

Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum auf Basis von gekoppelten hydrodynamisch- numerischen Modellen und semantischen 3D- Stadtmodellen - FloRiCiMo

Torsten Heyer
Stefan Trometer
Hellen Hammoudi
Arne Schilling
Roberto Tatis Muvdi

Die rasante Entwicklung virtueller, dreidimensionaler Stadtmodelle sowie die Möglichkeit der Unterlegung dieser Modelle mit einer Vielzahl von Daten und Informationen, die als Eingangsdaten zur numerischen Simulation physikalischer Prozesse verwendet werden können, ermöglichen eine unmittelbare Kopplung dieser Modelle mit geeigneten Solvern. Ausgehend von diesem Ansatz werden innerhalb dieses Beitrags Arbeitsschritte und Ziele vorgestellt, welche im Rahmen des DBU-Forschungsprojekts FloRiCiMo hinsichtlich der Simulation von Überflutungsszenarien im urbanen Raum verfolgt werden.

Stichworte: Hochwasser, Risikoanalyse, Stadtmodell, HN-Modell

1 Einführung

Die zahlreichen außergewöhnlichen Hochwasserereignisse, die sich in den letzten zwanzig Jahren in Mitteleuropa ereignet haben, sprechen für die Prognosen zum Klimawandel, welche eine Zunahme der Häufigkeit und der Intensität von Extremwetterlagen und daraus resultierenden Hochwassern vorhersagen. In Reaktion auf diese Prognosen trat die EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie im November 2007 in Kraft, womit alle Mitgliedsstaaten aufgefordert wurden, bis zum Jahr 2015 das Hochwasserrisiko für gefährdete Gebiete zu bewerten und Managementpläne für eine Minimierung dessen aufzustellen. Weiterhin wird laut Richtlinie eine Revision dieser Pläne über einen Zeitraum von 6 Jahren gefordert. Da die Risikoanalyse, welche eine wichtige Komponente innerhalb des Hochwasserrisikomanagements darstellt, heutzutage i. d. R. den Einsatz hydronumerischer Modelle erfordert, ergibt sich ein hoher, turnusmäßig zu betreibender Aufwand für die zuständigen Instanzen. Dies gilt insbesondere für

Risikoanalysen in urbanen Räumen, welche durch hohe Schadenspotenziale charakterisiert sind und häufig komplexe technische Hochwasserabwehrsysteme (permanente und temporäre) aufweisen. Darüber hinaus werden in städtischen Umgebungen oft bauliche Veränderungen vorgenommen, die sich, z. B. infolge von Versiegelung, Wohnbautätigkeit oder Infrastrukturentwicklung, oft unmittelbar auf das Fließverhalten im Falle einer Überflutung auswirken. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungshabens FloRiCiMo Methoden und Verfahrensweisen entwickelt, die unter Zuhilfenahme amtlich geführter 3D-Stadtmodelle und weiterer morphologischer sowie geographischer und bathymetrischer Daten eine möglichst detaillierte und automatisierte Simulation von Überflutungsszenarien in urbanen Räumen ermöglichen sollen. Im Kern des Projekts steht somit die Kopplung von detaillierten 3D-Stadtmodellen mit Werkzeugen zur hydrodynamisch-numerischen (HN) Simulation.

2 Zielstellung, Projektphase 1

Innerhalb der ersten Phase des Forschungsprojekts (14 Monate) liegt der Fokus der Arbeiten auf folgenden Punkten:

- Entwicklung und Bereitstellung eines Web-Portals auf Basis von 3D-Stadtmodellen für die Definition von HN-Analysemodellen,
- Entwicklung und Erprobung eines vereinfachten und schnellen 2D-HN-Solvers,
- Erprobung von 3D-HN-Solvern für hochdetaillierte und hochdynamische Strömungsberechnungen.

Die Modellierungsmethodik soll auf zwei Untersuchungsgebiete in den Städten Dresden und Magdeburg, die sich beide an der Elbe befinden, angewandt werden, weshalb die jeweils zuständigen Behörden der Landeshauptstädte Sachsens und Sachsen-Anhalts als Praxispartner am Forschungsprojekt beteiligt sind. Die Einbindung dieser Pilotstrecken in das Projekt verfolgt u. a. auch das Ziel, evtl. unterschiedliche Ausgangslagen hinsichtlich verfügbarer Daten und deren Qualität (z. B. Detailliertheit der Stadtmodelle) zu untersuchen, um dies ggf. im Rahmen der Modelltransformation berücksichtigen zu können.

Wie oben erwähnt ist es Ziel des Projekts, auf Basis von semantischen Stadtmodellen zwei- und dreidimensionale HN-Modelle weitgehend automatisiert erzeugen und betreiben zu können. Während 2D-HN-Simulationen für schnelle, vereinfachte Analysen zur Anwendung kommen, sollen detaillierte 3D-HN-Simulationen für den Einsatz an neuralgischen Punkten wie beispielsweise Brü-

cken, Tiefgaragen o. ä. erprobt werden. Hierbei gilt es generell, einen sinnvollen Kompromiss zwischen Diskretisierungsgrad, Modellgröße, Ereignisdauer bzw. -typ und Berechnungsgeschwindigkeit zu finden.

3 Allgemeines Konzept

Als Grundlage für die HN-Simulationen wird ein geographisches Informationssystem (GIS) verwendet, das mit Datenmodellen der Vermessungsämter kompatibel oder mit diesen gekoppelt ist. Für die Abbildung von 3D-Stadtmodellen hat sich bundesweit und zunehmend auch durch EU Initiativen (*INSPIRE*, 2013) vorangetrieben der OGC CityGML Standard (*Gröger et al.*, 2012) durchgesetzt. Ein Web-Portal (Abbildung 1) erlaubt den Zugriff auf alle relevanten Geodaten.



Abbildung 1: Ausschnitte aus dem 3D-Stadtmodell der Stadt Dresden, dargestellt in einem Prototyp des Web-Portals

In dieser Plattform werden somit alle prozessrelevanten Daten und Informationen zusammengeführt und bereitgestellt. Über das Web-Portal lassen sich die Datenabfragen und -transformationen für die Erzeugung der HN-Modelle definieren. Die HN-Simulationen können dann sowohl vollautomatisiert im Hintergrund ablaufen, als auch durch Fachanwender teilautomatisiert durchgeführt werden. Die Simulationsergebnisse können im Anschluss wieder im Web-Portal des 3D-Stadtmodells aufbereitet und visualisiert werden, um zum einen eine verbesserte Bewertung durch Entscheidungsträger zu ermöglichen und zum anderen eine ansprechende und intuitiv verständliche Bürgerinformation zu gewährleisten. Dieser Workflow kann entsprechend den Anwenderwünschen individuell angepasst werden.

Für die Definition der zu betrachtenden Hochwasserszenarien kann man zwischen vorbereiteten Standardszenarien und individuell aufsetzbaren Szenarien unterscheiden. Standardszenarien können beispielsweise zurückliegende Hochwasserereignisse oder bemessungsrelevante Ereignisse, z. B. HQ(100), sein. Individuelle Szenarien sind beispielsweise detaillierte 3D-Simulationen an mar-

kanten Bauwerken wie Brücken oder Gebäudekomplexen, einem Hauptfokus des Forschungsprojektes. Für Einzelbauwerke, wie z. B. Brücken, ist eine direkte 3D-Simulation für den lokalen Ausschnitt denkbar, sofern die hydraulischen Randbedingungen direkt aus Pegelinformationen bzw. lokalen Abflussverhältnissen extrahiert werden können. Ist jedoch eine direkte Definition der Simulationsrandbedingungen nicht möglich, wird eine Kopplung von detaillierten 3D-HN-Modellen mit vereinfachten 3D-HN-Modellen größerer Ausdehnung oder mit 2D-HN-Modellen vorgesehen. Diese Art der Modellkopplung wird erforderlich, da man sonst Zufluss- und Abfluss-Randbedingungen für einen beliebigen 3D-Ausschnitt im Stadtmodell (z. B. Neubau Gebäudekomplex) nicht definieren kann.

Als allgemeine Basis für detailliertere Untersuchungen mit begrenzten Ausdehnungen dienen großflächige, zweidimensionale Untersuchungen, wie sie gegenwärtig üblich sind und im Rahmen des Forschungsprojekts ebenfalls weiterentwickelt werden. Die Auswahl und Interaktion zwischen 2D- und 3D-HN-Modellen kann über das Web-Portal definiert und gesteuert werden.

4 2D-HN-Simulationen

Nach heutigem Stand der Technik werden für Überflutungssimulationen urbaner Räume überwiegend 2D-HN-Modelle eingesetzt. Darin stellt die geeignete Modellierung baulicher Abflusshindernisse, wie z. B. Gebäude, stets eine besondere Herausforderung dar. Üblicherweise erfolgt die modellhafte Implementierung der Gebäude über das „Ausstanzen“ der Gebäudegrundrisse aus dem Berechnungsnetz (Abbildung 2), wobei diese Grundrisse häufig vereinfacht und fallweise auch zusammengefasst werden.

Aufgrund der softwareabhängigen Vorgaben bezüglich der Netzqualität ist dieser Schritt oft zeitaufwändig und erfordert häufig eine „manuelle“ Nachbearbeitung. Innerhalb des Forschungsprojekts ist vorgesehen, die im 3D-Stadtmodell enthaltenen Gebäudegrundrisse automatisiert in ein unregelmäßiges Berechnungsnetz zu übertragen und, falls notwendig, weiter anzupassen.

Der für die 2D-HN-Berechnungen vorgesehene Finite-Elemente-Solver basiert auf der in *Liang und Borthwick (2009)* formulierten Form der Flachwassergleichungen. Dadurch soll die Stabilität der numerischen Lösung sowohl bei allmählich als auch bei schnell veränderlichen hydraulischen Randbedingungen gewährleistet werden. Als Software-Paket für die Programmierung der numerischen Lösung wird das DIFFPACK Development Framework der Firma

inuTech (Nürnberg) eingesetzt, welche ebenfalls in das Forschungsprojekt eingebunden ist.



Abbildung 2: Typische Geobasisdaten (links; Orthofotos, ATKIS-Gebäude-Daten) als Basis für die Implementierung von Gebäuden als Strömungshindernisse in 2D-HN-Modellen (rechts)

Da eine 3D-HN-Simulation für größere Stadtgebiete aufgrund aktuell bestehender Rechenleistungslimitierungen noch nicht möglich ist, werden mit dem 2D-HN-Modell schnelle und über eine große Fläche reichende Überflutungssimulationen durchgeführt, woraus anschließend objektbezogene hydraulische Randbedingungen für lokale 3D-HN-Simulationen extrahiert werden können.

5 3D-HN-Simulationen

Um sich der Thematik der 3D-HN-Simulationen in urbanen Bereichen anzunähern, wurden unter Nutzung der Software ANSYS-CFX und OpenFOAM erste Berechnungen für ein hochaufgelöstes Gebäude sowie für ein geringer diskretisiertes Stadtgebiet durchgeführt (*Schubert, 2015*). Neben der grundsätzlichen Untersuchung der hard- und softwareseitigen Anforderungen war es ein weiteres Ziel der Testsimulationen, die optimalen Simulationsparameter und –bedingungen (z. B. bezüglich der Geometrie, Netzqualität, Randbedingungen, Turbulenzmodelle etc.) zu identifizieren, womit eine hinreichend genaue Abbildung des Fließverhaltens in komplexen urbanen Gebieten erreicht werden kann.

5.1 Simulationen für hochaufgelöstes Wohnhaus

Erste instationäre Simulationen wurden mit dem Modell eines hochaufgelösten, unterkellerten Wohnhauses (LOD 4) durchgeführt. Die 3D-HN-Simulationen erlauben eine realitätsnahe Abbildung dreidimensionaler, dynamischer Effekte,

wie der Ein- und Durchströmung von Objekten, sowie die Analyse der daraus resultierenden komplexen Druckverhältnisse. Als hydraulische Randbedingung wurde eine Zuflussganglinie mit rapidem Anstieg vorgegeben, wie sie z. B. aus dem plötzlichen Versagen einer baulichen Anlage (z. B. Hochwasserschutzwand) resultieren könnte.

Das unstrukturierte Berechnungsnetz wies bei einer maximalen Elementkantenlänge von 25 cm einen relativ hohen Diskretisierungsgrad auf, so dass das Gesamtmodell aus mehr als 6,3 Mio. Elementen bestand. Beiden 3D-HN-Simulationen, mit ANSYS CFX bzw. mit OpenFOAM, lag diese räumliche Modellauflösung zu Grunde. Es wurden folgende Randbedingungen definiert:

- Zuflussganglinie mit $t_{\text{Anf}} = 0 \text{ s}/Q_{\text{Anf}} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$; $t_{\text{End}} = 20 \text{ s}/Q_{\text{End}} = 118 \text{ m}^3/\text{s}$, womit sich im Modellgebiet maximale Fließgeschwindigkeiten von bis zu 6 m/s ergaben,
- Turbulenzintensität von $I = u/U = 5 \%$ am Ein- und Auslauftrand,
- statische Druckverteilung über den gesamten Auslauftrand.

Zahlreiche weitere Parameter, die im Zuge des Modellsetups definiert werden müssen, beeinflussen die Berechnungsergebnisse. In Abhängigkeit von der Sensitivität der Parameter können diese Abweichungen verhältnismäßig stark ausfallen bzw. bis hin zum Simulationsabbruch infolge numerischer Instabilitäten führen. Um die Anzahl derartiger Fehlerquellen zu minimieren, ist eine sorgfältige Vorsondierung und Analyse dieser Parameter notwendig. Derartige Sensitivitätsanalysen wurden insbesondere für die jeweils wählbaren Turbulenzmodelle durchgeführt, wobei insbesondere

- das k-epsilon-Modell,
- das k-omega-Modell und
- das SST-Modell (SST=Shear Stress Transport)

untersucht worden sind.

Exemplarisch fasst Tabelle 1 die Berechnungszeiten zusammen, die sich für unterschiedliche Turbulenzmodelle und variierende Zeitschrittgrößen ergaben.

Die Berechnungen erfolgten am Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen der TU Dresden (ZIH) unter Nutzung von 16 Kernen des Bull HPC-Clusters. Aus der Tabelle geht hervor, dass das häufig verwendete k-omega-Turbulenzmodell Vorteile hinsichtlich der benötigten Berechnungszeit aufweist, weshalb dieses Modell in zukünftigen Simulationen verwendet werden soll. Darüber hinaus ist zu erkennen, wie die definierte Zeitschrittgröße die Berechnungsdauer beeinflusst.

Tabelle 1 CPU-Dauer unter Vorgabe verschiedener Turbulenzmodelle und Zeitschrittgrößen in ANSYS-CFX

Turbulenzmodell	Zeitschritt		CPU-Dauer
	[s]	[h]	[h]
SST	0,1		309,50
k-epsilon	0,1		282,00
k-omega	0,1		228,25
k-omega	0,5		145,50
k-omega	0,05		287,25

Abbildung 3 beinhaltet Darstellungen der Wasserspiegellagen, die mit beiden CFD-Solvern (mit k-omega Modell) zu einem identischen Simulationszeitpunkt ermittelt worden sind. Bei einer qualitativ guten Übereinstimmung der Simulationsergebnisse sind vereinzelte, lokale Unterschiede erkennbar.

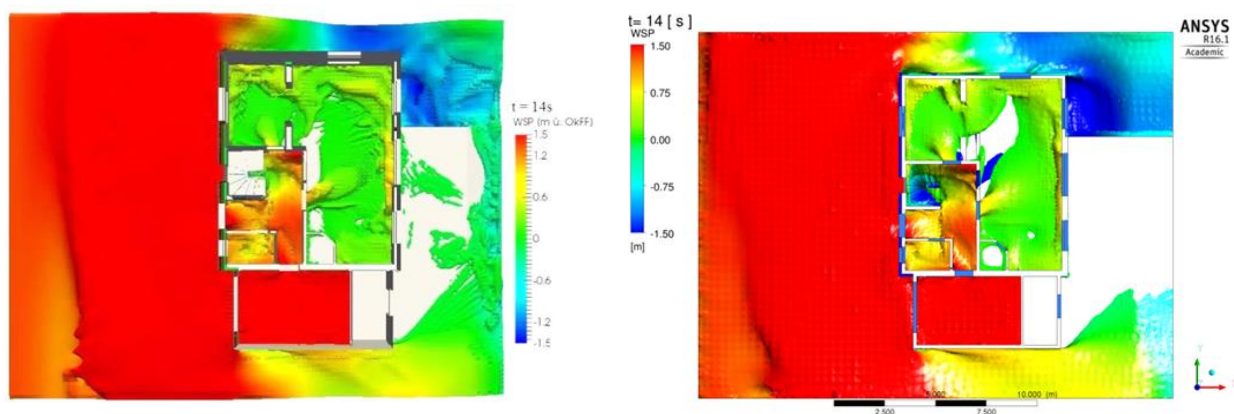


Abbildung 3: Berechnete Wasserspiegellagen zum Zeitpunkt $t=14$ s für hochdynamische Einströmung eines Einfamilienhauses mittels OpenFOAM (links) und ANSYS-CFX (rechts)

5.2 Simulationen im Stadtgebietsmaßstab

Unter Verwendung von OpenFOAM wurden erste 3D-HN-Simulationen für ein vereinfachtes Stadtgebiet durchgeführt (Schubert, 2014). Anschließend wurden die erhaltenen Ergebnisse mit denen einer klassischen 2D-HN-Simulation, welche mit HYDRO_AS-2D durchgeführt wurde, verglichen. Abbildung 4 beinhaltet eine Gegenüberstellung der jeweils erhaltenen Wasserspiegellagen und Überflutungsflächen.

Erwartungsgemäß war der Aufwand sowohl für die Erstellung als auch für die Simulationdurchführung für das 3D-HN-Modell deutlich größer als für die 2D-HN-Simulation. Die Abweichungen, insbesondere hinsichtlich der Ausdehnung der Überflutungsflächen, waren bereichsweise erheblich. Darüber hinaus wurde

festgestellt, dass die Festlegung äquivalenter (2D/3D) hydraulischer Randbedingungen nicht trivial ist und weitere Untersuchungen erfordert (z. B. Verhinderung von Reflexionseffekten in 3D-HN-Simulationen).

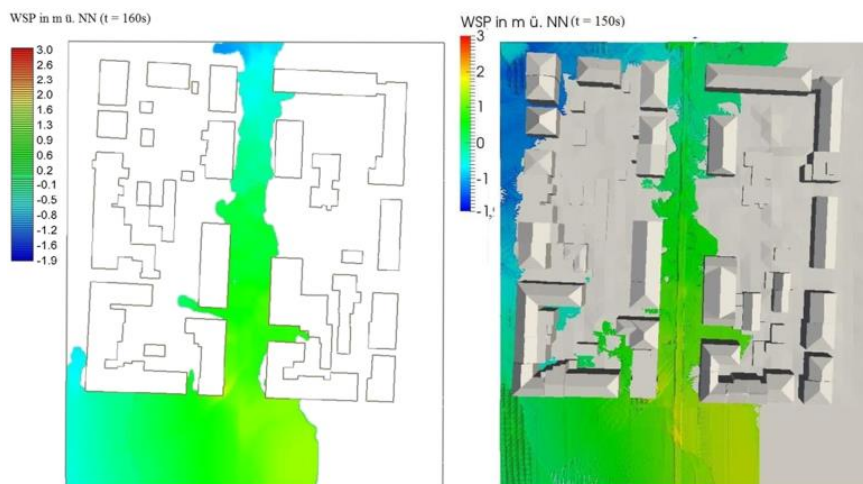


Abbildung 4: Berechnete Wasserspiegellagen zu näherungsweise identischen Zeitpunkten einer Hochwassersimulation innerhalb eines Stadtgebiets mittels eines 2D-HN-Modells (links, HYDRO_AS-2D) und eines 3D-HN-Modells (rechts, OpenFOAM); (Quelle: Schubert, 2014)

Ein 3D-HN-Modell besitzt jedoch gegenüber dem 2D-Ansatz insbesondere dahingehend Vorteile, dass das An-, Ein- und Umströmverhalten z. B. von Gebäuden, Durchfahrten, Gassen, Straßen (für Starkniederschlagsereignisse) oder Innenhöfen (mit Durchfahrten) realitätsnäher abgebildet werden kann. In Abhängigkeit von den jeweiligen Untersuchungszielen wird der Mehraufwand der 3D-HN-Analysen fallweise gerechtfertigt oder ist sogar unumgänglich.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Wie oben erwähnt fokussiert die erste Phase des Forschungsprojekts auf die Untersuchung der grundsätzlichen Machbarkeit der Transformation der 3D-Stadtmodell-Daten in HN-Modelle sowie auf die direkte Rückübertragung und Darstellung der Simulationsergebnisse in die Stadtmodelle. Neben der Entwicklung der benötigten Schnittstellen stehen die Entwicklung (2D-Modell) und die zweckmäßige Anpassung (3D-Modell) der hydronumerischen Solver im Mittelpunkt der derzeitigen Bearbeitung.

So wird aktuell ein vereinfachtes 3D-HN-Modell erprobt, welches einige wesentliche Komponenten eines urbanen Gebiets beinhaltet (Abbildung 5). Aus hydronumerischer Sicht weist dieses Modell eine deutlich höhere Komplexität auf als die sonst üblichen 2D-HN-Modelle, da nun z. B. eine tiefendifferenzierte

Analyse der Strömungsverhältnisse und daraus resultierender Effekte (z. B. WSP-Lage in Flusskrümmungen) und Einwirkungen möglich wird.

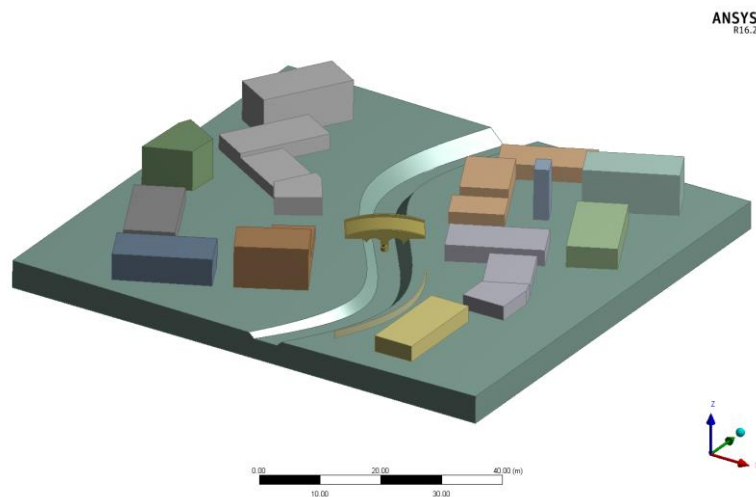


Abbildung 5: Vereinfachtes Stadtmodell für 3D-HN-Simulationen unter Verwendung von ANSYS-CFX

Neben mehreren Gebäuden im LOD 1 beinhaltet das Modell u. a. eine Brücke, Hochwasserschutzwände, verschiedene sowie verschiedene lokale Rauheiten. Ziel ist es dabei, neben der dreidimensionalen Abbildung des Strömungsverhaltens an diesen Elementen, die soft- und hardwareseitigen Erfordernisse und Limitierungen weiter zu untersuchen. Bei der Erstellung des fiktiven Modellgebiets wurde sich an den Gegebenheiten der Elbe zwischen Marienbrücke und Carolabrücke im Stadtgebiet Dresdens orientiert.

Durch den hier verfolgten neuen Ansatz der Verknüpfung semantischer 3D-Stadtmodelle mit hydronumerischen Solvern soll zu einer Weiterentwicklung des modernen Hochwasserrisikomanagements beigetragen werden. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass infolge der rasanten Entwicklung auf dem Gebiet der Gebäudedigitalisierung, wie z. B. dem Building Information Modeling (BIM), zahlreiche weitere Informationen auf der Einwirkungs- (Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten etc.) und auf der Widerstandsseite (Gebäudeelemente, innere Gebäudestruktur etc.) in Zukunft miteinander verknüpft werden können, um so z. B. Prognosen bezüglich einer evtl. Tragsicherheitsgefährdung oder zu erwartender Schäden an Gebäuden zu ermöglichen. Generell ist davon auszugehen, dass semantische, virtuelle Stadtmodelle zunehmend als Basis für weitere Planungsaufgaben in urbanen Räumen eingesetzt werden.

7 Literatur

- Gröger, G.; Kolbe, T.H.; Nagel, C. and Häfele K.H. (2012): OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Open Geospatial Consortium OpenGIS Encoding Standard OGC 12-019, 2012.
- INSPIRE Thematic Working Group Buildings (2013): D2.8.III.2 INSPIRE Data Specification on Buildings – Draft Technical Guidelines. INSPIRE, 214 pages.
- Liang, Q.; Borthwick, A. (2009): Adaptive quadtree simulation of shallow flows with wet-dry fronts over complex topography. *Computers & Fluids* 38. S. 221–234.
- Schubert, H. (2015): Hydronumerische Strömungssimulationen zur Untersuchung des Fließverhaltens und der Einwirkungen auf Gebäude bei Hochwasser. Diplomarbeit. Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik. TU Dresden. 2015.
- Trometer, S.; Mensinger, M. (2014): Simulation von Detonationsszenarien im urbanen Umfeld. In: T. H. Kolbe, R. Bill und A. Donaubauer (Hg.): *Geoinformationssysteme 2014, Beiträge zur 1. Münchner GI-Runde*. München. Berlin: Wichmann, S. 150–164.
- Trometer, S.; Mensinger, M. (2014): DETORBA - Detonationsszenarien im urbanen Umfeld - Neue Möglichkeiten mit GIS-basierten Stadtmodellen. BMBF-Innovationsforum „Zivile Sicherheit“ 07.-09. Mai 2014. Berlin, 2014.

Autoren:

Dr.-Ing. Torsten Heyer
Dipl.-Ing. Hellen Hammoudi
M. Sc. Roberto Tatis Muvdi

Dr.-Ing. Stefan Trometer

Institut für Wasserbau und THM (IWD)
Technische Universität Dresden
George-Bähr-Straße 1
01062 Dresden

CADFEM GmbH
New Business Development - Digital City
Marktplatz 2
85567 Grafing b. München

Tel.: +49-(0)351 463 34397
Fax: +49-(0)351 463 37120
E-Mail: torsten.heyer@tu-dresden.de
hellen.hammoudi@tu-dresden.de
roberto.tatis_muvdi@tu-dresden.de

Tel.: +49-(0)8092-7005-35
Fax: +49-(0)8092-7005-570
E-Mail: strometer@cadfem.de

Dr. rer. nat. Arne Schilling

virtualcitySYSTEMS GmbH
Tauentzienstraße 7 b/c
10789 Berlin

Tel.: +49-(0)30-8904871-10
Fax: +49-(0)30-8904871-19
E-Mail: aschilling@virtualcitysystems.de