, the interaction between vegetation, hydro- and morphodynamic can be performed by consideration of biomechanical properties within a physical-phenomenological coupling.

The integration of the developed fuzzy-based model approach and coupling strategies into an eco-hydraulic model system allows for a holistic consideration and simulation of hydro-, morphodynamic and ecological processes. First qualitative studies of this eco-hydraulic model system demonstrate the applicability of the coupled finite element-fuzzy based approach and the capability of the presented coupling procedures.

Keywords: *fuzzy based modelling, finite elements, coupling, hydro-ecological simulation*

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2003 bis 2007 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauinformatik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 615 „Interaktion von Modellbildung, Numerik und Software-Konzepten für technisch-wissenschaftliche Problemstellungen“.

An erster Stelle möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt für die Betreuung dieser Arbeit bedanken. Ich bin ihm für seine Anregungen und Diskussionen sehr dankbar, insbesondere weil sie der Anlass waren, mir ein für mich bis zu diesem Zeitpunkt weitgehend unbekanntes Thema zu erarbeiten. Für seine stetige menschliche und wissenschaftliche Begleitung während dieser Zeit und die Übernahme des Referates fühle ich mich Herrn Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt zu besonderem Dank verpflichtet.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferates. Ich habe mich sehr gefreut, dass er sich sofort bereit erklärt hat meine Arbeit zu begutachten und durch viele Gespräche und Anregungen letztlich sehr zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen hat.

All meinen Kolleginnen und Kollegen, die mich so herzlich im Institut aufgenommen haben und mit denen ich jeden Tag zusammen sein durfte, danke ich ganz herzlich für die angenehme Zusammenarbeit, die vielen anregenden Gespräche und Diskussionen sowie den Spaß, der in den vergangenen Jahren nicht zu kurz kam. Es war und ist mir einfach eine große Freude, in diesem Institut zu arbeiten.

Ich danke insbesondere der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) die mir die Möglichkeit der Promotion im Rahmen eines Promotionsstipendiums im Graduiertenkolleg 615 gegeben hat. Für den regelmäßigen wissenschaftlichen Austausch und Diskussionen im Rahmen von Forschungsreisen und Treffen der Stipendiaten anderer Fachrichtungen bin ich überaus dankbar.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Lebensgefährtin Mandy Dorenburg, die mich in den letzten Jahren immer unterstützt hat, viel Verständnis in der schwierigen Phase der Promotion gezeigt hat und stets zu mir gehalten hat. Für ihre Unterstützung und Geduld sowie darüberhinaus für die sorgfältige und kritische Durchsicht des Manuskriptes möchte ich an dieser Stelle einfach „Danke“ sagen.

Schließlich geht das größte Dankeschön an meine Familie, insbesondere an meine Eltern Elvi & Kalle. Ihr habt mich auf meinem Lebensweg stets unterstützt, für den notwendigen privaten Rückhalt gesorgt und überhaupt erst die Möglichkeit gegeben ein Studium aufzunehmen. „Danke“ für Eure Liebe, Eure Unterstützung und dass Ihr einfach immer für mich da seid.

Hannover, im September 2007

Tino Schonert

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Gegenwärtiger Stand . . . 2
1.2 Zielsetzung . . . 5
1.3 Gliederung . . . 6

2 Grundlagen **9**
2.1 Überblick hydro-ökologischer Modellansätze . . . 12
2.1.1 Grundgleichungen der Hydrodynamik . . . 12
2.1.2 Morphodynamische Grundlagen . . . 14
2.1.3 Beschreibung ökologischer Vorgänge . . . 17
2.2 Simulation hydro-ökologischer Prozesse . . . 20
2.2.1 Kontinuierliche Systeme . . . 20
2.2.2 Zelluläre Automaten . . . 23
2.3 Fazit . . . 27

3 Fuzzy-basierte Modellansätze **29**
3.1 Fuzzy-Theorie . . . 30
3.1.1 Klassische Mengen . . . 30
3.1.2 Fuzzy-Mengen . . . 32
3.1.3 Vergleichbarkeit von Fuzzy-Mengen . . . 33
3.1.4 Verknüpfung von Fuzzy-Mengen . . . 33
3.1.5 Fuzzy-Relationen . . . 35
3.1.6 Erweiterungsprinzip . . . 38
3.2 Fuzzy-Logik . . . 39
3.2.1 Fuzzy-Aussagen . . . 40
3.2.2 Logische Operatoren . . . 40
3.2.3 Approximatives Schließen . . . 41
3.3 Fuzzy-Modellierung . . . 42
3.3.1 Linguistische Variablen . . . 42
3.3.2 Fuzzifizierung . . . 44

3.3.3 Regelbasierte Modellbeschreibung 44
3.3.4 Regelanwendung 45
3.3.5 Defuzzifizierung 46
3.4 Dynamische Fuzzy-Modelle 49
3.4.1 Zeit-Diskrete Simulation 50
3.4.2 Kontinuierliche Simulation 52
3.5 Fazit 56

4 Modellierung hydro-ökologischer Prozesse 59
4.1 Grundlegende Prozesse 61
4.1.1 Meteorologische Prozesse 61
4.1.2 Biochemische Prozesse 63
4.2 Beschreibung physikalischer Prozesse 67
4.2.1 Hydrodynamisches Modell 68
4.2.2 Wellen- und Seegangsmodell 70
4.2.3 Morphodynamisches Modell 71
4.2.4 Temperatur- und Salztransport 73
4.3 Modellierung ökologischer Prozesse 75
4.3.1 Plankton-Modelle 77
4.3.2 Modellierung benthischer Ökosysteme 80
4.3.3 Fuzzy-basierter Modellansatz 82
4.4 Zusammenfassung 89

5 Numerische Approximation 91
5.1 Grundlagen 92
5.1.1 Zeitliche Diskretisierung 92
5.1.2 Räumliche Diskretisierung 92
5.2 Stabilisiertes finite Elemente Verfahren 93
5.2.1 Standard Galerkin Verfahren 96
5.2.2 Methode der kleinsten Quadrate 97
5.2.3 Galerkin-Least Squares Approximation 98
5.3 Zellbasiertes Fuzzy-Modell 100
5.3.1 Unscharfe Zustandsvariablen 101
5.3.2 Regelbasierte Zustandsübergänge 102
5.3.3 Gittergeometrien 103
5.3.4 Nachbarschaftsrelation 106
5.3.5 Randbedingungen 108
5.4 Fazit 109

6 Modellkopplung **111**
6.1 Geometrische Kopplung 112
6.1.1 Allgemeines Interpolationsproblem 113
6.1.2 Mapping unterschiedlicher Berechnungsgitter 113
6.1.3 Kopplung finiter Elemente mit zellbasierten Modellen 116
6.1.4 Kopplung zwischen Zellgitter und FE-Diskretisierung 122
6.1.5 Fazit 130
6.2 Fuzzifizierung und Defuzzifizierung der Systemgrößen 132
6.2.1 Fuzzifizierung stetiger Simulationsergebnisse 132
6.2.2 Defuzzifizierung quasi-diskreter Zustandsgrößen 133
6.3 Physikalisch-Phänomenologische Kopplung 134
6.3.1 Interaktion zwischen Bewuchs und Strömung 134
6.3.2 Bewuchsdichteabhängiger Reibungsansatz 136
6.3.3 Geschwindigkeits-Dichteabhängiger Reibungsansatz 136
6.3.4 Adaption sedimentologischer Parameter 137
6.4 Zeitliche Kopplung 139

7 Simulation **145**
7.1 Holistische Betrachtung und Interaktion hydro-ökologischer Prozesse 145
7.1.1 Seegang, Strömung und Transport 145
7.1.2 Transport- und reaktionsdominante ökologische Modellkomponenten 147
7.1.3 Simulation benthischer Ökosysteme auf der Basis fuzzy-ökologischer Modelle 149
7.2 Fuzzy-ökologische Modelluntersuchungen 150
7.3 Einfluss von Vegetationsgebieten auf Hydro- und Morphodynamik 157
7.3.1 Interaktion zwischen Bewuchs und Strömung 157
7.3.2 Morphodynamische Auswirkungen 159

8 Zusammenfassung und Ausblick **161**
8.1 Zusammenfassung 162
8.2 Zukünftige Erweiterungen 163