Lehrstuhl und Institut
für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

160

Herausgeber: Univ.-Professor Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

Mitteilungen

Paul Kamrath

Über die gekoppelte 1D- und 2D-Modellierung von Fließgewässern und Überflutungsflächen

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2009)

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 978-3-8322-9499-1
ISSN 1437-8477

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

"In der Wissenschaft gleichen wir alle nur den Kindern, die am Rande des Wissens hier und da einen Kiesel aufheben, während sich der weite Ozean des Unbekannten vor unseren Augen erstreckt" – Isaac Newton.

Und dennoch: Wie froh bin ich, dass ich einen Kiesel finden durfte. Und wenn ich um eine Erkenntnis in der Zeit meiner Promotion reicher geworden bin, dann ist es die, dass genau hierin die Schwierigkeit liegt. Die Welt scheint weitgehend erforscht. Ist man aber einmal unter die Oberfläche getaucht wird deutlich, dass immer noch mehr Fragen unbeantwortet sind als beantwortet. Daran hat auch meine Arbeit nicht viel ändern können – aber sicherlich ein wenig. Mit dem Erscheinen meiner Forschungsergebnisse geht ein oftmals steiniger Weg zu Ende, der mich rückblickend mit Stolz und Zufriedenheit erfüllt.

Begleitet wurde meine Zeit als Assistent und Doktorand am Institut und Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen von glücklichen Umständen, netten Zufällen und der vielfältigen Unterstützung aus dem Kollegen- und Bekanntenkreis. Auch wenn es an dieser Stelle kaum möglich ist, jedem einzelnen zu danken, möchte ich aus dem Kreise der ehemaligen Kollegen zwei Personen namentlich erwähnen: Christoph Schweim, der mich als jungen Studenten an das IWW holte, und Sebastian Roger, der mir immer wieder geholfen hat, mit meinen teils tollkühnen Ideen nicht die Bodenhaftung zu verlieren.

Für sein Vertrauen, interessante Diskussionen diesseits und abseits des gemeinsamen Fachgebietes und die Übernahme des Hauptreferats danke ich Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. Jürgen Köngeter. Ich bedanke mich bei Universitätsprofessor Dr.-Ing. Markus Disse und Universitätsprofessor Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf für die jeweilige Übernahme des Koreferats. Ersterem verdanke ich die Grundidee zur vorliegenden Arbeit. Letzterem danke ich zusätzlich für die Herausgabe des Buches in der Mitteilungsreihe des Instituts.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie: Meinen Eltern; meinen Söhnen Paul und Max, die immer wieder auf ihren Vater verzichten mussten; meiner Tochter Clara, die nicht glauben kann, dass ich Doktor und doch kein Arzt bin - und meiner Frau Stefanie. Ohne ihre Geduld, ihre Liebe und ihr Verständnis wäre diese Arbeit wahrscheinlich nie fertig gestellt worden.

Dortmund, im August 2010 Paul Kamrath

Abstract

On the coupled 1D and 2D modelling of rivers and attached flood-areas

Experiences from recent flooding events dramatically illustrated limitations of existing flood protection and pointed toward the necessity for more sophisticated preventive technology. To date the design flood concept does not offer comprehensive protection. With growing size of critical river sections and the subsequent need to document the effectiveness of protective measures and possibly resulting damage, required time and costs for each simulated variable rise significantly. Demands for more efficient computational solutions fulfilling the complex requirements of the flood protection exist.

Algorithms developed in the late 20th century on basis of the Reynolds equations are only limited suitable to consider all aspects of flood protection. Within limits of one-dimensional models additional assumptions (e.g. the neglect of local acceleration in relation to the gravitation) were applied, to simulate the typical characteristics of flood events (long periods and large spatial expansion) in times of insufficient computation capacity. However, one dimensional models fail as predictive tool, when flooding beyond river banks is considered. To day two-dimensional models are still too complex and generally not applicable for near real-time mathematical simulations. An alternative solution is presented in this thesis. One- and two-dimensional approaches are combined to an effective flood protection simulation system.

Any forecasting of the impacts of floods has to balance accuracy and efficiency. The complexity of models available today ranges from simply intersecting a plane representing the water surface with a Digital Elevation Model up to the full solutions of the Navier-Stokes equations. Techniques that apply two-dimensional, depth-averaged solutions of the Navier-Stokes equations increase computational time and costs and are generally not realistically applicable for near real-time purposes. However, the sophistication of flood inundation modelling has increased in parallel with model developments and increased computational resources. However, it remains an open question, if simpler more cost and time efficient models provide similar levels of predictive accuracy. Hybrid models change handling characteristics due to the scale problem and the difficulties of analyzing extreme flood events in large catchment areas. The simplification into a one- and two-dimensional simulation section increases the efficiency of the whole model, such that complex systems can be examined more rapidly and in greater detail. Coupled 1D-2D models permit high scenario numbers. They extend the possible application of modern, risk-oriented flood forecasting and prevention efforts. Apart from the coupling of different partial models to an overall integrated system, the presented method uses consistent simplifications of the flow equations out (diffusive wave theory).

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Indizes

$\square_x$	skalare Komponente in X-Richtung
$\square_y$	skalare Komponente in Y-Richtung
$\square_z$	skalare Komponente in Z-Richtung
$\overline{\square}$	zeitliche Mittelung
$\square_0$	Wert bei stationären Bedingungen, Anfangswert
$\square_i$	Laufindex: i = x, y, z oder i, j, k; Es gilt die Einsteinsche Summenkonvention
$\square_i^n$	Wert am Punkt i zum Zeitpunkt n
$\square^*$	Schätzgröße
1D	eindimensionale Größe
2D	zweidimensionale Größe
RB	Randbedingung

Formelzeichen

d	absolute Ableitung d/dt
∂	partielle Ableitung
f(x)	mathematische Funktion
g(x)	Quellterm
HOT	Terme höherer Ableitung, „higher order terms“
Im(x)	Imaginärteil einer Zahl
J	Jakobimatrix
M	Maximalwert
P	Punkt
p_k	Interpolationspolynom
Re(x)	Realteil einer Zahl
x, y	Koordinatenrichtung
$\tilde{x}, \tilde{y}$	normierte Koordinatenrichtung
ϕ	Funktion
$\lambda_\square$	Eigenwert einer Matrix
y_0	Anfangswert einer Differentialgleichung
$y', y'' \ldots y^{(n)}$	erste, zweite, *n*-te Ableitung (i. A. räumlich)
$\dot{y}, \ddot{y}$	erste, zweite Ableitung (i. A. zeitlich)
$\vec{\square}$	Vektor
$\overline{\overline{\square}}$	Matrix
$\vee$	logisches oder

Dimensionslose lateinische Zeichen und Symbole

c_Q	-	Begrenzungsfaktor für den Streichwehrabfluss
c_f	-	Reibungskoeffizient
c_M	-	empirischer Parameter zur Berücksichtigung der Weiterentwicklung der Computertechnik in der Skalentheorie
Cu	-	Courantzahl
Fr	-	Froudezahl
$G_{N,Gesamt}$	-	Abbildungsähnlichkeit eines gekoppelten Modells
G_i	-	Abbildungsähnlichkeit eines Teilmodells
h-, h+	-	Hilfspunkte des Nachbarschaftsverfahrens
k	-	allgemeiner Reibungskoeffizient, Gültigkeitsparameter der kinematischen Wellentheorie
T_+	-	dimensionslose Periodendauer

Lateinische Zeichen

A	m²	Fläche
$\bar{A}$	m²	Fläche des linken / rechten Vorlands / des Hauptgerinnes
b	m	Breite
b_E	m	Einflussbreite
b_{Br}	m	Breite einer Deichbruchstelle
b_{Vl}	m	Breite des Vorlandes
c	m/s	Wellenausbreitungsfaktor
C	$m^{1/2}/s$	de Chezy Rauheit
g	m²/s	Erdschwere
h	m	Fließtiefe
$h_ü$	m	Überfallhöhe (Poleniformel)
H	mNN	Wasserspiegellage h + z
I, S_0	1/m	Sohlgefälle
k_s	m	äquivalente Sandrauheit
k_{st}	$m^{1/3}/s$	Stricklerbeiwert
K(h)	m³/s	Fließtiefenabhängige, geometrische Profilparameter
L_m	m	Längeneinheit des Skalentriplet
$L_{i,j}$	m	Abstand zwischen zwei Querprofilen
l_u	m	benetzter Umfang
n	$s/m^{1/3}$	Manningparameter
Q	m^3/s	Durchfluss
Q_p	m³/s	Quellterm in den Strömungsgleichungen
q_x, q_y	m²/s	breitenbezogener Durchfluss
r_{hy}	m	hydraulischer Radius

S_f, S_{fx}, S_{fy}	kg/(m s²)	Schubspannungsterme (Reibungsterme)
T	s	Zeit, Periodendauer
u, v, w	m/s	Geschwindigkeit in der Raumrichtung x, y oder z
$\overline{u}, \overline{v}$	m/s	zeitlich gemittelte Geschwindigkeit
u_τ	m/s	Schubspannungsgeschwindigkeit
V	m³	Volumen
v_x, v_y, v_z; v_i	m/s	Geschwindigkeit in der Raumrichtung x, y oder z
Wsp	mNN	Wasserspiegellage
z	mNN	Sohllage

Griechische Symbole

α_i, β_i	var.	Empirische Konstanten
α_m	-	konstanter Koeffizient der Ortsdiskretisierung
$\alpha_{N, Gesamt}$	-	Faktor zur Genauigkeitssteigerung eines Modells
β	-	Adams-Moulton / Adams-Bashforth Parameter, Quotient aus Einflussbreite und Bruchstellenbreite
γ	-	Adams-Moulton / Adams-Bashforth Parameter
Δt	s	Zeitschritt
λ	-	Rauheitsparameter nach Colebrook / White
ν	m²/s	Physikalische Diffusion als Funktion der Fließgeschwindigkeit
δ_S	-	Schwellenwert
ε	-	Absolute Größenveränderung der Sinusfunktion, allgemeiner Modellparameter
ε_a	-	Abbruchfehler der Ortsdiskretisierung
Γ	-	Diffusionskoeffizient der Advektions-Diffusionsgleichung
μ	-	Abminderungsfaktor nach Poleni
η	-	Verhältnis Vorland- / Hauptgerinnebreite
ρ	kg/m³	Dichte eines Fluids
σ_{St}	-	Abminderungsfaktor der Streichwehrformel
$\tau_{\square, zb}$	N/m²	Sohlschubspannung
τ_{xx}, τ_{yy}, τ_{xy}	N/m²	Turbulente Spannungstensoren
ω	1/min	Frequenz
ω	-	Parameter der Ersatzfunktion
ω_+	-	Dimensionslose Frequenz
ξ	-	Parameter der Deichbruchformel, Parameter der Ersatzfunktion

Verzeichnis der Abbildungen

Verzeichnis der Tabellen