

Flussgebietsmodellierung mit Mike Flood – Theorie bis Praxis

Ole Larsen, Elimar Precht, Morten Rungø, Kim Wium Olesen

Zusammenfassung

Die Anforderungen an die Genauigkeit und die Detailliertheit von Hochwassermodellierungen haben im letzten Jahrzehnt deutlich zugenommen. 2-dimensionale Modellierungen von Hochwässern in städtischen Gebieten und Auen sind zudem heute üblicher. 2-dimensionale Modelle sind jedoch nicht immer praktikabel, wenn es um die Modellierung längerer Flussabschnitte geht, da derartige Simulationen Tage oder Wochen an Rechenzeit in Anspruch nehmen können. Zudem erlauben 2-dimensionale Modelle nicht immer eine genaue und effiziente Modellierung schmaler Flussläufe, Gräben, Kanäle oder Wehre und anderer wasserbaulicher Strukturen. Derartige Drainagewerke können zumeist besser in 1-dimensionalen Modellen simuliert werden. Das führte zur Entwicklung von MIKE Flood, welches 1-dimensionale und 2-dimensionale Hochwassermodellierung kombiniert. Dieses geschieht durch eine dynamische Kopplung von MIKE 11 und MIKE 21, in der beide Modellwerkzeuge simultan mit an jedem Zeitschritt berechnetem Austausch der Abflüsse zwischen beiden Domänen laufen.

In den letzten Jahren wurde MIKE 21 weiterentwickelt, um es in der Auenmodellierung anwendbar zu machen. Die Entwicklungen hatten das Ziel, die Überschwemmungs- und Trocknungsroutrinen des Modells robuster zu machen und die Fähigkeiten von MIKE 21, Strömungen bei hohen Froude-Zahlen zu modellieren, zu erweitern. Diese Verbesserungen erlauben realistische Simulationen der Ausbreitung von Hochwasserwellen über initial trockene Sohlen und einer Anzahl weiterer Strömungen bei hohen Froude-Zahlen wie z.B. superkritische Strömung, Strömung über breitkammige Wehre, hydraulischen Sprüngen und selbst Strömungen bei Damnbrüchen.

Stichworte: Hochwassermodellierung, Modellkopplung

1 Einleitung

Mit heute stetig zunehmender Nutzung und Investitionen in hochwassergefährdeten Gebieten nimmt der Bedarf an Simulationen von Überschwemmungen in diesen Gebieten zu. Dieses betrifft sowohl die Anzahl der Anwendungen als auch die Erwartungen an die Genauigkeit der Vorhersagen. Moderne Hochwassermodellierung in der Fläche kann die Vorhersage von Überschwemmungsflächen in komplexen städtischen Gebieten mit Kanälen, Tunneln oder Straßen zusätzlich zu den natürlichen Marschen und Ebenen, die Strömungswege und Hochwasserwellenausbreitung bestimmen können, umfassen. Dieses impliziert strenge Anforderungen an die räumliche Auflösung und Genauigkeit.

Dadurch wird die dynamische Modellierung von Hochwasserwellen und -ereignissen in ökonomisch vertretbarer Weise zu einer heiklen Aufgabe, die gleichzeitig eine genaue Darstellung schmaler Querschnitte zur präzisen Beschreibung der Abflüsse, wie auch akkurate Darstellungen der komplexen Strömungsverhältnisse auf den Überschwemmungsflächen, erfordert.

Es gibt zwei direkte Ansätze: Darstellung der Domäne als ein Netzwerk 1-dimensionaler Gerinne oder eine Darstellung, in der die räumlichen Variationen in einem 2-dimensionalen Gitter oder Netz aufgelöst werden.

Der Vorteil der 1D-Netzwerk-Modelle ist, dass sie sehr präzise Beschreibungen der Querschnitte liefern und nur das Gefälle flussabwärts lösen müssen. Die Modelle bestehen daher aus verknüpften 1D-Abschnitten, die sehr effiziente Lösungsmethoden erlauben. Flußnetzwerkmodelle können demzufolge heute sehr komplex sein und aus einem komplizierten Netz miteinander verknüpfter Gerinne bestehen, die praktisch eine 2-dimensionale horizontale Darstellung liefern. Das 1D-Modell kann weiterhin mit hydraulischen Theorien für Strömung durch z.B. Kanäle oder Tore kombiniert werden, wodurch eine hinreichend genaue Beschreibung in stark regulierten Gebieten möglich wird. Ein Nachteil dieser Methodik ist, dass die Strömungswege im voraus festgelegt werden müssen, eine Darstellung, die nicht immer realistische Ergebnisse liefert, z.B. in relativ flachen Gebieten mit sehr variablen Wasserständen. Hinzu kommt, dass ein 1D-Modell keine Details zu den Geschwindigkeitsverteilungen, zum Beispiel in Auen, liefern kann.

Der Vorteil der 2D Modelle ist, dass sie die räumliche Verteilung der Strömung beschreiben und auf diese Weise eine allgemeinere Beschreibung der Strömung liefern können. Da die Modelle jedoch versuchen, die räumlichen Variationen

aufzulösen, benötigen sie eine relativ zur Auflösung glatte Bathymetrie. Dadurch wird es schwierig, kleinere Eigenheiten korrekt zu repräsentieren, da dieses eine Vielzahl Berechnungspunkte erforderlich machte. Die Verwendung unstrukturierter Netze hat die Möglichkeiten erweitert, jedoch kann es unter realistischen Bedingungen immer noch zu kostenintensiv sein, eine ausreichende Auflösung zu erzeugen (Defina, 2000; Bates and Hervouet, 1999). Die Mehrzahl der verwandten 2-dimensionalen Modelle haben ihren Ursprung in Modellen, die für den ästuarinen und Küstenbereich entwickelt wurden. Daher müssen nicht alle diese Modelle zwangsläufig für die Anwendung in Auen bzw. urbanen Gebieten gut geeignet sein. Einer der Gründe hierfür ist, dass Küsten- und ästuarine Modelle nicht dafür entwickelt wurden, Strömungen mit hohen Froude-Zahlen oder superkritische Strömung zu berücksichtigen, wie sie unter Überschwemmungsbedingungen auftreten. Desweiteren können sie nicht die Überschwemmung ursprünglich trockenen Landes auf einer geneigten Überschwemmungsfläche modellieren.

Unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile beider Methoden erscheint es logisch, beide Methoden zu verknüpfen, und zwar derart, dass in Gebieten mit wohldefinierten Strömungspfaden das 1D-Modell zur Anwendung kommt, während ausgedehntere Gebiete durch das 2D-Modell beschrieben werden. Es gibt viele Beispiele hierfür, sowohl in natürlichen Umgebungen wie z.B. Fluss-See-Systemen oder Flussdeltas als auch in regulierten städtischen Gebieten oder Auen.

Ziel dieses Artikels ist die Beschreibung der Entwicklung des dynamisch verknüpften 1D und 2D-Modell Systems MIKE Flood. Zunächst wird die numerische Methodik beschrieben, danach die Validität des Modells anhand zweier einfacher Beispiele demonstriert und zuletzt zwei Beispiele der Anwendung mit unterschiedlichen Schwerpunkten vorgestellt, die das Potential der Methode verdeutlichen

2 METHODIK

2.1 Das 1D Modell

Das eindimensionale Modell basiert auf den gemittelten querschnittsbezogenen Saint-Venant Gleichungen, die die Entwicklung des Wasserspiegels s und des Abflusses Q oder die gemittelte Fließgeschwindigkeit U beschreiben. Diese können für die Kontinuitätsgleichung formuliert werden:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = F_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha Q^2 / A) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

mit h = Wassertiefe, Q = Abfluss, α = Geschwindigkeitverteilungskoeffizient, x = Ortsvariable in Fließrichtung, t = Zeit, F_s als Zuflussterm, g = Erdbeschleunigung, C = Chézy Zahl, $A=f(h)$ = Durchströmte Querschnittsfläche des Gerinnes, $P=g(h)$ = benetzter Umfang, (beide in Abhängigkeit der Wassertiefe) und $R=A/P$ = hydraulischer Radius.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die numerische Lösung aus der Erarbeitung der finiten Differenzen der Gleichungen gewonnen wird. Dazu wird ein Schema verwandt, welches auf alternierenden Q und h Werten basiert (Abbott and Ionescu, 1967). Die Terme für die Schwerewellen (Gl. (1) und 1. und 3. Term in Gl. (2)) sind zeitzentriert, während die übrigen Terme rückwärtszentriert sind, wie in Abbildung 2 dargestellt.

2.2 Das 2D Modell

Das zweidimensionale Modell basiert auf den über die Tiefe gemittelten Saint-Venant Gleichungen, die die Entwicklung des Wasserspiegels s und zweier kartesischer Geschwindigkeitskomponenten U und V beschreiben. Diese können in vereinfachter Form formuliert werden:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}Uh + \frac{\partial}{\partial y}Vh = F_s \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \partial_x s \\ + \frac{g}{C^2 d} U \sqrt{U^2 + V^2} + \frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial U}{\partial y}) = F_s U_s \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \\ + g \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{g}{C^2 d} V \sqrt{U^2 + V^2} + \frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial V}{\partial y}) = F_s V_s \end{aligned} \quad (5)$$

mit s = Wasserspiegel, h = gesamte Wassertiefe, U und V = über die Tiefe gemittelte kartesische Geschwindigkeitskomponenten, C = Chézy Zahl, K_{xx} und K_{yy} = turbulente Viskosität, F_s als Zuflussterm und U_s und V_s = Geschwindigkeiten am Zufluss.

Die numerische Lösung wird aus der finiten Differenzform der Gleichungen mit Hilfe eines abgestuften C-Netzes und einem semi-impliziten, zweistufigen ADI Algorithmus, mit Zentrierung der Schwerewellenterme wie in Abb. 1 dargestellt. Durch Umformen des konvektiven und des Reibungsterms wird eine robuste und präzise Lösung erhalten (Abbott and Rasmussen, 1977). Dadurch wird eine effiziente Lösung möglich, die prinzipiell aus fortlaufenden line sweeps über die Domäne besteht.

Zwei Erweiterungen zu der numerischen Lösungsmethode sind wichtig für die hier vorliegende Anwendung, und zwar die Fähigkeit, Überflutung und Trocknung an Berechnungspunkten zu beschreiben und die Beschreibung der Ausbreitung von Hochwasserwellen über initial trockene oder sehr flache Gebiete.

Das Grundproblem mit trockenen Zellen, d.h. Zellen, in denen der Wasserstand auf oder unter Sohlenniveau fällt, wodurch ein bei Null liegender oder negativer Wert für die Wassertiefe geliefert wird, liegt in der Entwicklung von Methoden, die stabile und physikalische Lösungen liefern und die Masse erhalten. Verschiedene Methoden wurden dazu vorgeschlagen, wie z.B. kappen der Wassertiefe auf einen kleinen positiven Wert, künstlich erhöhten Reibungsbeiwerten für geringe Wassertiefen oder Implementierung von slots, in denen sich die Zellfläche vermindert, wenn der Wasserstand unter das Sohlenniveau fällt. McCowan *et al.* (2001) zeigten, dass die hier gezeigte Lösungsmethode, einer Modifikation des von Stelling *et al.* (1998) vorgeschlagenen Schemas, welche eine **rückwärts gerichtete** Diskretisierung der Wassertiefe in Kombination mit einem positiven und monotonem Modell für die Wassertiefe verwendet, angemessene Ergebnisse liefert.

Die Verwendung räumlich zentrierter Diskretisierung der konvektiven Ausdrücke liefert hohe Genauigkeiten der numerischen Lösung, beschränkt jedoch die Strömungen aus Stabilitätsgründen subkritisch zu sein, d.h., die Froude Zahl $F = U / \sqrt{gh}$ muss < 1 sein. Für Anwendungen im Küstenbereich stellt dieses normalerweise keine Einschränkung dar, aber bei Hochwasserwellen, die sich über trockene oder sehr flache Gebiete ausbreiten, kommen häufig kritische oder superkritische Strömungen vor. Abhilfe schaffen kann hier die Einbeziehung zusätzlicher Umwandlung kurzweiliger Wellenenergie entweder durch Einführung künstlicher turbulenter Viskosität oder numerischer Filter (Abbott, 1979) oder durch das numerische Schema von Lax (1954). Durch Einführung einer **rückwärts gerichteten** Gewichtung der konvektiven Terme konnten McCowan *et al.* (2001) zeigen, dass die hier verwandte Lösungsmethode auch für superkritische Strömungen stabil ist und

unnatürliche Schwankungen der Geschwindigkeiten und Wasserstände vermeidet. Die Wichtung wird basierend auf der lokalen Froude Zahl gewählt in der Art und Weise, dass für $F < 0.25$ ein zentriertes Modell verwandt wird, mit gradueller Steigerung bis $F > 1.0$, bei denen ein vollständig **rückwärts gerichtetes** Schema verwandt wird.

3 KOPPLUNG DES 1D UND 2D MODELLS

MIKE 11 und MIKE 21 können auf verschiedene Arten verknüpft werden, die im folgenden vorgestellt werden.

3.1 Standard Kopplung

Die Standard Kopplung in MIKE FLOOD ist die, in der eine oder mehrere MIKE 21 Zellen mit dem Ende eines MIKE 11 Zweigs verbunden ist. Diese Kopplung ist sinnvoll für die Einbettung eines detaillierten MIKE 21 Netzes in ein größeres MIKE 11 Netzwerk oder um eine interne Struktur oder Gegebenheit innerhalb eines MIKE 21 Netzes zu verbinden. Die Kopplung ist explizit um die Impulserhaltung über die Grenze zwischen MIKE 11 und MIKE 21 zu sichern. Mögliche Anwendungen zeigt Abbildung 1.

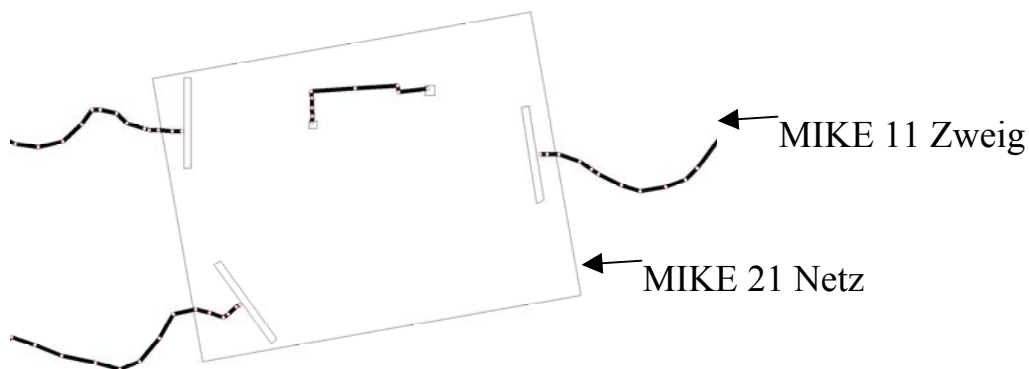


Abbildung 1 Anwendung einer Kopplung.

3.2 Laterale Kopplung

Eine laterale Kopplung erlaubt die laterale Verbindung einer Kette von MIKE 21 Zellen mit einer Strecke in MIKE 11, und zwar entweder eines Teil eines Zweigs oder eines gesamten Zweigs. Durchfluss über die laterale Verbindung wird entweder mit einer Strukturgleichung oder einer Q_H Tabelle berechnet. Dieser Kopplungstyp ist insbesondere zur Simulation des Überlaufs aus einem

Flusslauf in eine Aue nützlich, wobei der Fluss über die Flussdeiche mit einer Wehrgleichung berechnet wird (siehe Abbildung 2).

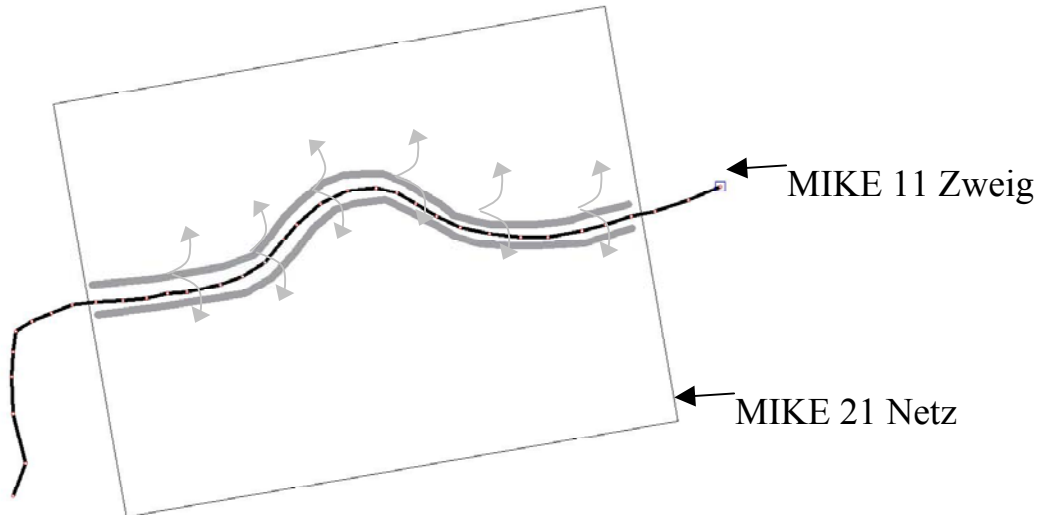
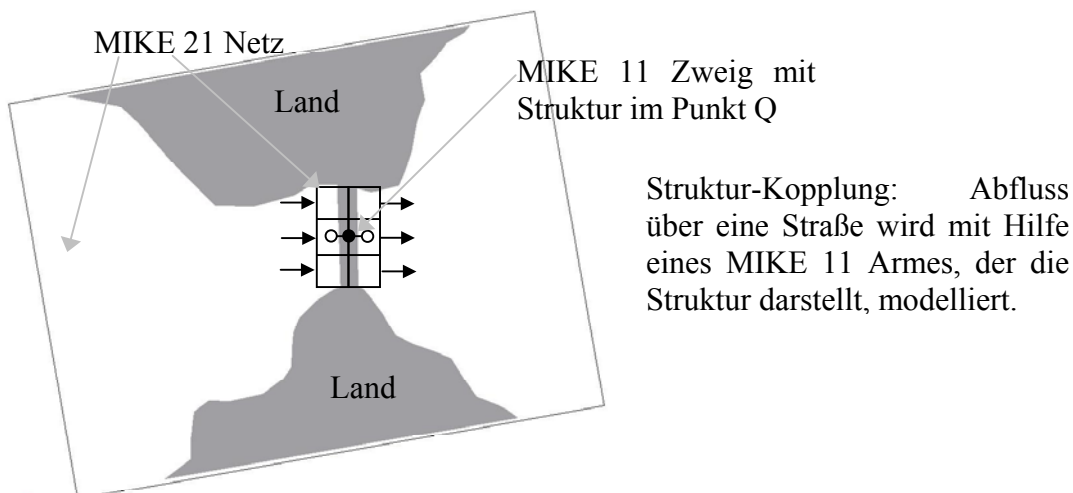


Abbildung 2 Anwendung einer lateralen Kopplung.

3.3 Struktur-Kopplung

Die Struktur-Kopplung entnimmt die Strömungsterme aus Strukturen in MIKE 11 und setzt diese direkt in die Momentengleichungen von MIKE 21 ein. Diese Verknüpfung ist vollständig implizit, wodurch die Zeitschrittbetrachtungen in MIKE 21 nicht beeinflusst werden.



Struktur-Kopplung: Abfluss über eine Straße wird mit Hilfe eines MIKE 11 Armes, der die Struktur darstellt, modelliert.

Abbildung 3 Anwendung einer Struktur-Verknüpfung.

Die Struktur-Kopplung ist für die Simulation von Strukturen innerhalb eines MIKE 21 Modells nützlich. Die Verknüpfung besteht aus einem MIKE 11 Arm mit 3 Punkten (Querschnitt oberhalb, Struktur, Querschnitt unterhalb), deren

Abflüsse auf Zellen oder Gruppen von Zellen in MIKE 21 angewandt werden. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel.

4 VALIDIERUNGSANWENDUNGEN

4.1 Impulserhaltung über die Standard-Kopplung

Um die numerischen Eigenschaften der Standard-Kopplung zwischen 1D und 2D-Modell zu untersuchen und überprüfen, wird ein einfacher aber anspruchsvoller Test mit einer stehenden Welle durchgeführt. Dieser Test simuliert die Entwicklung einer stehenden Welle in einem 8000 m langen gleichförmigen Kanal mit einer anfänglichen Tiefe von 2 m, einer Breite von 100 m und einem Sohlenwiderstand von $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Die stehende Welle entwickelt sich aus einer anfänglich sinusoidalen Störung auf der Wasseroberfläche. Der Kanal wird zur Hälfte mit einem 1D Modell aufgebaut, zur anderen Hälfte mit einem 2D Modell, welche durch die Standard-Kopplung verbunden sind.

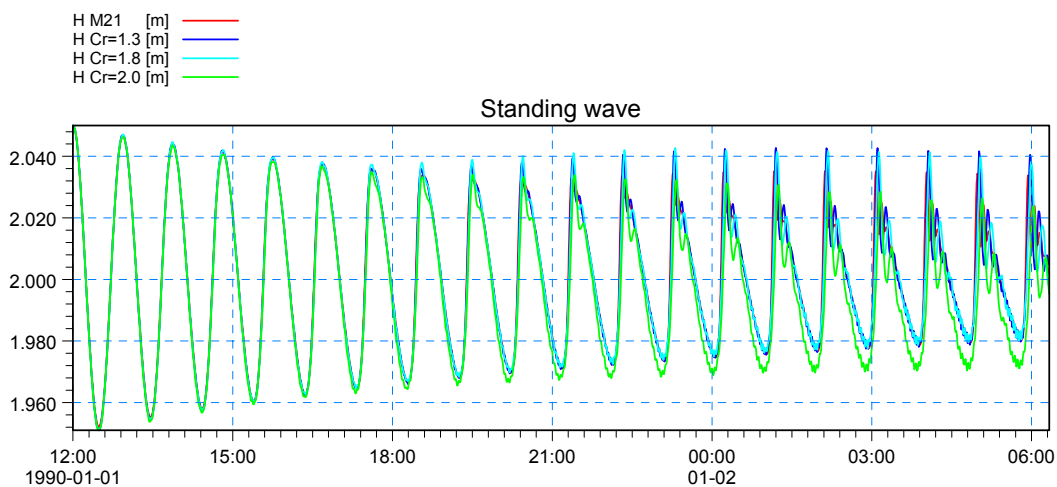


Abbildung 4 Wasserstände im Test mit stehender Welle unter Verwendung gekoppelter 1D und 2D Modelle für Courant Zahlen von 1.3 - 2.0. Die Referenz M21 wurde ausschließlich mit dem 2D Modell berechnet.

Abbildung 4 zeigt eine Zeitreihe des Wasserstandes am einen Ende des Kanals, die mit den gekoppelten Modellen und, zum Vergleich, mit einem 2D Aufbau, der den gesamten Kanal abdeckte, berechnet wurden. Die Zeitreihen für das gekoppelte Modell sind für unterschiedliche Zeitschritte dargestellt, die als Courant Zahlen $C_R = \Delta t / \Delta x \sqrt{gh}$ zwischen 1.3 und 2.0 angegeben sind. Ein

Vergleich der Zeitreihen zeigt, dass die Unterschiede zwischen gekoppeltem und vollem 2D Modell vernachlässigbar sind, was darauf hinweist, dass die Kopplung Masse wie Moment über die Verbindung mit ausreichender Genauigkeit überträgt. Für Courant Zahlen größer als 2.0 wird die Kopplung instabil, was widerspiegelt, dass die Kopplung explizit ist.

Im vorliegenden Beispiel liegt die akkumulierte Veränderung bei $C_R = 2$ im gemitteltem Wasserstand nach langer Modelllaufzeit bei weniger als 1×10^{-5} .

4.2 Ausbreitung einer Hochwasserwelle

Die Ausbreitung einer Hochwasserwelle über eine anfänglich trockene Sohle ist ein Schlüsselprozess bei der Modellierung von Strömung in natürlichen Überschwemmungsflächen, da es sowohl die Überschwemmung trockener Zellen und die Ausbreitung einer superkritischen Welle umfasst. Eine Reihe Labor-Experimente hierzu wurden von Soares and Zech (1998) mit einem L-förmigen Kanal mit Verbindung zu einem Reservoir durchgeführt (s. Abbildung 5

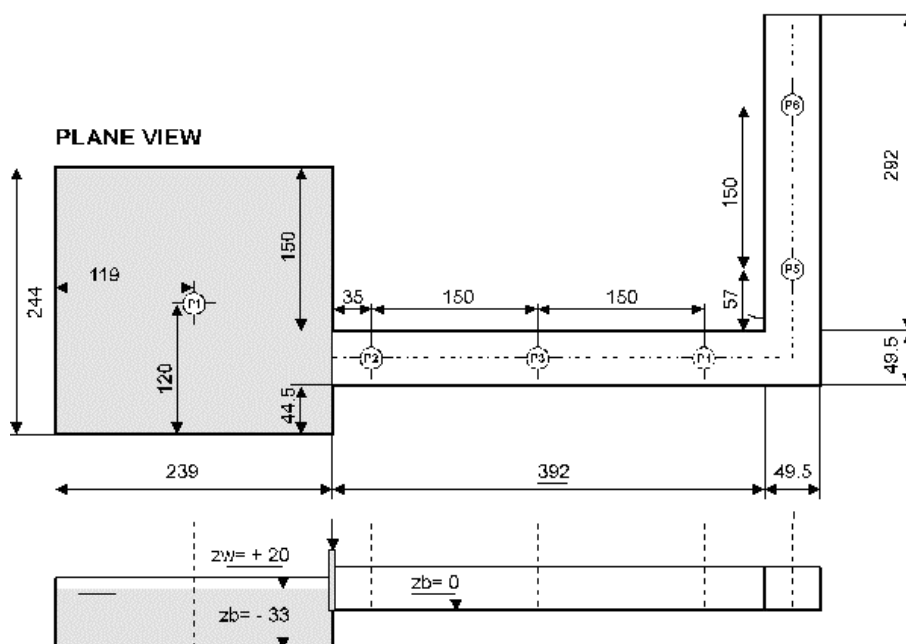


Abbildung 5 Übersicht über das Hochwasserwellenexperiment (Soares and Zech 1998).

Während des Experiments wird der Wasserstand an den sechs mit P markierten Stationen überwacht, wodurch die Hochwasserwelle, die durch Öffnen des Tores zum Reservoir entsteht, genau beschrieben wird. Das 2D Modellsetup deckt die Domäne mit 700 Punkten in einem 10 cm x 10 cm Netz ab. Der

Manning Koeffizient, bestimmt durch stationäre Strömungsexperimente liegt bei 0.0095 für die Sohle des Kanals.

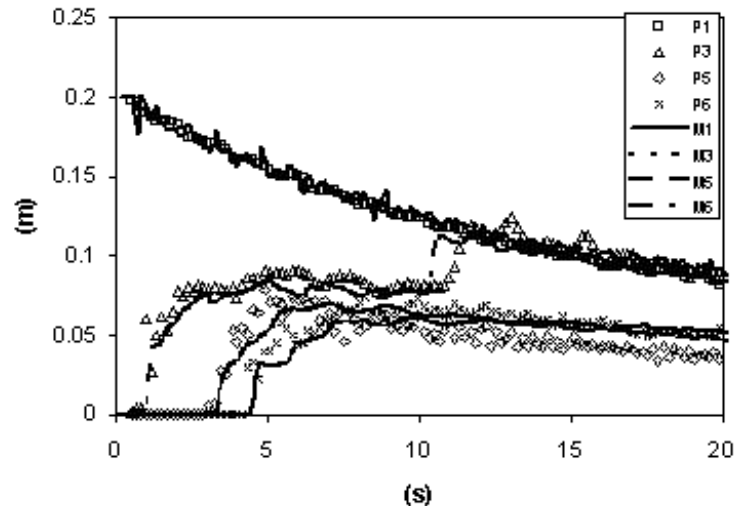


Abbildung 6 Beobachtete (P) und modellierte (M) Wasserstände hinter einer sich durch einen krümmenden ausbreitenden. Beobachtungen von Soares and Zech (1998).

Abbildung 6 zeigt einen Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Wasserständen an vier der sechs Stationen ohne turbulente Viskosität. Es ist erkennbar, dass die Ausbreitung der Wellenfront sehr gut reproduziert wird. Dies gilt auch für die nachfolgenden Schwankungen des Wasserstandes, mit Ausnahme von Station P5, für die das Modell höhere Werte als in den Beobachtungen ausgibt. Dieses könnte durch eine Rezirkulationszelle hinter der Biegung verursacht sein, die vermutlich in diesem über die Tiefe gemittelten Modell nicht ausreichend gut beschrieben wird. Desweiteren ist erkennbar, dass kleinere Abweichungen in den Reflexionen von den Seitenwänden existieren. Versuche mit einer zunächst trockenen Sohle und mit einem Wasserstand von 1 cm im Kanal kamen zu ähnlichen Ergebnissen.

5 5 PRAKTISCHE ANWENDUNGEN

5.1 Dambruch Modellierung

Das US Bureau of Reclamation (USBR) hat im vergangenen Jahrhundert eine große Anzahl von Staumauern vor allem in den westlichen USA gebaut. Zudem ist es verantwortlich für die Sicherheit vieler dieser Dämme. Erwägungen der Konsequenzen eines Dambruchs gehören ebenfalls zu den Aufgaben des USBR.

An vielen der Standorte lassen die Geometrien der Flüsse und der benachbarten Überflutungsflächen keine Überschwemmungskartierungen durch eindimensionale Modelle, die die Abflüsse nur in repräsentativen Querschnitten berücksichtigen, zu. Dieses ist insbesondere an sehr weiten und flachen oder sehr komplexen Querschnitten der Fall. In jedem Falle ist der das Strömungsmuster zweidimensional und sollte daher auch zweidimensional modelliert werden. Das USBR hat MIKE Flood zur Modellierung von Dammbürchen und Uferversagen mit derartig komplexen Geometrien als Werkzeug ausgewählt. Das zweidimensionale Modell erhält seinen Zustrom aus den Berechnungen eines eindimensionalen Dammbürchenmodells. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel einer Simulation einer Überflutung nach einem Dammbürchen.

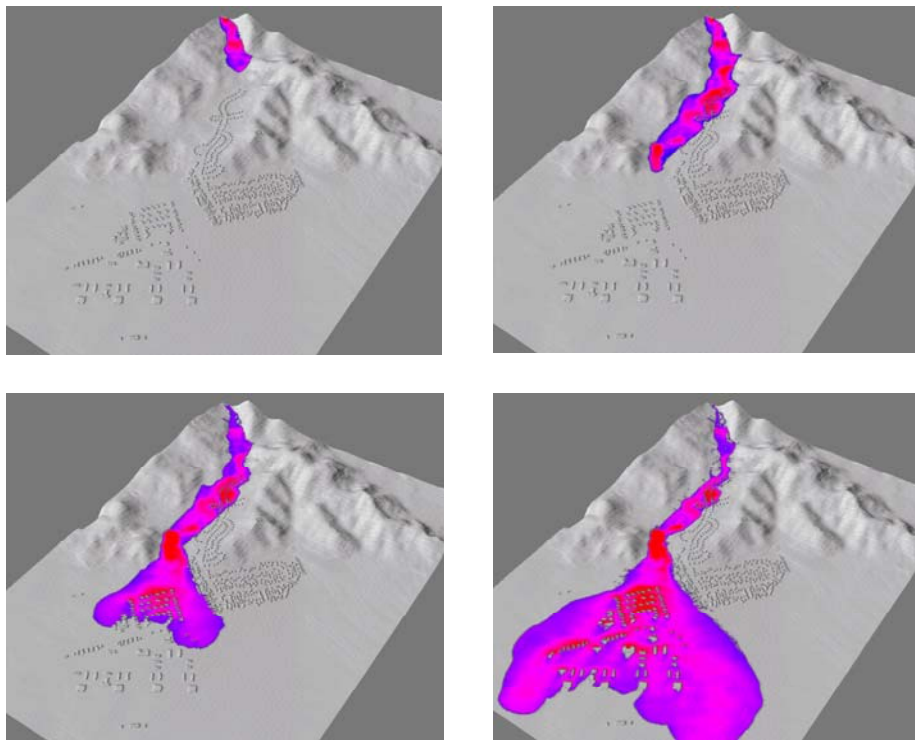


Abbildung 7 Überschwemmung nach einem Dammbürchen in vier verschiedenen Stadien, simuliert durch MIKE FLOOD (U.S Bureau of Reclamation).

5.2 Modellierung von Flüssen und Auen

Um die Möglichkeiten flutmildernder Maßnahmen entlang des Gumti in Bangladesh zu ermitteln, wurde ein MIKE Flood Modell aufgebaut. Das Untersuchungsgebiet umfasst den Gumti River und Überflutungsflächen entlang eines 40 km langen Abschnittes, der flussaufwärts bei Comilla beginnt und bei Daudkandi endet. Der Fluss hat an beiden Ufern Schutzwerke, die Hochwässer eindämmen.

Der Gumti durchquert für Bangladesh typisches flachliegendes Terrain. Die Überflutungsflächen sind nicht sehr deutlich vom Fluss abgegrenzt und sind stark bevölkert, vor allem im Süden.

Hochwassereignisse des Gumti können von sehr kurzer Dauer und sehr intensiv sein, was zu Sturzfluten führen kann. Diese schnell auftretenden Hochwässer in Kombination mit der Gefahr von Dammversagen können erhebliche materielle Schäden verursachen und Menschenleben gefährden. Daher besteht die Notwendigkeit, genaue Analysen vorgeschlagener hochwassermildernder Maßnahmen durchzuführen. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Modell-Domänen und ein Beispiel der Simulationsergebnisse des MIKE Flood Modells.

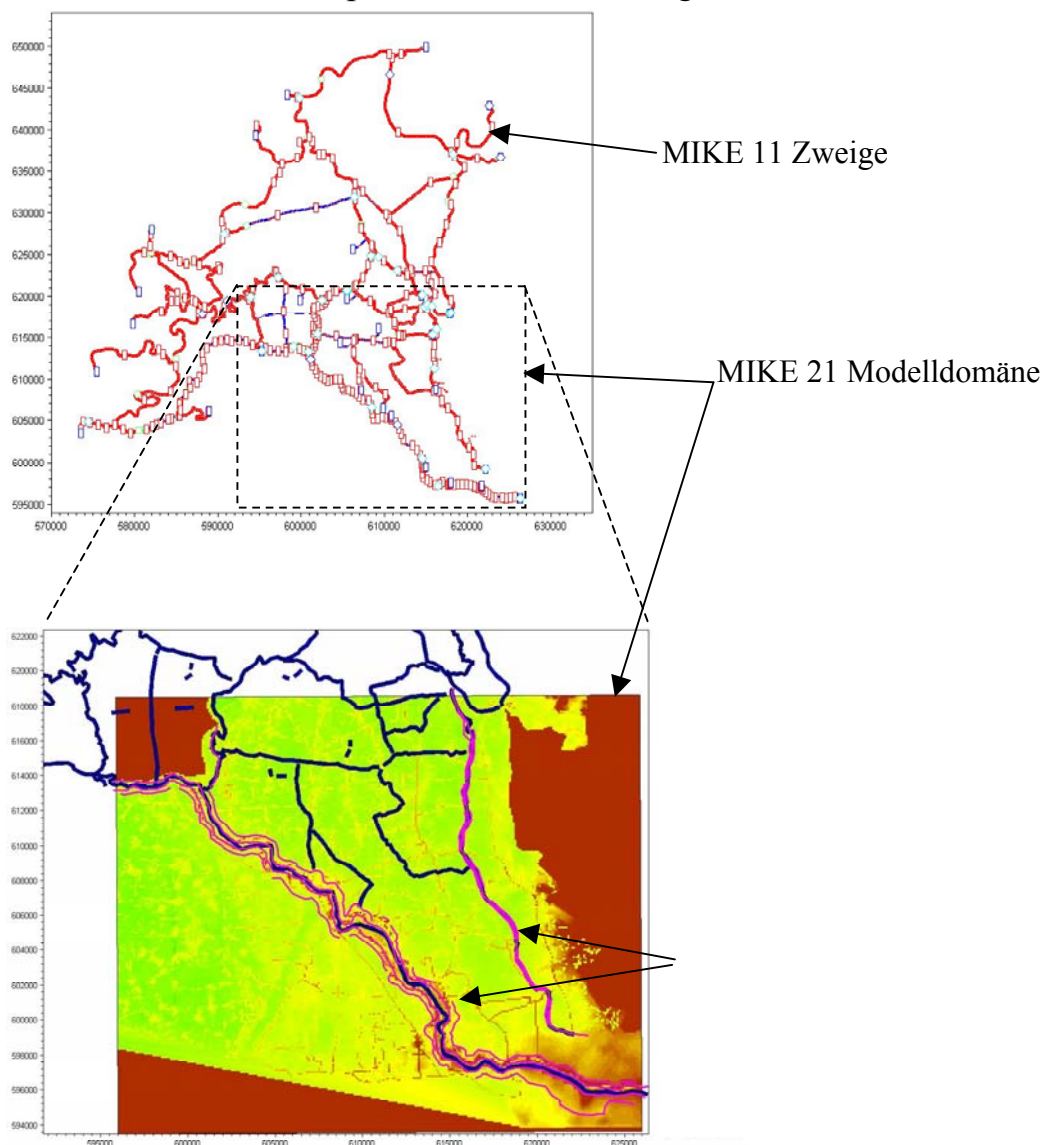


Abbildung 8 Domäne des MIKE Flood Modells.

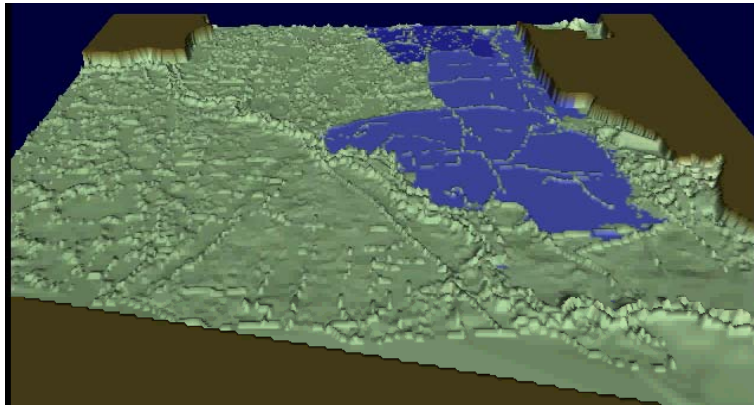


Abbildung 9 Simulationsergebnisse des MIKE Flood Modells.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Artikel werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Beschreibung von Hochwassereignissen mit Hilfe numerischer Methoden beschrieben. Dabei werden zunächst Möglichkeiten der Kopplung ein- und zweidimensionaler hydrodynamischer Modelle diskutiert. Danach wird durch den Vergleich mit experimentellen Ergebnissen gezeigt, dass die Verwendung eines Froude-Zahl abhängigen rückwärtsgerichteten Schemas die Modellierung von Wellenausbreitung über zunächst trockenes Land ermöglicht. Zudem wird gefolgert, dass die Kopplungen in Verbindung mit Überflutungs- und Trocknungseigenschaften einen praktikablen Weg zur Beschreibung der recht komplizierten Strömungsverhältnisse während eines Hochwassereignisses darstellen. Zuletzt werden zwei Beispiele praktischer Anwendungen gezeigt.

7 LITERATUR

- Abbott, M. B. (1979). Computational Hydraulics. Pitman, London.
- Abbott, M.B. and Rasmussen, C.H. (1977). On the Numerical Modelling of Rapid Contractions and Expansions in Models that are Two-dimensional in Plan, *Proc. 17th Congress IAHR*, Baden-Baden.
- Bates, P. D. and Hervouet, J. M. (1999). A new method for moving boundary hydrodynamic problems in shallow water, *Proc. R. Soc. London Ser. A*, 455, 3107-3128.
- Defina, A. (2000). Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water resources research*, 36(11), 3251-3264
- McCowan, A.D., Rasmussen, E.B. and Berg, P. (2002) Improving the performance of a two-dimensional hydraulic model for floodplain applications. Proc. Conf. on Hydraulics in Civil Engineering, The Institution of Civil Engineers, Australia.
- Soares, S. and Zech, Y. 1999 Effects of a sharp bend on dam-break flow. Paper B9, Proceedings 28th IAHR congress, Graz, Austria.
- Stelling, G., Kernkamp, H. W. J. and Laguzzi, M. M. 1998 Delft Flooding System. In: Babovic, V. and Larsen, L. C. (eds.), *Hydroinformatics '98*, Balkema, Rotterdam.
- Lax, P. D. (1954). Weak solutions of non-linear hyperbolic equations and their numerical approximations. *Comm. Pure and Applied Mathematics*, No. 7.
- Stelling, G., Kernkamp, H. W. J. and Laguzzi, M. M. (1998). Delft Flooding System. In: Babovic, V. and Larsen, L. C. (eds.), *Hydroinformatics '98*, Balkema, Rotterdam.
- Soares, S. and Zech, Y. (1999). Effects of a sharp bend on dam-break flow. Paper B9, *Proceedings 28th IAHR congress, Graz, Austria*.

8 Autoren:

DHI Büro Deutschland,
Krusenberg 31
28857 Syke
Tel.: 04242 / 78 42 43
Fax.:04242 / 78 42 72
Dr.Ole Larsen / E-Mail: ola@dhi-umwelt.de
Dr.Elimar Precht / E-Mail: e.precht@dhi-umwelt.de

Morten Rungø,
Kim Wium Olesen
Water Resources Software Department,
DHI – Water & Environment
Denmark, Horsholm