

Integration von ein- und zweidimensionalen Abflussmodellen

Cornel Beffa

Der Beitrag stellt ein Modellsystem vor, welches die Integration von 1D- und 2D-Modellen ermöglicht und damit die Vorteile beider Berechnungsverfahren vereint. Die Anforderungen an die Grundlagendaten und die geometrisch korrekte Behandlung der Schnittstellen zwischen den einzelnen Modellen werden im Detail beschrieben. Anhand eines Beispiels werden die Vorteile des gemischt ein- und zweidimensionalen Ansatzes aufgezeigt, namentlich die Homogenisierung der Längen- und Zeitskalen sowie die Möglichkeit der modularen Entwicklung von unabhängigen Teilmodellen.

1 Einleitung

Für die Simulation von Hochwasserabflüssen und die Ausscheidung von Überflutungsflächen haben sich zweidimensionale (2D) Modelle basierend auf hochauflösenden Terrainmodellen etabliert (DVWK 1999). Ihre Stärke kommt insbesondere bei flachen Topographien und komplexen Geländestrukturen zum Tragen, wo der Einsatz üblicher Abschätzverfahren oder Berechnungen mittels eindimensionalen (1D) Verfahren zu unbefriedigenden Ergebnissen führt.

Im praktischen Einsatz stossen aber auch 2D-Modelle an Grenzen, namentlich dort, wo sich die Abflüsse in engen Gerinnen mit steilen, z.T. vertikalen oder sogar überhängenden Ufern konzentrieren. Diese Probleme treten bei einer klassischen, eindimensionalen Modellierung basierend auf Querprofilen nicht auf. Eine weitere Herausforderung stellen die unterschiedlichen Raumskalen zwischen dem Abfluss im Gerinne und im Umland dar. Dies tritt insbesondere bei kanalisierten Gerinnen, beispielsweise im Siedlungsraum, auf.

Eine Lösung des Problems besteht – es liegt auf der Hand – in einer Kombination der beiden Modellansätze (vgl. Abbildung 1). Der vorliegende Beitrag stellt ein entsprechendes Modellkonzept vor, welches im Programm FLUMEN realisiert wurde und sich in einer Vielzahl von praktischen Anwendungen bewährt hat. Das Hauptaugenmerk gilt dabei der Integration der 1D- und 2D-Module. Für weitergehende Informationen zum Programm sei auf die Adresse <http://www.fluvial.ch> verwiesen.

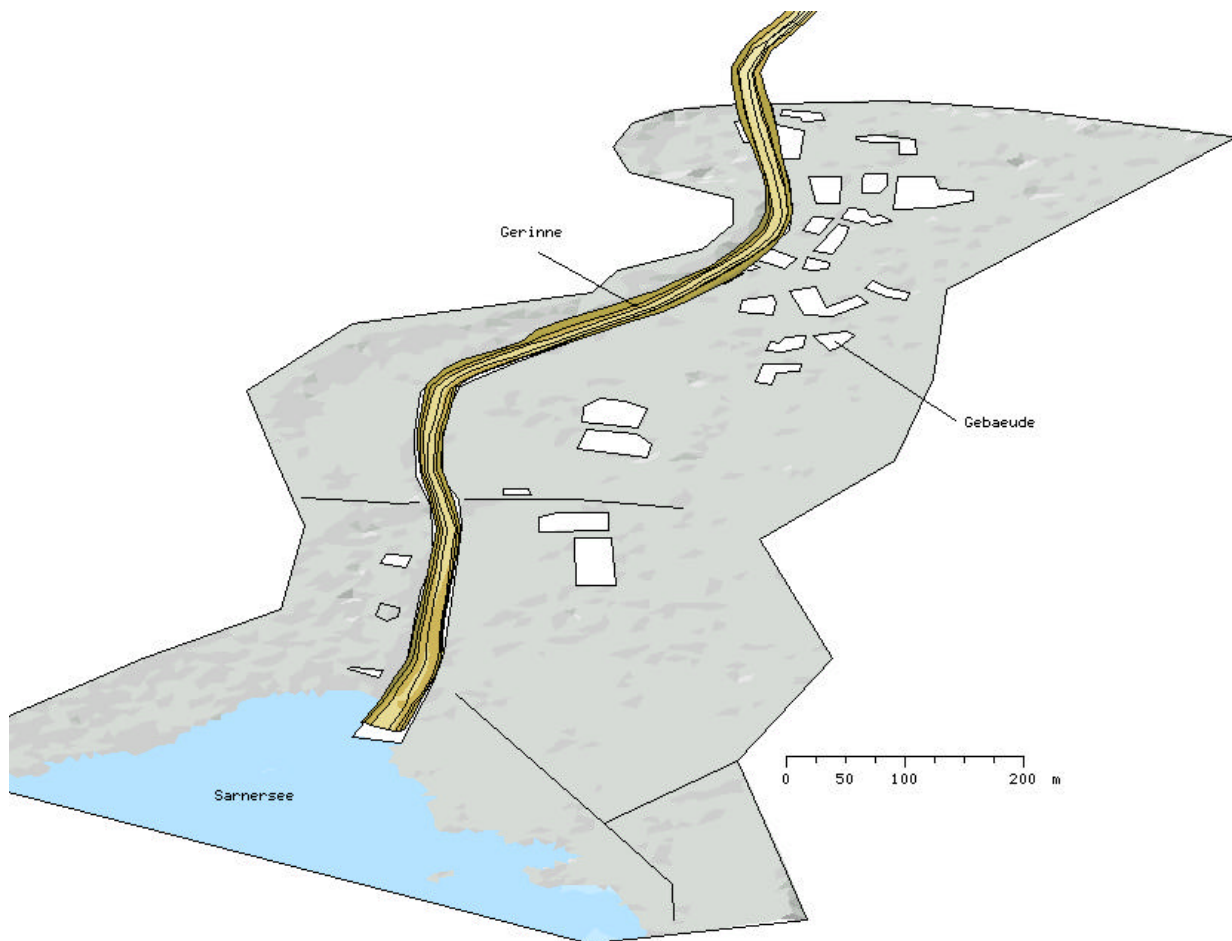


Abbildung 1 Integration von Gerinnemodell und 2D-Modell (Beispiel Sarneraa)

2 Die Berechnungsmodule im Programm FLUMEN

2.1 Das 1D-Modul

Das 1D-Modul zur Abflussberechnung basiert auf den Erhaltungsgleichungen von De Saint-Venant (Cunge et al. 1980). Das Flussgerinne wird wie gewohnt mittels Querprofilen beschrieben, welche zugleich die Knoten des Berechnungsschemas darstellen. Zur Lösung der Erhaltungsgleichungen wird ein explizites, zellenzentriertes Finite-Volumen (FV) Verfahren verwendet mit Flux-Difference-Splitting nach Roe (1981). Das Verfahren zeichnet sich durch hohe numerische Stabilität auch für gemischt unter- und überkritische Abflussregimes aus (Beffa 1994). Variable Sohlenrauheiten werden mittels „Rauheitscodes“ parameterisiert, wahlweise mit der empirischen Formel von Manning-Strickler oder dem logarithmische Reibungsgesetz. Bei Wehren, Abstürzen oder Eindolungen wird die Impulsgleichung durch geeignete Abflussbeziehungen ersetzt, wobei auf bewährte Ansätze aus der Gerinne- und Rohrhydraulik zurückgegriffen wird.

2.2 Das 2D-Modul

Das 2D-Modul basiert auf den Erhaltungsgleichungen für Volumen und Impuls (in x- und y-Richtung), den sog. „tiefengemittelten Flachwassergleichungen“ (Beffa 1994). Diese Gleichungen werden mit einem expliziten, zellenzentrierten FV-Verfahren und Flux-Difference Splitting nach Roe (analog dem 1D-Modul) gelöst. Zur Diskretisierung des Terrains wird ein unstrukturiertes Dreiecksnetz (TIN) verwendet, welches sich optimal an vorhandene Geländestrukturen (Dämme, Gräben) anpassen lässt. Numerische Konsistenz wird durch Verwendung von sog. „glatten Netzen“ erreicht. Mittels Qualitätsverdichtung (Ruppert 1995) wird der Modellbereich durch immer feiner werdende Dreiecke aufgefüllt. Als Abbruchkriterien dienen die Mindestgröße der Winkel zwischen den Dreiecksseiten und die maximal zulässige Dreiecksfläche.

Hilfreich zur Simulation von Ausuferungen ist die Möglichkeit von „trockenen Starts“. Das Modell erkennt selbständig, welche Gebiete während der Simulation neu benetzt werden oder beim Rückgang eines Hochwassers wieder trocken fallen. Für die Berechnung eines Zeitschrittes relevant sind dabei lediglich die Zellen, welche benetzt sind oder benetzte Nachbarzellen aufweisen. Neben Sohlenrauheiten kann auch der Einfluss von durchströmtem Bewuchs modelliert werden. Ähnlich dem 1D-Modul lassen sich die Bestimmungsgleichungen für die Flüsse über die Zellenseiten an spezifische Abflusssituationen (z.B. Wehre) anpassen.

3 Die Integration der Teilmodelle

3.1 Vorbereitende Schritte

Die Querprofile im 1D-Modell sind i.d.R. in einem lokalen Koordinatensystem unter Angabe einer Kilometrierung definiert. Ein Bezug zum 2D-Netz (Georeferenzierung) erfolgt durch die Vorgabe der Gerinneachse in Form eines Polygonzuges. Jedem Polygonpunkt wird als Attribut die Kilometrierung zugeordnet. Mit Hilfe eines graphischen Werkzeugs wird eine einfache Tabelle erstellt, welche die Lagekoordinaten der Gerinneachse und - in der dritten Spalte - den entsprechenden Kilometer enthält (vgl. Abbildung 2).

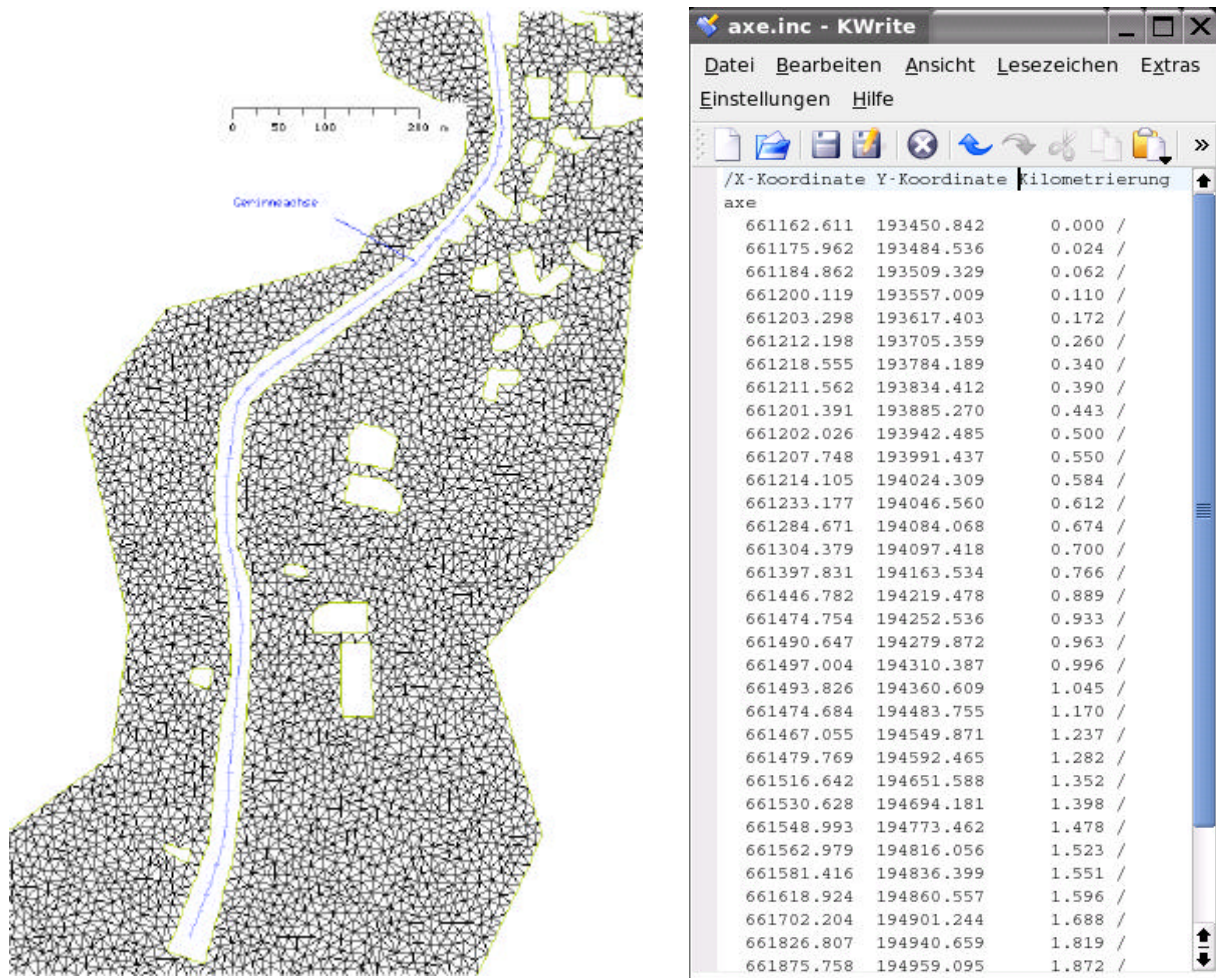


Abbildung 2 Einbindung der Gerinneachse in das 2D-Modell (links) und zugehörige Datentabelle (rechts)

Häufig sind die Abstände zwischen den vorhandenen Querprofilen sehr unterschiedlich, was aus Gründen der numerischen Konsistenz eine Vereinheitlichung der Profilabstände nötig macht. Bei einer Kopplung an ein 2D-Modell ist zudem eine Angleichung von Profilabstand und Zellengröße erforderlich, damit der Austausch zwischen den Teilmodellen physikalisch korrekt erfolgt. Konkret bedeutet dies, dass zwischen den vorhandenen Querprofilen interpoliert werden muss. Für diese Aufgabe wurde in FLUMEN folgender Weg gewählt: In einem ersten Schritt werden die vorhandenen Querprofile auf eine vorzugebende Anzahl von Profilpunkten reduziert. Konkave Profile werden durch total sieben Profilpunkte approximiert: Je zwei Uferpunkte und drei Punkte im Sohlenbereich. Diese Vereinfachung wurde innerhalb des Programmsystems realisiert und erlaubt eine weitgehend automatische Abarbeitung der vorhandenen Profile (Abbildung 3).

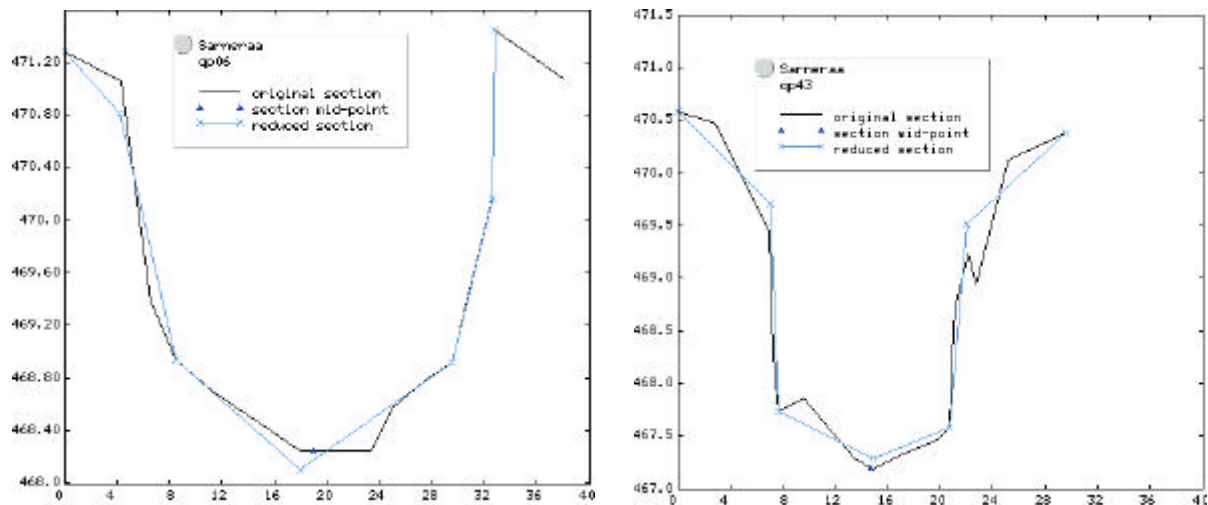


Abbildung 3 Automatische Reduktion der Profilpunkte (schwarz = Originalprofil, blau = vereinfachtes Profil)

Die Interpolation zwischen den Profilen gestaltet sich nun sehr einfach, indem die jeweils zugehörigen Punkte der vereinfachten Profile miteinander verbunden werden. Diese Interpolation erfolgt jeweils zu Beginn der Simulation; der optimale Profilabstand kann so je nach Genauigkeitsanforderungen vor dem Programmstart definiert werden, ohne die Profile selbst verändern zu müssen. Der Vorteil dieses Vorgehens ist eine weitgehende Unabhängigkeit von Modellinput und räumlicher Diskretisierung.

3.2 Definition der Nahtstelle

Die topologische Beziehung zwischen den Querprofilen und den Zellen der Berechnungsnetze lässt sich nun, da die Lage der Querprofile in Bezug auf die 2D-Netze bekannt ist, automatisch bestimmen. Alle Randkanten des 2D-Modells innerhalb eines vorgegebenen Fangkreises um die Gerinneachse stellen mögliche Kandidaten für eine Nahtstelle dar. Davon werden diejenigen Kanten ausgewählt, welche links und rechts der Gerinneachse den kleinsten Abstand zum betrachteten Querprofil aufweisen (vgl. Abbildung 4). Finden sich innerhalb des Fangkreises keine Randkanten, so ist das Querprofil ohne Verbindung zum 2D-Netz. Liegen die möglichen Kandidaten alle auf der gleichen Gerinneseite, so besteht nur eine Verbindung zum 2D-Netz.

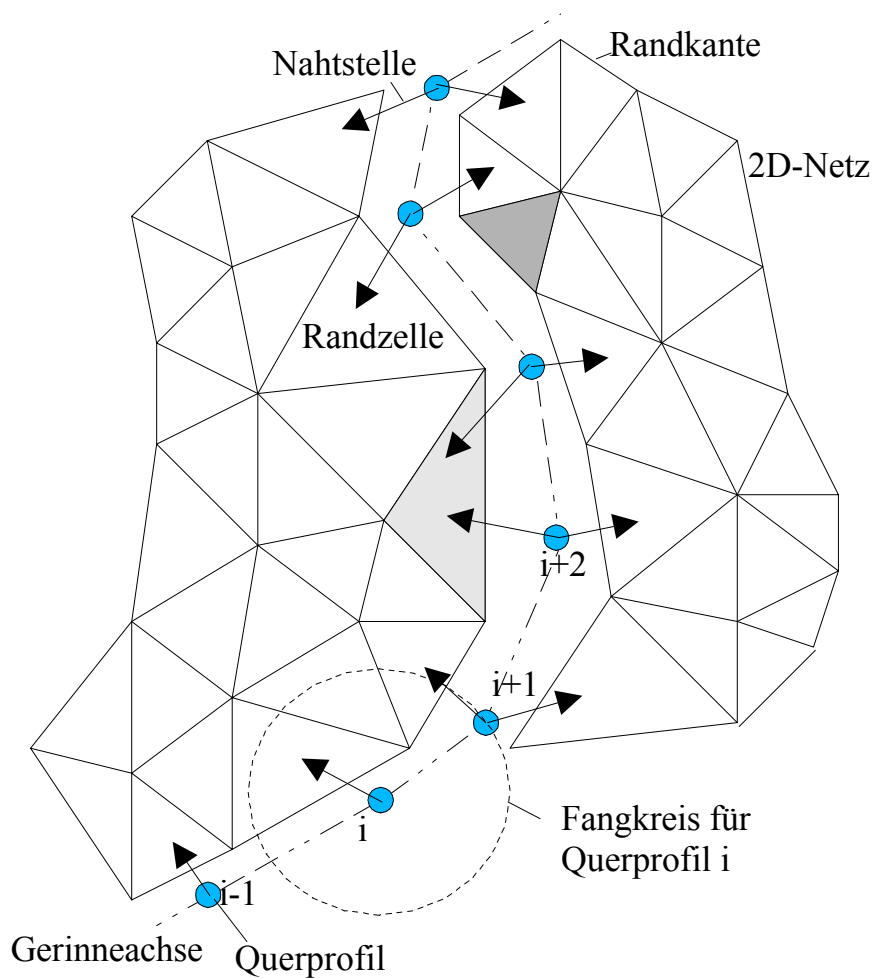


Abbildung 4 Definition der Nahtstelle zwischen 1D- und 2D-Modell

Idealerweise existiert pro Querprofil *eine* zugehörige Randzelle auf jeder Gerinnesseite. Dies ist dann der Fall, wenn die Querprofilabstände mit den Kantenlängen des Berechnungsnetzes übereinstimmen. Aus Sicht der Randzellen ist die Anzahl Verbindungen zu Querprofilen beliebig. In der Prinzipskizze (Abbildung 4) variiert die Zahl zwischen null (dunkelgraue Zelle) und zwei (hellgraue Zelle).

3.3 Abfluss über die Nahtstelle

Die Schnittstelle zwischen 1D- und 2D-Modell kann mit guter Näherung als eine Art „Streichwehr“ betrachtet werden. Die Wehrhöhe entspricht dabei der Dammhöhe im Querprofil oder der Terrainhöhe in der zugehörigen Randzelle (massgebend ist der Maximalwert). Die Wehrbreite ergibt sich aus der Breite der Randkante oder dem Abstand zwischen den Querprofilen (massgebend ist der Minimalwert). Die Austauschwassermenge pro Zeiteinheit lässt sich durch eine Poleni-artige Überfallformel abschätzen, wobei die Einstauwirkungen zu berücksichtigen sind (Beffa 2002).

3.4 Anwendung des Verfahrens

Das beschriebene Verfahren wurde schon mehrfach für Hochwassersimulationen eingesetzt, u.a. zur Simulation der Hochwasser vom August 2005 im Raum Sarnen (Obwalden, Schweiz). Die Sarneraai ist, wie viele Gewässer im Siedlungsraum, stark verbaut, z. T. mit senkrechten Ufermauern. Tiefliegende Brücken engen den Abflussquerschnitt während einem Hochwasser zusätzlich ein. Für die Simulation des Gerinneabflusses standen Gerinneprofile mit Abständen zwischen 12 und 250 m zur Verfügung, die in einem ersten Schritt vereinfacht und auf einheitliche Abstände von 20 m umgerechnet wurden. Für das Umland existierten Laserscanning-Aufnahmen mit einer Punktdichte von $1/m^2$. Das Überflutungsgebiet wurde mit unstrukturierten Netzen (Zellenfläche maximal $100 m^2$) diskretisiert, wobei Gebäude als „Löcher“ im Netz ausgespart blieben. Die berechneten Wasserspiegellagen (Abbildung 5) konnten anhand von vermessenen Hochwassermarken validiert werden.

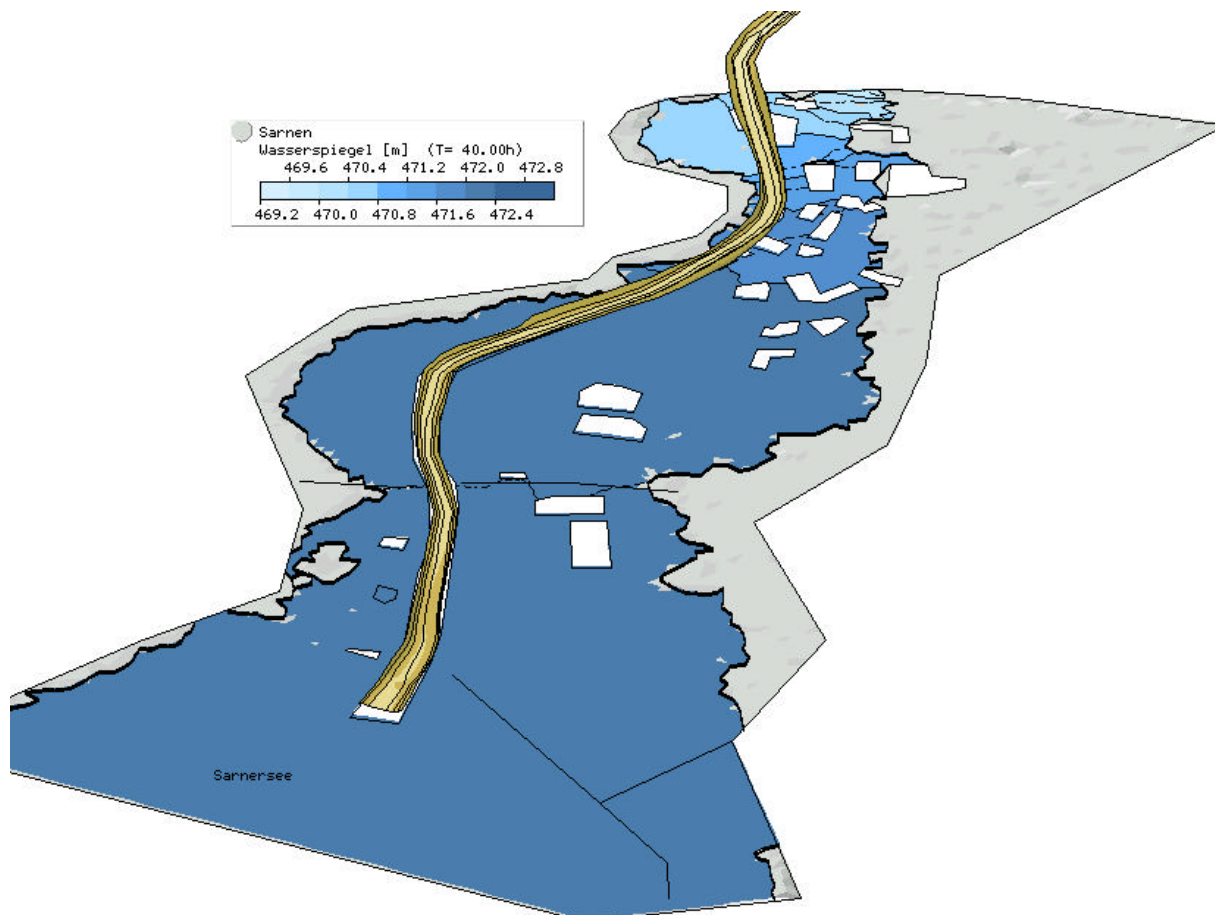


Abbildung 5 Simulierte Überflutungsflächen für Hochwasser Sarneraai im August 2005

Die Simulationen ermöglichten eine zuverlässige Rekonstruktion des Ereignisses und differenzierte Aussagen über die Abflussverteilung zwischen Gerinne und Umland sowie die Überflutungsintensitäten.

3.5 Folgerungen

Die Integration von 1D- und 2D-Modellen ist ein logischer Schritt im Bestreben, komplexe Abflussverhältnisse auf möglichst adäquate Weise simulieren zu können. Durch die Möglichkeit, Gerinnabflüsse mit einem 1D-Ansatz zu modellieren, wird neben der erhöhten Effizienz auch die Genauigkeit insgesamt verbessert. Der Modellierer hat dabei die Freiheit, den jeweils am besten geeigneten Ansatz zu verwenden. Die im Programm FLUMEN realisierte Lösung erlaubt, verschiedene Teilmodelle unabhängig voneinander zu erstellen und zu betreiben. Die Modellierung komplexer Systeme wird dadurch wesentlich erleichtert.

4 Literatur

- Beffa C. 1994. „Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen.“ *Mitteilung 133 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*. ETH Zürich.
- Beffa C. 2002. „Integration ein- und zweidimensionaler Modelle zur hydrodynamischen Simulation von Gewässersystemen.“ *In: „Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau“*. *Mitteilung 174 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*. ETH Zürich.
- Cunge J. A., Holly F. M. Jr., Verwey A. 1980. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman Publishing.
- DVWK 1999. „Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern.“ *Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.*, Heft 127.
- Roe P. L. 1981. „Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes.“ *J. Comp. Physics*, Vol. 43.
- Ruppert J. 1995. „A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation.“ *J. Algorithms*, 18 (3).

Autor:

Dr. sc. techn. Cornel Beffa
Laubstrasse 9, Postfach 28
CH-6431 Schwyz, Schweiz
Tel.: ++41 – 41 – 810 07 35
cbeffa@fluvial.ch