Universität der Bundeswehr München

Institut für Wasserwesen

Hydromechanik und Wasserbau

Mitteilungen

Heft 115 / 2012

An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics

Dr.-Ing. Denise Wehr

Hamburg 2012

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar

Mitteilungen / Institut für Wasserwesen; Heft 115

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Disse
Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert
Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek
Hydromechanik und Wasserbau

Institut für Wasserwesen
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
Tel: +49 (0)89/6004-3491
Fax: +49 (0)89/6004-4642
http://www.unibw.de/ifw/WWR

Satz: Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg

Copyright: Shaker Verlag, Aachen 2012
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany
Druck gefördert aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr München

ISBN 978-3-8440-0860-9

Shaker Verlag GmbH * Postfach 101818 * 52018 Aachen
Telefon : 02407 / 9596-0 * Telefax 02407 / 9596-9
Internet: www.shaker.de * E-Mail: info@shaker.de

An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades zum Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München

von Dipl.-Ing. Denise Wehr

Hamburg, Februar 2012

Vorwort / Preface

Durch die zunehmende Vertiefung der Bundeswasserstraßen im Küstenbereich hat sich in den Ästuaren eine erhebliche Verschlickung entwickelt, der nur mit sehr aufwendigen und kostspieligen Unterhaltungsmaßnamen entgegengewirkt werden kann. Vor allem die Tideems weist in großen Bereichen kein reines Meerwasser mehr auf, sondern führt eine so hohe Feststofffracht aus kohäsiven Sedimenten mit sich, dass trübe Flüssigschlicke gebildet werden. Zur Evaluierung von Lösungsstrategien für diese Problematik benötigt die wasserbauliche Systemanalyse Simulationsmodelle, mit denen man auch die Dynamik von Flüssigschlicken modellieren kann. Hierfür haben die Bundesanstalt für Wasserbau und das Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München das Projekt MudSim beim ‚Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen' (KFKI) des BMBF beantragt. Es beinhaltete
a) die Entwicklung eines rheologischen Modells für Flüssigschlicke aus rheometrischen Messungen am Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr und
b) die Entwicklung eines numerischen Modells zur Simulation der Flüssigschlickdynamik an der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg.
Die Untersuchungen des Teilprojekts MudSim-A haben gezeigt, dass es möglich ist, das Fließverhalten von Flüssigschlicken zu erklären und die Rheologie von Flüssigschlicken hinreichend genau zu parametrisieren. Dargestellt werden die Ergebnisse dieses Teilprojekts in den Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 111/2011. Die Ergebnisse der Modellentwicklung für die Simulation von Flüssigschlickdynamiken des Teilprojektes MudSim-B sind in der vorliegenden Schrift beschrieben.

In Ihrer hier vorliegenden Dissertationsschrift beschreibt Frau Dr.-Ing. Denise Wehr wie man die Flüssigschlickdynamik mit einem isopyknischen Ansatz diskretisieren kann. Frau Wehr konnte hiermit zeigen, dass es möglich ist, viele Details, wie z.B. die Ausbreitung von internen Wellen zu simulieren. Frau Dr.-Ing. Wehr hat damit einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zur integrierten Simulation eines Ästuars gesetzt, dessen Gezeitendynamik in weiten Bereichen durch turbulente Strömungen geprägt ist, in manchen Bereichen aber auch Flüssigschlickzonen aufweist.

München, im Februar 2012 Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek

Abstract

The progressive extension and development of coastal waterways has led to an increase in siltation and formation of fluid mud in sections of estuarine shipping channels, ports and port approaches over the past decades. The need for a better understanding and a profound knowledge of fluid mud dynamics has increased so that it is necessary to develop new maintenance strategies and renaturation measures in estuaries as well as optimize existing ones. Numerical simulations contribute to the evaluation of such strategies. For that reason, the aim of this thesis is to enable the numerical simulation of fluid mud dynamics.

Fluid mud forms by building up a structure of aggregates in regions in which there is an increasing accumulation of cohesive sediments. Although the water content of the high-concentration suspension can be very high, the flow behavior changes from Newtonian to non-Newtonian. However, most of the current established hydrodynamic numerical models solve the shallow water equations with a Newtonian assumption. A standard numerical model approach for the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations is therefore extended in this thesis to cover the simulation of non-Newtonian behavior. The developments are based on an existing numerical model in isopycnal coordinates. A vertical resolution by isopycnal layers - layers of constant density - is pursued as the flow can be strongly stratified in systems of high-concentration suspensions. In addition, sharp density gradients characterize the transitional area of fluid mud and water body. The isopycnal discretization enables a vertically resolved simulation of the velocity and density distribution inside the fluid mud body. The isopycnal layers interact due to momentum transfer, mass transfer and interfacial shear stresses. Advective and gravitational transport, mixing and settling of cohesive sediment suspensions are realized by changes in the isopycnal layer thicknesses as each layer represents a suspension with a specific sediment concentration. The vertical transport rates are determined by parameterizations of transport subprocesses and lead to variations in the layer thicknesses. The rheology of fluid mud is dominated by the break-up and recovery of the internal structure in response to shear impact (non-Newtonian behavior). A time- and space-dependent rheological viscosity is therefore introduced into the internal stress terms for the simulation of the rheological behavior of fluid mud.

Applications to schematic and realistic model domains demonstrate the abilities and performance of the extended isopycnal numerical model for the simulation of fluid mud dynamics such as simulation of fluid mud influenced by tidal currents.

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten hat der fortschreitende Ausbau von Seeschifffahrtsstraßen zu einer Zunahme der Verschlickung und Entstehung von Flüssigschlick in Bereichen der ästuarinen Schifffahrtstraßen, Häfen und Hafeneinfahrten geführt. Der Bedarf an fundierten Kenntnissen über die Flüssigschlickdynamik wächst, um neue Unterhaltungsstrategien und Renaturierungsmaßnahmen in Ästuaren zu entwickeln und bestehende zu optimieren. Numerische Modelle dienen als Werkzeug zur Beurteilung dieser Strategien und Maßnahmen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher, die numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlick zu ermöglichen.
Flüssigschlick entsteht in Bereichen erhöhter Akkumulation von kohäsiven Sedimenten. Diese bilden Aggregate und führen zum Aufbau einer inneren Struktur, mit der sich das Fließverhalten der hochkonzentrierten Schlicksuspension von Newtonschen zu nicht-Newtonschen Verhalten verändert. Die derzeit etablierten hydrodynamischen Modelle lösen die Flachwassergleichungen unter der Annahme eines Newtonschen Fluides. In der vorliegenden Arbeit wird daher ein herkömmliches numerisches Verfahren für die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen für die Simulation von nicht-Newtonschen Verhalten erweitert.

Die Entwicklungen für die Simulation der Flüssigschlickdynamik bauen auf einem bestehenden isopyknischen numerischen Modell auf. Eine vertikale Auflösung durch Isopyknen - Schichten gleicher Dichte - ist in dieser Arbeit eingesetzt worden, um stark geschichtete Strömungen in Gewässern mit hochkonzentrierten Suspensionen zu realisieren. Insbesondere die Grenzschicht zwischen Flüssigschlick- und Wasserkörper ist durch einen ausgeprägten Dichtesprung gekennzeichnet. Die isopyknische Diskretisierung ermöglicht die Dichte- und Strömungsverteilung im Flüssigschlickkörper vertikal aufzulösen. Die isopyknischen Schichten interagieren durch Impulsaustausch, Massenaustausch und Schubspannungen an den Grenzflächen. Jede Isopykne repräsentiert eine Suspension mit entsprechender Sedimentkonzentration. Advektion und gravitationeller Transport, Durchmischung und Absetzen kohäsiver Schwebstoffsuspensionen wird durch Änderungen der Schichtdicke der Isopyknen realisiert. Die vertikalen Transportraten zwischen den isopyknischen Schichten werden durch Parametrisierungen der Transportteilprozesse bestimmt. Die Rheologie von Flüssigschlick wird durch Aufbrechen und Neubildung der internen Struktur in Reaktion auf einwirkende Scherkräfte dominiert (nicht-Newtonsches Verhalten). Das rheologische Verhalten wird im numerischen Modell durch eine zeit- und ortsabhängige rheologische Viskosität umgesetzt, die in den Termen der inneren Spannungen der Impulsgleichung berücksichtigt wird.

Anwendungen auf schematische und realistische Modellgebiete verdeutlichen die Möglichkeiten und Leistungsfähigkeit des weiterentwickelten isopyknischen numerischen Modells für die Simulation der Flüssigschlickdynamik. Weiterhin zeigen die Modellanwen-

dungen, dass die Entwicklung von Flüssigschlick im tidebeeinflussten System mit diesem Modellverfahren simuliert werden kann.

Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation:	An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics
Verfasser:	Denise Wehr
Promotionsausschuss:	
Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Thomas Apel Universität der Bundeswehr München Institut für Mathematik und Bauinformatik Professur für Mathematik
1. Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Malcherek Universität der Bundeswehr München Institut für Wasserwesen Professur für Hydromechanik und Wasserbau
2. Berichterstatter:	Prof. Ordinario Vincenzo Casulli University of Trento Department of Civil and Environmental Engineering
Tag der Einreichung:	24.10.2011
Tag der Prüfung:	19.01.2012
Mit der Prüfung erlangter akademischer Grad:	Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Danksagung / Acknowledgment

Diese Arbeit entstand während der Bearbeitung des KFKI-Forschungsvorhabens *MudSim-B - Numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlick* (Förderkennzeichen: 03 KIS 067), welches durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Die Untersuchungen zu dieser Arbeit habe ich an der Bundesanstalt für Wasserbau - Abteilung Wasserbau im Küstenbereich - in Hamburg und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Großer Dank gilt daher Herrn Prof. Dr.-Ing Andreas Malcherek und Herrn Dr.-Ing Harro Heyer für die Initiierung und Anregung zu dieser Forschungsarbeit.

Besonders bei meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing Andreas Malcherek, möchte ich mich herzlich bedanken für die konstruktiven, motivierenden Diskussionen und der ansteckenden Freude an immer wieder neuen Forschungsaspekten, für die hilfreichen Hinweise im richtigen Moment und für die vielen spontanen Gespräche, die trotz der Entfernung Hamburg-München immer möglich waren.

I would like to thank my second supervisor, Prof. Vincenzo Casulli, for many inspiring and valuable discussions on isopycnals, for providing the hydrodynamic isopycnal code on which I could base my work on, and for the time I could spend in Trento for my research work. I always returned to Hamburg with new ideas and good advices for my work.

Bei Prof. Dr. rer. nat. Thomas Apel bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses für meine Promotion.

Herrn Dr.-Ing Harro Heyer und Herrn Holger Rahlf bin ich dankbar für den Freiraum zum Forschen, der es mir ermöglicht hat in einem erfahrenen Kollegenkreis und in einer technisch hervorragend ausgestatteten Umgebung promovieren zu können.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Günther Lang für die Betreuung meiner Arbeit in der BAW, die Unterstützung, die vielen hilfreichen Gespräche und wertvollen Anregungen.
Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Holger Weilbeer für die Unterstützung und ideenreichen, motivierenden Gespräche.

Meinen Kollegen Ingrid Holzwarth, Frank Kösters, Holger Weilbeer und Günther Lang danke ich für das Lesen von Abschnitten meiner Arbeit und für die hilfreichen Anmerkungen.

Meinem Münchener Kollegen und MudSim-Projektpartner Hanno Cha danke ich für die gute und produktive Zusammenarbeit.

Dank gilt auch meiner engagierten *Tecplotterin* und studentischen Hilfskraft Johanna Scharnhorst.

Vielen Dank an meine Kollegen in der BAW und in der UniBw München: es macht einfach Spaß mit so tollen Kollegen zusammenzuarbeiten.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mich auf meinem Ausbildungsweg in allen meinen Entscheidungen unterstützt haben und mich ermutigt haben neue Wege zu gehen.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Mann Andres für den Rückhalt, die notwendige Ablenkung und seine einfach großartige Unterstützung.

Hamburg, im Februar 2012 Denise Wehr, geb. Knoch

Contents

1 Introduction **1**

1.1 Motivation and Objectives 1

1.2 Motivation und Zielsetzung 3

2 Properties, Processes and Mathematical Description of Fluid Mud Dynamics **7**

2.1 Fluid Mud Properties 7

2.2 Rheology of Suspensions 9

2.2.1 Introduction to Rheology 9

2.2.2 Fluid Flow Behavior 9

2.2.3 Rheological Characteristics of Suspensions 10

2.2.4 Rheological Behavior of Fluid Mud 12

2.3 Fluid Mud Dynamics 13

2.3.1 Formation of Fluid Mud 13

2.3.2 Horizontal Transport Processes of Fluid Mud 15

2.3.3 Vertical Transport Processes of Fluid Mud 16

2.3.4 Fluid Mud Dynamics under Tidal Flow 20

2.4 Mathematical Description of Fluid Movement 23

2.4.1 Basic Equations of Motion - Cauchy's Equations of Motion . . 23

2.4.2 Decomposition of Motion 25

2.4.3 The Total Stress Tensor 26

2.4.4 Internal Stress Tensor of a Newtonian Incompressible Fluid . . . 27

2.4.5 Internal Stress Tensor of a Non-Newtonian Fluid 28

2.5 Outline of Numerical Methods for the Simulation of Fluid Mud 29

2.5.1 Evaluation of the Numerical Methods 31

3 Conceptual Model **33**

3.1 Basic Concept and Properties of the Model 33

3.2 Vertical Resolution due to Isopycnals 35

3.3 Approximation for the Internal Stresses for High-concentrated Mud Suspensions 37

3.4 Rheological Approach for Mud Suspensions 39

3.4.1 Rheological Measurement of Fluid Mud Samples 41

3.4.2 Parameterization of the Worrall-Tuliani Model for Mud Suspensions 43

3.5 Rheological Viscosity in Three-dimensional Flow 47

3.6 Mobilization of Mud Suspensions 52

3.7 Settling of Mud Suspensions 59

4 The Isopycnal Numerical Model 61

4.1 Governing Equations of the Three-dimensional Isopycnal Model 62

4.2 One-dimensional Isopycnal Model Vertically Resolved by ϱ-layers 65

4.2.1 Numerical Approximation 67

4.2.2 Solution Algorithm 69

4.3 Diapycnal Mass Transfer 72

4.3.1 Basic Explicit Approach for Mass and Volume Balancing 73

4.4 Properties of the Numerical Method 75

5 Model Verification and Performance 79

5.1 Interfacial internal Waves 79

5.2 Vertical Mass Transfer in a Sedimentation Tank 83

5.3 Flow over a Ground Sill 86

5.4 Fluid Mud Movement on an Inclined Plane 98

6 Application to the Ems Estuary 103

6.1 Model Section from Rhede to Herbrum 105

6.2 Model of Emden Harbor 127

7 Conclusions and Perspective 139

Appendices 147

A 3D Unstructured Isopycnal Model with Combined Vertical Discretization of z-layers and ϱ-layers **147**

A.1 Governing Equations 147

A.2 Numerical Approximation 150

A.2.1 Momentum Equation 152

A.2.2 Free Surface Equation 154

A.3 Solution Algorithm 156

A.3.1 Momentum Equation in Matrix Notation 156

A.3.2 Free Surface Equation in Matrix Notation 162

A.3.3 Substitution 162

A.3.4 Vertical Velocity 163

A.3.5 Time Step Limitation 164

A.4 Properties of the Numerical Method 165

B General Solution for Diapycnal Mass Transfer **167**

Nomenclature **173**

References **181**