

Hyd³Flow - Integrierte hydrologische und hydro-numerische Modellsysteme für eine verbesserte Hochwasservorhersage

Stefanie Maßmann, Frauke Jakobs, Frank Sellerhoff, Jan Feldmann, Heiko Sieker, Carsten Lange, Yunchol Om, Reinhard Hinkelmann

Zusammenfassung

In Einzugsgebieten kleinerer und mittlerer Fließgewässer entstehen bei Starkregenereignissen Hochwasserschäden i. d. R. aus dem Zusammenwirken von drei Mechanismen: (1) Abflussprozesse im Gelände, (2) Abflussdynamik kleiner und mittlerer Fließgewässer im ländlichen und urbanen Raum sowie (3) Überlastung und Überstau im Kanalnetz. Diese drei Prozesse werden häufig getrennt oder nur unzureichend gekoppelt bearbeitet, da geeignete Werkzeuge fehlen. Die in den nächsten Jahren umzusetzende Europäische Hochwasserschutzrichtlinie erfordert in Zukunft eine verstärkte integrale Betrachtung dieser gekoppelten Prozesse. Daher haben sich drei Institutionen (smile consult GmbH, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH und TU Berlin, FG Wasserwirtschaft und Hydrosystemmodellierung) zusammengeschlossen, um eine generische Plattform zur „Kopplung hydrologischer, hydro-numerischer und hydro-informatischer Modellierungssysteme für eine verbesserte Hochwasservorhersage“ zu entwickeln. Das FuE-Kooperationsprojekt hat den Titel „Hyd³Flow“ und wird von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert.

1 Motivation

Numerische Simulationsmodelle haben sich zu wichtigen Werkzeugen in der Wasserwirtschaft und Hydrologie entwickelt (siehe Abbildung 1), um die

- Abflussprozesse im Gelände,
- die Abflussdynamik von Fließgewässern im ländlichen und urbanen Raum
- sowie die Überlastung und den Überstau im Kanalnetz

abzubilden.

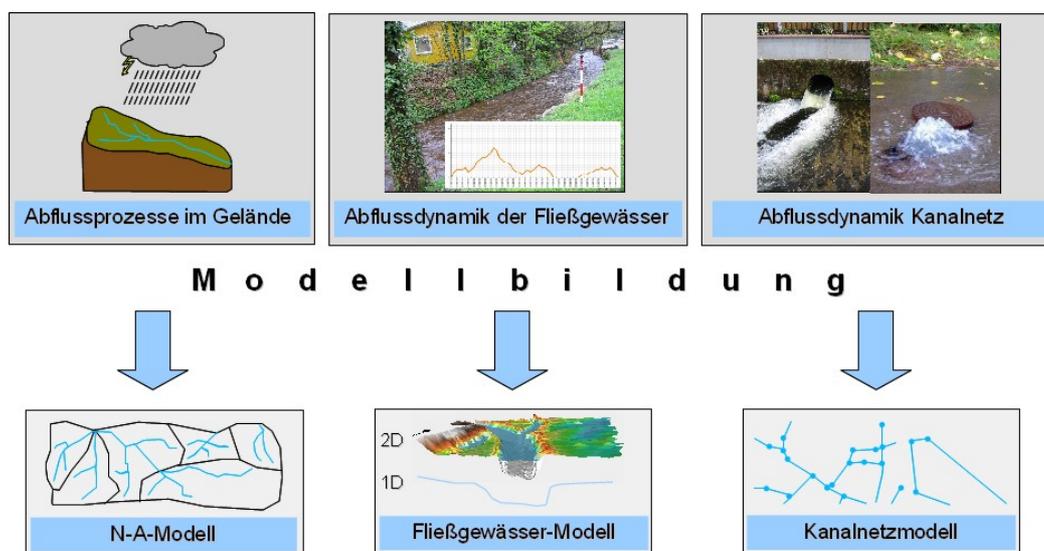


Abb. 1: Entwicklung unterschiedlicher Modellsysteme zur Abbildung von Abflussprozessen.

Die Vielzahl unterschiedlicher Modellsysteme dokumentiert national wie auch international den hohen Entwicklungsstand, sowie die Spezialisierung dieser Simulationsmodelle auf besondere Fragestellungen und Gegebenheiten. Ein aktuell und zukünftig großes Anwendungsgebiet solcher Modellsysteme befasst sich mit der Simulation von Hochwasserereignissen und, daraus abgeleitet, der Hochwasservorhersage. Die Gründe dafür liegen zum einen in den extremalen Hochwasserereignissen der letzten Jahre sowie zum anderen in dem Inkrafttreten der Europäischen Hochwasserschutzrichtlinie Ende 2007 (RICHTLINIE 2007/60/EG 2007). Im Zuge der Umsetzung dieser Richtlinie müssen Hochwasserrisiken für alle Einzugsgebiete bewertet (bis Ende 2011), Gefahren- und Risikokarten für Hochwasserrisikogebiete (bis Ende 2013) sowie Risikomanagementpläne (bis Ende 2015) aufgestellt werden. Eine verlässliche Basis zur Umsetzung dieser Richtlinie können nur integrale Betrachtungen der Modellierungssysteme bilden. Hierfür wird im Rahmen dieses Projektes das Framework Hyd³Flow als integrale Plattform entwickelt.

2 Modellkonzepte

Zur Analyse und Vorhersage der für die Hochwasservorhersage relevanten hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Prozesse kommen zurzeit verschiedene Modellkonzepte zum Einsatz. Dies liegt sowohl an den unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen als auch an den unterschiedlichen Charakteren der Prozesse.

Die hydrologischen und hydro-numerischen Modellierungssysteme sind im Rahmen von Hochwassersimulationen in ihren Teilbereichen bereits national sowie international weit entwickelt und etabliert, und sie sind in ihrem Umfeld mit entsprechenden leistungsfähigen hydro-informatischen Werkzeugen verknüpft. Hydrologische Modelle weisen insbesondere bei extremen Hochwasserereignissen erhebliche Schwächen bei der Berechnung der Abflussprozesse im Gewässer und der Überflutungsflächen auf, während hydro-numerische Modelle den Prozess der Abflussbildung im Einzugsgebiet nicht bzw. nur als grobe Näherung abbilden. Die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässermodellierung und Kanalnetzmodellierung werden meist nicht erfasst. In diesen Bereichen weist der nationale und internationale Stand der Technik zur Modellierung von Hochwasserereignissen deutliche Defizite auf.

Im Folgenden werden die drei im Rahmen dieses Projektes berücksichtigten Modellsysteme vorgestellt.

2.1 Hydrologische Modellsysteme

Für Simulationen im Rahmen von Einzugsgebietsmodellierungen werden hydrologische Modellkonzepte verwendet, sog. Niederschlag-Abfluss-Modelle. Diese Modellkonzepte beruhen i. d. R. auf vereinfachten Ansätzen - konzeptionellen Modellansätzen - wobei die Fließgewässer ebenfalls über hydrologische oder eindimensionale hydro-numerische Ansätze abgebildet werden. Das Relief des Fließgewässers bzw. dessen Querschnitt geht hier nicht oder nur stark vereinfacht ein, so dass insbesondere bei extremen Hochwasserereignissen die tatsächlich ablaufenden Prozesse nicht mehr naturgetreu abgebildet werden können. Die oft komplexen Austauschvorgänge im Fluss-Vorland-System werden dabei gar nicht bzw. nicht ausreichend genau erfasst. Die Prognosesicherheit dieser

Ansätze ist somit begrenzt. Hydrologische Modelle diskretisieren das Modellgebiet auf einer groben Skala (z. B. Teileinzugsgebiete mit Größen von mehreren Quadratkilometern) und berechnen auf dieser Skala Ergebnisse, d. h. beispielsweise, dass nur ein Abfluss als integraler Wert für ein Teileinzugsgebiet auf der Basis des (gemessenen) Niederschlags berechnet wird. Eine flächendetaillierte Ausweisung von Überflutungsflächen, welche die Topographie und das Relief von Gelände und Gewässer differenziert berücksichtigen, ist mit hydrologischen Ansätzen i. d. R. nicht möglich. Hydrologische Modelle bilden den Prozess der Abflussbildung, d. h. der Transformation des Niederschlags durch das Einzugsgebiet unter Berücksichtigung von Evaporation, Versickerung und Gebietsrückhalt, plausibel ab, haben aber die o. g. Schwächen bei der Bestimmung der Abflusskonzentration.

Hydrologische Modelle sind rechentechnisch einfach und i. d. R. wenig rechenzeitaufwändig. Sie werden insbesondere bei großen Einzugsgebieten (viele hundert bis einige tausend Quadratkilometer) eingesetzt.

2.2 Hydro-numerische Fließgewässer-Modelle

Eine detailgetreue und naturnähere Wiedergabe der Dynamik von Hochwasserereignissen in Oberflächengewässern erfolgt mit zweidimensionalen hydro-numerischen Simulationsmodellen – auch hydraulische Modellierungssysteme genannt. Diese beruhen auf der numerischen Lösung der sog. Flachwassergleichungen z. B. basierend auf Finite-Elemente- oder Finite-Volumen-Methoden. Tiefenintegrierte hydrodynamische Berechnungen sind besonders geeignet für Überflutungsprozesse, da eindimensionale Betrachtungen häufig zu starke Vereinfachungen mit sich bringen (z. B. Interaktionen zwischen Fließgewässer und Vorland werden u. U. nicht hinreichend genau abgebildet) und dreidimensionale Modellierungen für die abzubildenden Prozesse im Allgemeinen nicht erforderlich sind sowie aufgrund der Rechenzeiten zurzeit praktisch nicht effizient darstellbar wären. Die Modelltechnik bei zweidimensionalen Verfahren ist im Vergleich zu den hydrologischen Ansätzen wesentlich komplexer. Dabei wird das Modellgebiet mit einem Gitternetz aus Dreiecks- oder Viereckselementen mit variablen Kantenlängen entsprechend den geographischen Gegebenheiten und der zu erwartenden Hydrodynamik diskretisiert. Vorteile dieser Modelltechnik sind: geometrische Strukturen des Vorlandes und der dortigen Überflutungsflächen werden detaillierter abgebildet und flächendetaillierte Ergebnisse zu Wasserständen, Überschwemmungsflächen sowie Fließgeschwindigkeitsverteilungen usw. können ermittelt werden. Dies wird unter anderem zusätzlich dadurch begünstigt, dass die zunehmende hochgenaue Beschreibung der Vorländer durch Laserscandaten und der Gewässersohle durch hochaufgelöste Fächerlotdaten zu höherwertigen digitalen Geländemodellen führt. Die wesentlich genauere Bestimmung der Strömungsprozesse im Interaktionsbereich Fließgewässer/Vorland, und die differenzierte Überströmungsberechnung von Deichen ist mit dieser Technik überhaupt erst möglich. Hydro-numerische Simulationsmodelle sind für die Modellierung von Fließgewässerabschnitten besonders geeignet, bei denen das Hochwasser primär aus der Weiterleitung der Hochwasserwelle am Gebietseinlass und dem daraus resultierenden Überlaufen des Gewässers aus seinem Bett samt Vorland resultiert. Die Abflussbildung aus dem Einzugsgebiet, d. h. das Niederschlagswasser, das dem Fluss aus dem

Oberflächenabfluss zugeführt wird, wird in den hydro-numerischen Modellansätzen meist nicht oder nur näherungsweise über die Zuläufe kleiner Bäche berücksichtigt.

2.3 Hydro-numerische Kanalnetz-Modelle

Ähnliche Modellansätze, wie bei der Fließgewässermodellierung, werden auch im Bereich der Kanalisation verwendet. Dort ist die hydro-numerische Modellierung der Abflussprozesse im Kanal bereits seit Jahren Stand der Technik. Angewendet werden sowohl explizite als auch implizite numerische Verfahren zur Lösung der Flachwassergleichung. Aufgrund der meist deutlich einfacheren Geometrie der Gerinnequerschnitte gegenüber Fließgewässern, ist allerdings die eindimensionale Betrachtung ausreichend. Der Zufluss in die Kanalisation, d. h. der oberflächige Abfluss von den Siedlungsflächen wird, wie bei den Gewässern, durch hydrologische Modelle abgebildet. Rückkopplungseffekte von der Kanalisation zum Oberflächenwasser (z. B. eine überlaufende Kanalisation bei Hochwasser) werden in der Regel nicht erfasst. Normalerweise werden die Modellierungen von Fließgewässer und Kanalisation für Extremereignisse komplett separat durchgeführt.

3 Das Softwaresystem Hyd³Flow

Um die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Abflussprozessen abzubilden, bedarf es einer integralen Betrachtung der spezialisierten Modellsysteme, wofür Hyd³Flow entwickelt wird. Das Framework Hyd³Flow verfolgt dabei einen generischen Ansatz welcher die Verwendung unterschiedlicher Modellgattungen und -systeme erlaubt. Über eine einheitliche Bedienung im Zuge des Preprocessings, Processings und Postprocessings wird die Arbeit des planenden Ingenieurs wesentlich unterstützt.

3.1 Preprocessing

Für den Modellaufbau werden unterschiedliche geometrische und physikalische Daten (digitale Geländemodelle, Laserscandaten, Gewässerprofile, Pegeldata, Peildata der Gewässersohle, Flächennutzungsdaten, Wasserstands- und Abflussmessungen etc.), zumeist unter Verwendung eines Geographischen Informationssystems (GIS) in ein einheitliches Datenmodell überführt und weiterverarbeitet (z. B. Interpolation, Extrapolation, Ausdünnung von Daten, Bruchkantenermittlung). Anschließend kann der Anwender mit der eigentlichen Gitternetzgenerierung beginnen, die die o. g. Informationen entsprechend berücksichtigen (z. B. hohe Auflösung im Fließgewässer und Vorland sowie im Bereich von Bruchkanten, wenige Elemente in großen Überflutungsflächen). Neben der geometrischen Modellbeschreibung müssen weitere Eigenschaften wie z. B. Sohl- und Geländerauheiten berücksichtigt werden. Die Erzeugung geeigneter Anfangs- und Randbedingungen für Wasserstände und Zuflüsse bilden den Abschluss des Preprocessings (vgl. Abbildung 2).

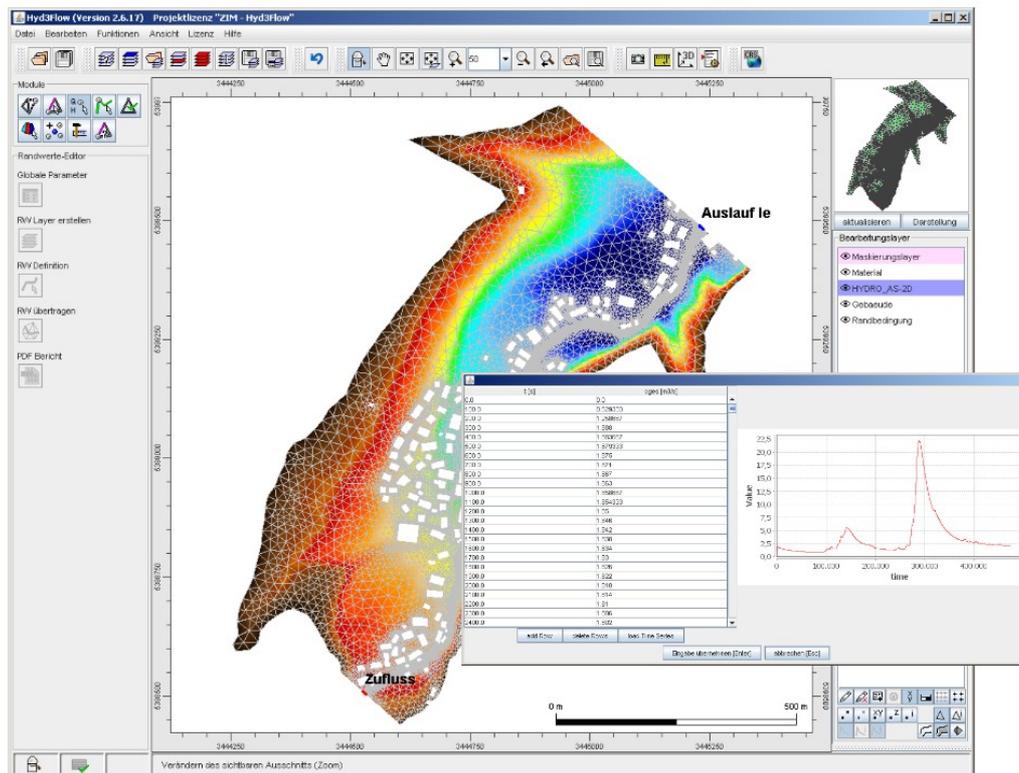


Abb. 2: Preprocessing in Hyd³Flow: Netzgenerierung und Randwerte-Editor.

3.2 Modellkopplung

Das Softwaresystem Hyd³Flow ermöglicht die Nutzung standardisierter Schnittstellen und Austauschformate zur Kopplung bestehender Simulationsprogramme (z. B. STORM, HYDRO_AS-2D). Damit werden die zeitaufwendigen Datentransformationen zwischen unterschiedlichen Modellen und der Ablauf der Simulationsschritte (N-A-Modell, Fließgewässer, Kanalnetz) automatisiert.

Die Steuerung der Simulation und die Datenübertragung erfolgen nach den Standards Sensor Planning Service (SPS) (SIMONIS 2007) und Sensor Observation Service (SOS) (PRIEST & NA 2007) des Open Geospatial Consortiums (OGC). Die verwendeten Modelle müssen nicht über eine SOS- und SPS-Schnittstelle verfügen; die Übersetzungsfunktion zwischen Modell und Austauschformat übernehmen entsprechende Module in Hyd³Flow. Externe Datenquellen, die über eine OGC-konforme Schnittstelle verfügen (z. B. Regenschreiber, Pegeldata), können durch die Nutzung dieses Standards direkt eingebunden werden.

Vom Nutzer werden die an der Simulation beteiligten Modelle (vgl. Abbildung 3), der zeitliche Ablauf der Simulationsschritte, die Ein- und Ausgabeelemente und die Berechnungsparameter der einzelnen Modelle festgelegt. Aus diesen Eingaben generiert Hyd³Flow ein Ablaufschema, das schrittweise abgearbeitet wird. Dazu gehören das automatisierte Erzeugen und Absenden der SOS- und SPS-Anfragen, die Prüfung der Verfügbarkeit der Modelle, das Starten der Simulationen, das Abrufen der Simulationsergebnisse und deren Weitergabe an das nächste Modell innerhalb der Kopplung.

Eingangsdaten und Simulationsergebnisse werden in Datenbanken abgelegt, auf die ein SOS-Dienst zugreift. Die Daten stehen damit lokal oder über eine Internetverbindung zur Abfrage im SOS-Standard zur Verfügung.

Wie flexibel in diesem Verfahren Modelle gekoppelt werden können, hängt stark von den verwendeten Simulationsprogrammen ab, da Hyd³Flow nicht in die modellinternen Abläufe eingreift. Gute Voraussetzungen für eine Kopplung bieten daher Simulationsprogramme, die das Speichern von Zwischenergebnissen ermöglichen und eine Veränderung von Randbedingungen während des Rechenlaufes zulassen.

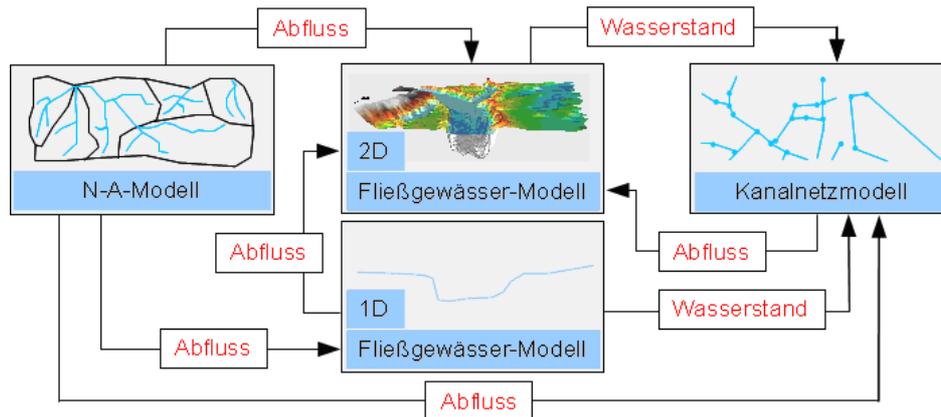


Abb. 3: Schema der Modellverknüpfungen: Übergabe der betrachteten Kopplungsgrößen.

3.3 Postprocessing

Während der Modellläufe sollte das numerische Modell nach Möglichkeit anhand von Naturdaten validiert werden. Der Vergleich mit Geschwindigkeitsmessungen (z. B. Flügelmessung oder ADCP), mit Wasserspiegelfixierungen oder Pegelaufzeichnungen dokumentiert die Qualität der Modellierung und gibt Hinweise auf notwendige Iterationen der vorhergehenden Arbeitsschritte. Im Anschluss an die numerischen Modellläufe müssen große Mengen an Ergebnisdaten aufbereitet werden. Die relevanten Informationen (z. B. Überflutungsflächen, Hochwasserintensitäten, Vergleich unterschiedlicher Maßnahmen zur Verbesserung der Hochwassersituation) sind übersichtlich und ggf. auch für Nicht-Fachleute verständlich darzustellen (siehe Abbildung 4).

3.4 Szenarienmanagement

Bevor ein Modelllauf zu akzeptablen Ergebnissen kommt, müssen während der Modellvalidierung eine Vielzahl von Parametern, wie beispielsweise Diskretisierung, Rauheit u. a., in Parameterstudien untersucht werden. Die Beantwortung einer bestimmten Fragestellung bedarf oftmals einer großen Zahl von verschiedenen Modellläufen, um beispielsweise im Rahmen einer Risikoabschätzung ein ungünstiges Szenario zu identifizieren. Somit liegen mit der Zeit eine große Anzahl von verschiedenen Modellvarianten mit unterschiedlichen Diskretisierungen und Randbedingungen vor. Diese führen in Kombination zu einer Vielzahl von Ergebnissätzen und Auswertungen.

Ein geeignetes Szenarienmanagement stellt diese Informationen miteinander in Beziehung und zeigt die Verwendung und die jeweiligen Verknüpfungen auf. Neben der übersichtlichen Speicherung aller dieser Informationen ist insbesondere in der Recherchierbarkeit ein

gewaltiger Zugewinn zu sehen, der es ermöglicht, das Zustandekommen der Ergebnisse bis hin zu den Eingangsinformationen zurückzuverfolgen. Darüber hinaus lassen sich Ergebnisse verschiedener Rechenszenarien einfach und schnell miteinander vergleichen. Basierend auf vorhandenen Ergebnissen und Modellen (Berechnungsgitter, Rauheitsgitter, Bauwerks-, Korngrößengitter etc.) können effizient neue Berechnungen gestartet werden.

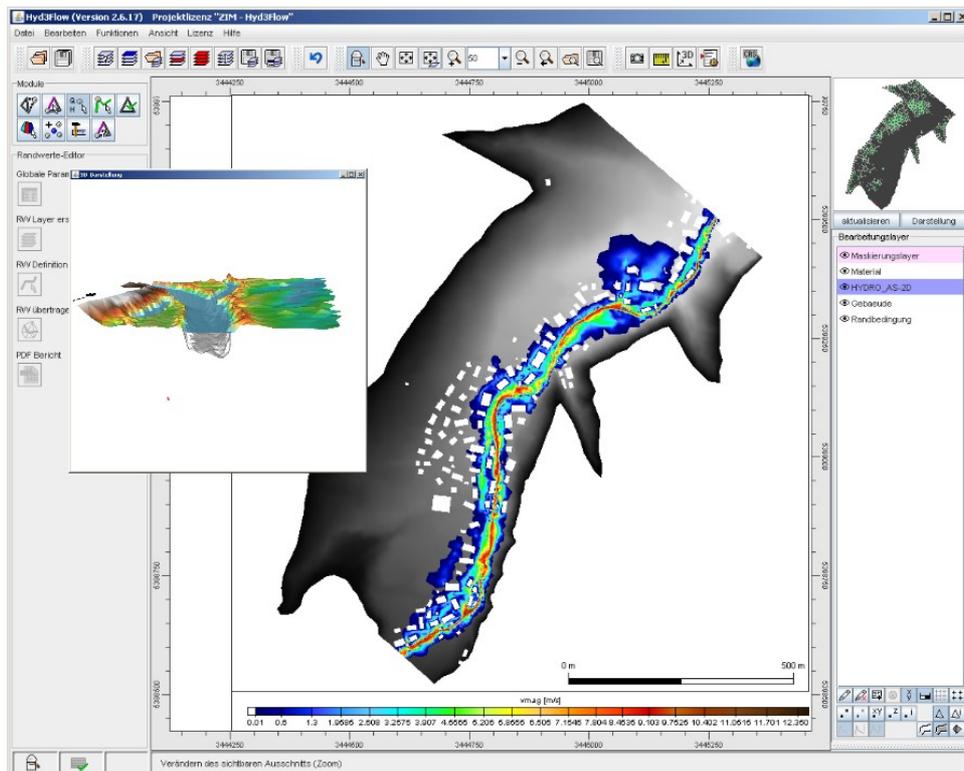


Abb. 4: Postprocessing in Hyd³Flow: Klassen der Strömungsgeschwindigkeiten flächig eingefärbt und 3D-Darstellung der geodätischen Höhe mit der freien Wasseroberfläche.

Danksagung

Dieses Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Wir bedanken uns herzlich für diese Förderung und für die Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)!

Literatur / Referenzen

PRIEST, M. & NA, A. (2007): Sensor Observation Service, Implementation Standard, Version 1.0, OGC document 06-009r6.

RICHTLINIE 2007/60/EG (2007): Hochwasserschutzrichtlinie, Europäisches Parlament, Rat.

SIMONIS, I. (2007): Sensor Planning Service Implementation Specification, version 1.0.0, OGC document 07014r3.