

CADFEM GmbH, Grafing b. München  
virtualcitySYSTEMS GmbH, Berlin  
Technische Universität Dresden, Fakultät  
Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Technische  
Hydromechanik, Professur Wasserbau

**Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum auf  
der Basis von gekoppelten hydrodynamisch-  
numerischen Modellen und 3D-Stadtmodellen  
(Phase 1)**

Abschlussbericht über Phase 1 eines  
Entwicklungsprojektes, gefördert unter AZ 32125-23 von  
der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Stefan Trometer,  
Dr. rer. nat. Arne Schilling  
Dr.-Ing. Torsten Heyer  
und Dr.-Ing. Klaus Mager

April 2017

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>32125</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>210.827 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Entwicklung eines Simulationsverfahrens für eine verbesserte Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum auf der Basis von gekoppelten hydrodynamisch-numerischen Modellen und 3D-Stadtmodellen</b>				
<b>Stichworte</b>	Wasser, Verfahren, Hochwasser, Simulation, Gebäude, Hochwasserrisikoanalyse, 3D-Stadtmodelle, Stadtsimulation, Hochwasserschäden, Überflutungsszenarien, Hochwasserrisikomanagement				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>21 Monate</b>	<b>06.07.2015</b>	<b>31.03.2017</b>	<b>Phase 1 (von 2)</b>		
Zwischenbericht	01	06.07.15-31.03.2016			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	CADFEM GmbH Marktplatz 2 85567 Grafing b. München			Tel	08092 7005-35
				Fax	08092 7005-570
				Projektleitung	Dr.-Ing. Stefan Trometer
				Bearbeiter	Dr.-Ing. Stefan Trometer
<b>Kooperationspartner</b>	virtualcitySYSTEMS GmbH, Tauentzienstraße 7 b/c, 10789 Berlin				
	Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, George-Bähr-Straße 1, 01062 Dresden				

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Im jahreszeitlichen Abflussrhythmus der Flüsse oder als Folge starker Niederschläge stellt Hochwasser ein natürliches Ereignis dar. Durch die Einwirkung des Menschen im Bereich der Flurbereinigung oder der zunehmenden Verdichtung und Versiegelung von Oberflächen werden die Auswirkungen von Hochwasserereignissen verstärkt. Für Mensch und Umwelt bedeuten Hochwasser eine erhebliche Belastung, da große Schäden an Gebäuden, Industrieanlagen und landwirtschaftlichen Flächen entstehen, Schadstoffe in die Umwelt gelangen können und enorme Mengen an unbrauchbar gewordenen Gegenständen oder Lebensmittel als Müll zu entsorgen sind. Große Teile der Infrastruktur werden lahmgelegt.

Um ein besseres Hochwasserrisikomanagement in urbanen Regionen zu ermöglichen, planten die Kooperationspartner ein Simulationsverfahren zu entwickeln, in dem erstmals hydrodynamisch-numerische (HN-) Berechnungen direkt mit detaillierten 3D-Stadtmodellen kombiniert und über eine 3D-Stadtmodellplattform anschaulich veröffentlicht werden.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Im Projekt sollte zunächst in Phase 1 eine neuartige Methodik zur Hochwassersimulation an vereinfachten Modellen entwickelt und damit deren allgemeine Machbarkeit, Vorteile und Potentiale bewiesen werden, bevor in Phase 2 die Entwicklungen zur detaillierten und kombinierten Analysefunktionalität finalisiert, auf Realszenarien übertragen und validiert werden sollen. Dazu wurden in Phase 1 Ausschnitte in einem detaillierten 3D-Modell der Stadt Dresden (Pilotstrecke) festgelegt und zu übertragende Attribute definiert. Das Stadtmodell war dabei zunächst auf die Anforderungen für Hochwassersimulationen anzupassen. Weitere hydraulisch relevante Daten wurden ergänzt, so dass Oberflächenabflussmodelle erstellt werden konnten. Parallel wurde eine Schnittstelle zur automatischen Übertragung von 3D-Stadtmodellen in HN-Modelle entwickelt und anhand von Ausschnitten für die Pilotstrecke Dresden getestet. Mit vereinfachten 2D-HN-Modellen wurden schnelle Analysefunktionalitäten entwickelt, während die 3D-HN-Modelle detailliertere Ergebnisse liefern sollten. Die Simulationsergebnisse wurden durch geeignete Darstellungsformen in den 3D-Stadtmodellen visualisiert. Phase 1 schloss mit der Durchführung und Validierung von 2D- und 3D-Hochwassersimulationen für die Pilotstrecke Dresden ab.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Klassische 3D-Stadtmodelle der sächsischen Landeshauptstadt Dresden wurden für die Simulation aufbereitet und durch weitere Informationen für hydrodynamische Simulationen ergänzt, wie z.B. durch flächige Landnutzungsklassen oder die Bathymetrie der Elbe. Von der Stadt Dresden wurden digitale Gebäudemodelle in den Auflösungen LoD2 und 3 bereitgestellt. Vom Stadtvermessungsamt Dresden wurde ein digitales Geländemodell der Landbereiche und von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes Höhenangaben für die Gewässersohle der Elbe zur Verfügung gestellt. Eine Zusammenführung des bestehenden Stadtmodells mit den Oberflächenmodellen der Land- und Flussbereiche (inkl. der Übergangsbereiche) ist gelungen, wodurch eine wesentliche Voraussetzung für die Erzeugung der HN-Modelle bzw. für die Durchführung von Abflusssimulationen erfüllt wurde.

Generische Objekte wie Brücken, Mauern oder Terrassen standen ursprünglich als CAD-Modelle in niedriger Qualität zur Verfügung. Speziell für diese Modelle wurde ein manueller Prozess für die Aufbereitung und Modellintegration in das Stadtmodell entwickelt und exemplarisch für die Augustusbrücke umgesetzt. Dabei zeigte sich, dass die Vor- und Aufbereitung des Stadtmodells für die Hochwassersimulation anspruchsvoller und umfangreicher ist als zunächst gedacht, wobei sich speziell die Herstellung der geometrischen Konsistenz als besondere Herausforderung erwies. Insbesondere mussten die CAD-Modelle der Brücken manuell nachbearbeitet werden, die in der hier verfolgten Anwendung eine Sonderrolle einnehmen, da sie bei extremen Hochwasserereignissen als mögliche Rückstauursachen einen erheblichen Einfluss auf die Überflutungscharakteristik eines urbanen Raumes haben können (Beispiel: Stadt Grimma beim HW 2002).

In Phase 1 wurde eine webbasierte 3D Stadtmodellplattform aufgebaut, welche den Datenaustausch aus einem bzw. in ein Stadtmodell ermöglicht. Die Funktionalität dieser Entwicklung wurde für das Fallbeispiel Dresden getestet und nachgewiesen. Die Plattform ist anwenderfreundlich und vereinigt Geländemodelle, Flussbathymetrie, flächige Landnutzungsklassen, Bruchkanteninformationen, Gebäudemodelle verschiedener Detaillierung und generische Objekte, wie z. B. Brücken, miteinander.

Von der TU Dresden wurde mit der Entwicklung eines eigenen 2D-Simulationstools (2D-HN-Solver) begonnen, mit dem, basierend auf den über die Web-Plattform bereitgestellten Informationen, schnelle und großflächige Überflutungssimulationen im Stadtgebiet durchgeführt werden können. Dadurch sollen u. a. auch die hydraulischen Randbedingungen für 3D-Simulationen, welche an ausgewählten Bauwerken kleinräumiger und hochauflösender durchgeführt werden könnten, ermittelt werden.

Erste 3D-Simulationen (Solver: ANSYS CFD) wurden zunächst an einem vereinfachten, fiktiven Stadtmodell getestet und mit Ergebnissen aus 2D-Simulationen verglichen. Dadurch konnte der daraus resultierende Berechnungsaufwand (Berechnungsdauer, Datenvolumen) quantifiziert, die Vorteile und Potentiale der 3D- gegenüber den 2D-Simulationen nachgewiesen sowie ein optimiertes Simulations-setup herausgearbeitet werden. Für einen Ausschnitt um die Augustusbrücke in Dresden sind 3D-Simulationen für reale Geometrie- und Randbedingungen gelungen. Das Modell wurde an den realen Beobachtungs- und Messergebnissen des Elbehochwassers 2013 im Stadtgebiet Dresdens validiert.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

- Vortrag beim chinesisch-deutschen Sino-German-Symposium 2016 in Shanghai
- Vortrag und Veröffentlichung beim 39. Dresdner Wasserbaukolloquiums, März 2016
- Vortrag auf der 34. CADFEM ANSYS Simulation Conference am 07.10.2016 in Nürnberg.

## ***Fazit***

Die erste Phase des FuE-Projekts war auf die Untersuchung der grundsätzlichen Machbarkeit der Transformation von 3D-Stadtmodell-Daten in HN-Modelle sowie auf die direkte Rückübertragung und Darstellung der Simulationsergebnisse in die Stadtmodelle fokussiert. Beides führte zu sehr positiven Ergebnissen, weshalb in der zweiten Phase des Vorhabens folgenden Zielen erreicht werden sollen:

- Entwicklung der detaillierten Analysefunktionalität als Kombination von schnellen großflächigen 2D-Analysen mit detaillierten kleinräumigen 3D-Analysen; komplexere Realszenarien; Validierung
- Weiterentwicklung der 3D Stadtmodellplattform mit der Stadtmodell / HN-Modell-Interaktion
- Finalisierung/Optimierung des 2D-HN-Solvers und automatisierte Einbindung in die Prozesskette
- Teilautomatisierte Erstellung bzw. Bereinigung komplexer Geometriemodelle (z. B. Brücken) zur Gewährleistung der Berechnungsstabilität (HN-Simulationen); verbesserte Visualisierung

# Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen .....	2
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen .....	4
1 Zusammenfassung.....	5
2 Einleitung.....	6
3 Hauptteil .....	10
3.1 Übersicht der Arbeitsschritte und angewandten Methodik .....	10
3.2 Darstellung der erzielten Ergebnisse.....	11
3.2.1 Aufbau einer 3D Stadtmodellplattform zur Datenbereitstellung.....	11
3.2.2 Kombination von Bathymetrie mit Geländedaten .....	14
3.2.3 Beispielhafte Auswahl eines geeigneten Stadtmodellausschnittes .....	15
3.2.4 Erstellung von Strömungsmodellen.....	16
3.2.5 Durchführung erster vereinfachter 3D Strömungssimulationen.....	17
3.2.6 Optimierung der erster vereinfachter 3D Strömungssimulationen.....	22
3.2.7 Bewertung von Strategien zur 2D Flachwassermodellierung .....	23
3.2.8 Entwicklung einer eigenen schnellen Analysefunktionalität .....	26
3.2.9 Modellvorbereitung für den Anwendungsfall Dresden.....	29
3.2.10 3D-Hochwassersimulationen für den Anwendungsfall Dresden.....	33
3.3 Diskussion der Ergebnisse.....	37
3.4 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse .....	39
3.4.1 Ökologische Bewertung .....	39
3.4.2 Technologische Bewertung.....	40
3.4.3 Ökonomische Bewertung .....	41
3.5 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse .....	41
4 Fazit.....	42
Literaturverzeichnis .....	44

# Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1: Dresdner Hauptbahnhof beim Hochwasser im Jahr 2002 .....	5
Abbildung 2: Darstellungen von potenziellen Überflutungsflächen der Elbe im Stadtgebiet Dresdens ohne (links) und mit (rechts) Hochwasserschutzmaßnahmen basierend auf Simulationsergebnissen des IWD der TU Dresden .....	7
Abbildung 3: Flussdiagramm der verfolgten Methodik zur verbesserten Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum.....	10
Abbildung 4: Webbasierte 3D Stadtmodellplattform von Dresden .....	12
Abbildung 5: Exemplarische Polygonauswahl eines Modellausschnitts für Hochwasseranalysen .....	12
Abbildung 6: Kombination eines LoD2-Stadtmodells mit einem digitalen Geländemodell .....	13
Abbildung 7: Workflow zur Übertragung der Stadtmodelle in die Simulationsumgebung.....	13
Abbildung 8: Verschneidung des digitalen Geländemodells mit der Bathymetrie der Elbe und exemplarische Aufbereitung eines optimierten TIN .....	15
Abbildung 9: Modellierter Unterführung an der Brühlschen Terrasse im Kontext von Stadt- und Geländemodell.....	16
Abbildung 10: Definition des Strömungsmodells (rechts im Bild) als Negativ eines fiktiven 3D-Stadtmodells (links im Bild).....	16
Abbildung 11: Wasserspiegellage bei beginnendem Hochwasser. Die rückstauende Wirkung der Brücke wird deutlich. ....	17
Abbildung 12: Geschwindigkeitsverteilung nach 1750 s für ein feineres (links) und ein gröberes (rechts) Rechengitter bei gleichen hydraulischen Randbedingungen	18
Abbildung 13: Darstellung des Simulationsergebnisses bei unterschiedlichem Füllungsgrad der Elemente nach 250 s bei beginnender Umströmung der Hochwasserschutzmauer .....	19
Abbildung 14: Fließgeschwindigkeitsdarstellung, Fall 1 (MQ-Szenario) .....	20
Abbildung 15: Fließgeschwindigkeitsdarstellungen, Fall 2 (HQ-Abfluss).....	20
Abbildung 16: Fließgeschwindigkeitsdarstellungen, Fall 3 (Bordvoller HQ-Abfluss)..	21
Abbildung 17: Fließgeschwindigkeitsdarstellungen, Fall 4 (HQ-Abfluss mit versagender HWS-Mauer, $t = 440$ s nach dem Bruch).....	21
Abbildung 18: Darstellung lokaler Verteilung und der zeitlichen Änderung der Druckeinwirkung auf die HWS-Mauer und die angrenzenden Gebäude .....	22
Abbildung 19: Darstellung der Überströmung des Brückenbauwerks im fiktiven Stadtmodellausschnitt in Form eines vertikalen Schnittes längs des Flusslaufes	23
Abbildung 20: Vergleich der Berechnungsergebnisse der 2D-Verfahren (links und rechts) mit der 3D-Berechnung mit ANSYS (Mitte); dargestellt ist die Fließtiefe [m]; Fließrichtung von Süd nach Nord .....	24
Abbildung 21: Testsimulation Dresdner Innenstadt (OW-Pegel = 110.87 müNN) mit dem vereinfachten 2D-Modell LISFLOOD; visualisiert in der 3D Stadtmodellplattform.....	25
Abbildung 22: Fließtiefen für das LISFLOOD-ACC-Modell und das IWD-Modell im Stadtgebiet von Dresden (oben) und Auswertung der Unterschiede zwischen beiden Ergebnissen (unten) .....	26
Abbildung 23: Testfall 1 – Ausbreitung einer Tsunami-Welle als zentrierte, glockenförmige Erhebung von 10 cm Höhe.....	27
Abbildung 24: Testfall 2 – Dammbbruch mit einer Fallhöhe von 3 m.....	28

Abbildung 25: Ermittlung des Berechnungsgitters für 2D-HN-Simulationen durch Verschneidung verschiedener geometrischer Informationen am Beispiel der Stadt Dresden .....	28
Abbildung 26: Definiertes Untersuchungsgebiet in Dresden .....	29
Abbildung 27: Gebietsauswahl in der 3D-Stadtmodellplattform (links) und Definition des Detailbereichs um Augustusbrücke und Terrassenufer für erste 3D-Untersuchungen (rechts) .....	29
Abbildung 28: Augustusbrücke und Terrassenufer mit Durchfahrten als neuralgische Punkte im Abfluss der Elbe im Stadtbereich von Dresden .....	30
Abbildung 29: Augustusbrücke und Terrassenufer beim Hochwasser am 04.06.2013, 16:30 Uhr (Quelle: Sächsische Zeitung) .....	30
Abbildung 30: Import der 3D-Geometrie des Szenarios um die Augustusbrücke in die Simulationsumgebung von ANSYS .....	31
Abbildung 31: Import des zur Verfügung gestellten und unzureichenden Flächenmodells der Augustusbrücke in ANSYS SpaceClaim .....	31
Abbildung 32: Darstellung der letzten Prozessschritte bei der Aufbereitung des Brückenmodells zu einem konsistenten Volumenmodell.....	31
Abbildung 33: Zusammenführung der aufbereiteten Einzelmodelle (oben) für die Definition des negativen Wasservolumenkörpers, dargestellt als Querschnitt im Brückenbereich (unten) .....	32
Abbildung 34: Geschwindigkeitsverteilung der Elbe im Bereich der Augustusbrücke als Ergebnis einer 3D-Simulation (MQ-Szenario) .....	33
Abbildung 35: Wasserspiegellage der Elbe im Bereich der Augustusbrücke als Ergebnis einer 3D-Simulation (MQ-Szenario) .....	33
Abbildung 36: Wasserspiegellage im Bereich des Lattenpegels an der Augustusbrücke (Pegel „Dresden 1“) (HQ-Szenario, HW 2013, Q = 3910 m <sup>3</sup> /s)	34
Abbildung 37: Wasserspiegellage am albstadtseitigen Widerlager der Augustusbrücke (HQ-Szenario, HW 2013, Q = 3910 m <sup>3</sup> /s) .....	34
Abbildung 38: Schnittdarstellung der Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der Augustusbrücke (HQ-Szenario, HW 2013, Q = 3910 m <sup>3</sup> /s, blau = Luft) .....	35
Abbildung 39: Darstellung der Geschwindigkeitsverteilungen im Bereich der Augustusbrücke in Längsschnitten auf Höhe eines Brückenpfeilers (oben) und im vorgelagerten Bogenbereich (unten) (HQ-Szenario, HW 2013, Q = 3910 m <sup>3</sup> /s, blau = Luft) .....	36
Abbildung 40: Darstellung der Druckverteilung auf die Augustusbrücke (HQ-Szenario, HW 2013, Q = 3910 m <sup>3</sup> /s) .....	36

Tabelle 1: Modellvarianten des fiktiven Stadtmodells für ANSYS-CFX-Simulationen18

## Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

2D bzw. 3D	zwei- bzw. dreidimensional
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
EG-HWRM-RL	EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
DGM	Digitales Geländemodell
HN	hydrodynamisch-numerisch
HQ	Hochwasserabfluss
HQ100	Hochwasserabfluss mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren (Abfluss, der (statistisch) einmal in 100 Jahren erreicht oder überschritten wird)
HW	Hochwasser
IWD	Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden
LoD	Level of Detail (des Stadtmodells bzw. der darin integrierten Gebäude)
MQ	Mittelwasserabfluss
TIN	Triangulated Irregular Network
VCS	virtualcitySYSTEMS GmbH
W-Q-Beziehung	Abflusskurve eines Gewässerprofils - Zusammenhang zwischen Wasserstand W und Abfluss Q

# 1 Zusammenfassung

Im jahreszeitlichen Abflussrhythmus der Flüsse oder als Folge starker Niederschläge stellt Hochwasser ein natürliches Ereignis dar. Durch die Einwirkung des Menschen im Bereich der Flurbereinigung oder der zunehmenden Verdichtung und Versiegelung von Oberflächen werden die Auswirkungen von Hochwasserereignissen verstärkt.

Für Mensch und Umwelt bedeuten Hochwasser eine erhebliche Belastung, da, neben der Gefährdung von Leben und Gesundheit, auch große materielle Schäden an Gebäuden, Industrieanlagen und landwirtschaftlichen Flächen entstehen, Schadstoffe in die Umwelt gelangen können oder enorme Mengen an unbrauchbar gewordenen Gegenständen oder Lebensmittel als Müll zu entsorgen sind. Häufig werden große Teile der Infrastruktur lahmgelegt (siehe z. B. Abbildung 1), woraus sich neben den erwähnten direkten auch erhebliche indirekte Schäden (Produktionsausfall etc.) ergeben.



Abbildung 1: Dresdner Hauptbahnhof beim Hochwasser im Jahr 2002

In jüngerer Vergangenheit verursachten u. a. die Hochwasser der Jahre 2002 und 2013 in Sachsen und Sachsen-Anhalt Schäden in Milliardenhöhe. Dennoch geraten Erkenntnisse oder Erfahrungen, die während solcher Ereignisse gesammelt wurden, mit zunehmender Dauer von hochwasserfreien Perioden wieder in Vergessenheit bzw. fehlen in Regionen, die bisher nicht betroffen waren, aber dennoch potenziell gefährdet sind.

Um ein besseres Hochwasserrisikomanagement speziell in urbanen Regionen, welche durch hohe Schadenspotenziale charakterisiert sind, zu ermöglichen, entwickeln die Kooperationspartner CADFEM GmbH, virtualcitySYSTEMS GmbH und das Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) der TU Dresden eine Simulationsmethodik, worin erstmals hydrodynamisch-numerische (HN) Berechnungen unmittelbar mit detaillierten 3D-Stadtmodellen kombiniert werden. In der jetzt vor dem Abschluss stehenden Phase 1 wurden Stadtmodelle für die HN-Berechnungen analysiert und aufbereitet sowie die grundsätzliche Machbarkeit von 2D- und 3D-Hochwassersimulationen auf dieser Basis nachgewiesen. Aufgrund der positiven Erfahrungen aus Phase 1 wird angestrebt, das Projekt mit Phase 2 wie geplant fortzusetzen, um diese vielversprechende Methodik weiter zu entwickeln. Als Anwendungspartner sind die Landeshauptstädte Dresden und Magdeburg unmittelbar am Projekt beteiligt.

**Die Phase 1 des Entwicklungsvorhabens wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen 32125-23 gefördert.**

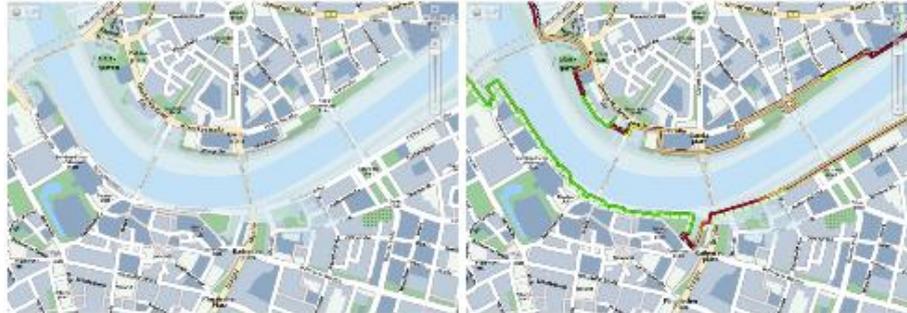
## 2 Einleitung

Nach aktuellem Stand der Technik stützen sich die von der EG-Hochwasserrisiko-management-Richtlinie (EG-HWRM-RL) geforderten Hochwasserrisikoanalysen in urbanen Räumen überwiegend auf Ergebnisse aus 2D-HN-Simulationen. Zu diesem Zweck müssen HN-Modelle bislang für jedes Untersuchungsgebiet manuell aufgebaut werden, denen i. d. R. folgende Daten zu Grunde gelegt werden müssen: Höheninformationen (digitale Geländemodelle), Peilungsdaten (Bathymetrie) der aquatischen Bereiche (Flüsse, Seen), Informationen zur Landnutzung und Oberflächenbeschaffenheit, vereinfachte Berücksichtigung von Strukturen, die das Strömungsverhalten maßgeblich beeinflussen (Häuser, Brücken, Mauern, etc.) sowie hydraulische Randbedingungen (z. B. Zu- bzw. Abflüsse an den Modellgrenzen).

Erfahrungsgemäß ergeben sich bei der herkömmlichen Modellerstellung größte Schwierigkeiten im Hinblick auf die initiale Datenbeschaffung, -sichtung und -aufbereitung, da die Informationen meist von unterschiedlichen Quellen (Kommune, Landesvermessungsamt, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung) bezogen werden müssen. Eine weitere Herausforderung ist die Kontrolle der Daten bezüglich der Aktualität bzw. des Zeitpunkts der Datenerfassung. Üblicherweise werden in einem HN-Modell Daten unterschiedlicher Erfassungszeiträume vereint, so dass ein Zustand abgebildet wird, der in der Realität in dieser Form nicht auftritt bzw. aufgetreten war. Mit besonderem Bezug auf die urbanen Bereiche bedeutet dies, dass aktuell existierende Strukturen (meist Gebäude) im HN-Modell noch nicht enthalten sind bzw. real nicht mehr vorhandene Bauwerke noch immer enthalten sein können, woraus sich erhebliche Auswirkungen für Prognosen zur Überflutungscharakteristik ergeben können. Aus den erwähnten Gründen stellt die im Rahmen des Forschungsprojekts angestrebte Entwicklung einer Methodik, die u. a. auf eine unmittelbare und der Problemstellung (hier: Hydraulik) angepasste zentrale Zusammenführung und Aktualisierung verfügbarer Datenquellen in Form einer 3D Stadtmodellplattform abzielt, einen wesentlichen Fortschritt dar. Über diese Stadtmodellplattform wird eine direkte Überführung aktuell verfügbarer Informationen in ein Simulationsmodell ermöglicht. Die 3D Stadtmodellplattform dient darüber hinaus auch zur Visualisierung aufbereiteter Analyseergebnisse für die Information der Bürger.

Gemäß dem Stand der Technik nutzt z.B. das Umweltamt Dresden zur Ausweisung pegelabhängiger Überflutungsflächen der Elbe im Stadtgebiet die Simulationsergebnisse eines 2D-HN-Modells, welches initial durch das IWD erstellt und für Hochwassersimulationen eingesetzt worden ist. Die Überflutungsflächen werden der Bevölkerung als kartografische, zweidimensionale Informationen zur Verfügung gestellt (s. Abbildung 2). Da diese Karten Prognosecharakter besitzen, erfolgt nach jedem Hochwasserereignis eine Überprüfung über den Vergleich mit den real aufgetretenen Überflutungsflächen, welche ihrerseits häufig Nachrechnungen mit einem angepassten Modell nach sich ziehen. Als wesentliche Nachteile erwiesen sich bislang die eingeschränkten Möglichkeiten der Visualisierung und Validierung der Ergebnisse aus den Simulationen. Auch ist es bislang nicht möglich, die vormodellierten Überflutungsflächen während des Hochwassers anzupassen, um auf beobachtete Abweichungen reagieren und ggf. Prognosen korrigieren zu können. Automatisierte Prozesse bis hin zur Visualisierung von Ergebnissen auf Basis der 3D-Stadtmodellplattform sollen hierbei zu einer deutlichen Verbesserung der aktuellen Situation beitragen.

Darüber hinaus ist die Durchführung detaillierter HN-Simulationen für hochwassergefährdete Siedlungsgebiete an kleineren kommunalen Fließgewässern häufig zu kostenintensiv. Dennoch sind auch hier die Erstellung von Gefahrenkarten und die Erarbeitung von Risikomanagementplänen gefordert. Die unter Beteiligung der Städte Dresden und Magdeburg zu erarbeitenden Basistechnologien werden in Form konkreter Demonstratoren aufbereitet, die auch auf kleinere Kommunen, welche über ein digitales Stadtmodell verfügen, anwendbar sind, wodurch auch dort ein verbessertes Hochwasserrisikomanagement ermöglicht werden soll.



Quelle: [www.dresden.de](http://www.dresden.de)

Abbildung 2: Darstellungen von potenziellen Überflutungsflächen der Elbe im Stadtgebiet Dresdens ohne (links) und mit (rechts) Hochwasserschutzmaßnahmen basierend auf Simulationsergebnissen des IWD der TU Dresden

Das vorliegende Projekt trägt im Rahmen der Hochwasserrisikoanalyse sowie des Hochwasserrisikomanagements im urbanen Raum dazu bei, Maßnahmen im Vorfeld von Hochwasserereignissen besser planen und somit u. a. die Bevölkerung, Gebäude oder Industrieanlagen zukünftig besser schützen zu können.

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Schaffung der notwendigen Voraussetzungen sowie die Bereitstellung von Hilfsmitteln und Methoden für ein verbessertes Hochwasserrisikomanagement in Städten und Kommunen. Es soll eine praxistaugliche Basistechnologie entstehen, die für Analysen vor (Berechnen von detaillierten Szenarien), während (Anpassungen an den tatsächlichen Ablauf innerhalb kurzer Zeit, als Entscheidungshilfe zur Planung von Hochwasserabwehrmaßnahmen) und nach einem Hochwasser (Aufnehmen neuen Wissens, Ereignisanalyse, Nachkalibrierung) eingesetzt werden kann.

Im Vorhaben sollen erstmals 3D-Stadtmodelle und HN-Modelle (2D und 3D) für den vorbeugenden Hochwasserschutz direkt miteinander verknüpft und über eine webbasierte Stadtmodellplattform bereitgestellt werden. Dies dient der nachhaltigen und problemspezifischen Nutzung vorhandener Informationen, die zu einem konsistenten Datensatz vereinigt werden. Dadurch werden auch Wege für notwendige Verbesserungen und Weiterentwicklungen von Stadtmodellen aufgezeigt, wobei damit auch Aspekte eines zentralen, redundanzfreien Datenmanagements adressiert werden. Hydrodynamisch-numerische Berechnungen können somit direkt auf Basis eines bestehenden Stadtmodells vorgenommen werden, so dass der bisher übliche, zeitaufwändige Ablauf der HN-Modellerstellung deutlich komprimiert wird. Bauliche Maßnahmen gegen Hochwasser können dadurch kurzfristiger in ihrer Wirkung überprüft und verbessert werden. Darüber hinaus können bereits vorliegende Simulationsergebnisse mit dem Verfahren validiert werden. Die dadurch möglichen detaillierteren Risikoanalysen erlauben somit ein verbessertes Hochwasserrisikomanagement.

Im Zusammenhang mit Hochwasserrisikoanalysen in urbanen Räumen können Überflutungsprozesse meist bereits durch zweidimensionale HN-Simulationen relativ realitätsnah abgebildet werden, sofern die Bauwerke nur geringfügige 3D Details aufweisen, der Überflutungsvorgang wasserstandsdominiert erfolgt und durch eine relativ geringe Turbulenz gekennzeichnet ist. Dies ist i. d. R. dann gegeben, wenn ein allmählicher Abflussanstieg erfolgt, so dass verhältnismäßig geringe Fließgeschwindigkeiten und somit eine geringe Strömungsturbulenzen auftreten, also keine relevanten dynamischen Effekte vorhanden sind. Derartige Überflutungsprozesse sind der Regelfall für urbane Gebiete, die sich im Mittel- oder Unterlauf eines Fließgewässers befinden. Im Projekt soll die Verknüpfung von 2D-HN-Modellen mit 3D-Stadtmodellen insbesondere für Bereiche gelingen, in denen Bauwerke das Strömungsverhalten maßgeblich beeinflussen, z. B. Brückendurchlässe. Diese stellen eine besondere Herausforderung dar, da sich das Strömungsverhalten in Abhängigkeit vom Verhältnis des Wasserstands zu den Höhenkoten der Bauwerke stark verändern kann. Beispielsweise wird ein Brückenbauwerk bei niedrigen Wasserständen zunächst ausschließlich durchströmt, während es bei hohen Wasserständen sowohl durch- als auch überströmt werden kann. Die unzureichende Abbildung des letztgenannten Strömungsverhaltens ist ein häufiges Manko zweidimensionaler HN-Modelle. Durch die unmittelbare Verknüpfung der HN-Modelle (2D und 3D) mit den 3D-Stadtmodellen können derartige Unzulänglichkeiten identifiziert bzw. vermieden werden. Die 3D Abbildung relevanter Objekte erlaubt zudem eine differenzierte Analyse des komplexeren lokalen Strömungsverhaltens und der tatsächlichen Einwirkungen auf das Objekt.

Eine dreidimensionale Strömungsanalyse (3D-HN-Simulationen) wird wie zuvor beschrieben nicht nur bei Überflutungsszenarien mit komplexeren Objektgeometrien notwendig, sondern auch beim Auftreten von dynamischen Strömungseffekten aus denen sich relevante Verwirbelungen (Turbulenzen) bilden. Derartige Strömungen sind durch signifikante Fließgeschwindigkeiten in alle drei Raumrichtungen gekennzeichnet. Im urbanen Raum können solche Prozesse z. B. infolge von Sturzfluten (im Gebirgsraum bzw. im Oberlauf von Flüssen), Damnbrüchen oder auch durch plötzlich versagende Hochwasserschutzanlagen (Deiche, Mauern, temporäre HWS-Wände) auftreten.

Die Entwicklungsarbeiten folgten im Wesentlichen der nachstehend abgebildeten Arbeitsplanung, wobei es durch die aufgrund von Verwaltungsschwierigkeiten an der TU Dresden verzögerte Einstellung von Mitarbeitern zu einer kostenneutralen Projektverlängerung bis 31.03.2017 kam. Die Meilensteine und angestrebten Ziele wurden erreicht, wobei auch die Identifikation von Schwierigkeiten bzw. aktuell bestehenden Unzulänglichkeiten (z. B. Qualität bestehender Brückenmodelle) sowie die Erarbeitung diesbezüglicher Lösungsstrategien als wesentliche Ergebnisse der ersten Projektphase zu werten sind. Auf dieser Basis kann davon ausgegangen werden, dass die volle Analysefunktionalität und -methodik zum Abschluss der Phase 2 erreicht werden wird.

Für Phase 2 des Projektes besteht u. a. die Zielstellung, 2D- und 3D-HN-Simulationen so zu koppeln und zu verwenden, dass, bei minimiertem manuellem Aufwand, ein unmittelbarer Einsatz über die 3D-Stadtmodellplattform möglich wird und so zur verbesserten Entscheidungsfindung vor, während und nach Hochwasserereignissen beiträgt. Die Simulationsergebnisse sind durch geeignete Darstellungsformen in der 3D-Stadtmodellplattform zu visualisieren, dass sie für die

ggf. von Hochwasserereignissen betroffene Bevölkerung leicht verständlich und handlungsweisend sind.

Zur Durchführung der Projektaufgaben der Phase 1 bestand ursprünglich der folgende Arbeitsplan:

Arbeitsschritte  (Die grau unterlegten Projektschwerpunkte schließen jeweils mit einem Meilenstein.)	2015						2016							
	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.
<b>I. Bereitstellung von Modellen</b>	◆													
1. Festlegung von Ausschnitten im detaillierten 3D-Stadtmodell; Definition von zu übertragenden Attributen	X	X	X											
2. Anpassung Stadtmodell an die Erfordernisse der Hochwassersimulation (Dichtigkeit)		X	X	X										
3. Ergänzung von Stadtmodelldaten mit weiteren, hydraulisch relevanten Daten (z.B. Bathymetrie der Fließgewässer, Oberflächenrauheiten usw.), Entwicklung von Lösungsstrategien zur Implementierung ergänzender Objektarten, z.B. für unterirdische Bauwerke und Gebäudeteile				X	X	X	X							
4. Bereitstellung von hydrodynamisch-numerischen (HN-) Modellen, Entwicklung Oberflächenabflussmodell							X	X	X	X				
<b>1.Meilenstein: HN-Stadtmodelle mit Höheninformationen und Strukturen, die das Strömungsverhalten maßgeblich beeinflussen, liegen vor.</b>											◆			
<b>II. Entwicklung der schnellen Analysefunktionalität</b>	◆													
5. Entwicklung einer Schnittstelle zur automatischen Übertragung grober 3D-Stadtmodelle in HN-Modelle von Simulationsprogrammen	X	X	X	X	X									
6. Test der Schnittstelle mit verschiedenen Ausschnitten aus dem Stadtmodell von Dresden				X	X	X	X							
7. Entwicklung einer schnellen Analysefunktionalität mit einfachen HN-Modellen für Einsatzkräfte								X	X	X	X	X	X	
8. Entwicklung schneller Visualisierungstechniken										X	X	X	X	
<b>2.Meilenstein: Schnelle Analysen inkl. Visualisierung funktionsfähig</b>														◆
<b>III. Entwicklung detaillierte Analysefunktionalität Phase 1</b>	◆													
9. Untersuchung ob die Solver bestehender CFD-Simulationsprogramme die Anforderungen an Hochwassersimulationen erfüllen								X	X	X				
10. Durchführung von vereinfachten 3D-Hochwassersimulationen										X	X	X		
11. Validierung 3D-Hochwassersimulation an vereinfachten Modellen, Erstellung Bericht zum Abschluss von Phase 1													X	X
<b>3.Meilenstein: Machbarkeit von 3D-Hochwassersimulationen an vereinfachten Modellen bewiesen</b>														◆

### 3 Hauptteil

#### 3.1 Übersicht der Arbeitsschritte und angewandten Methodik

Im Projekt wurde eine Kopplung von 3D-Stadtmodellen mit hydrodynamisch-numerischen Modellen für die Simulation von Oberflächenabflüssen bei Hochwasser realisiert. Damit gelingen als Ergebnis von Phase 1 zwei- und dreidimensionale Berechnung von zeit- und ortsabhängigen Wasserspiegellagen, Fließtiefen, Strömungsgeschwindigkeiten sowie daraus ableitbarer Größen (z. B. Strömungskräfte) auf Basis eines digitalen Stadtmodells. Für die Kopplung wurden die Stadtmodelle, die bisher meist nur der Visualisierung dienen, speziell aufbereitet, damit hydronumerische Simulationen unmittelbar aufgesetzt werden können. Beispielsweise müssen geometrische Fehlstellen („Undichtigkeiten“) in den Stadtmodellen, die bei der Visualisierung nicht erkennbar sind bzw. nicht stören, aufgearbeitet werden. Außerdem können gewisse semantische Angaben der Gebäude, wie z.B. Beschaffenheit oder Nutzung, mit übertragen werden, um z. B. Schadenserwartungswerte für verschiedene Überflutungsszenarien direkt abzuleiten. Abbildung 3 zeigt ein vereinfachtes Flussdiagramm der neu entwickelten Methodik zur Hochwasserrisikoanalyse.

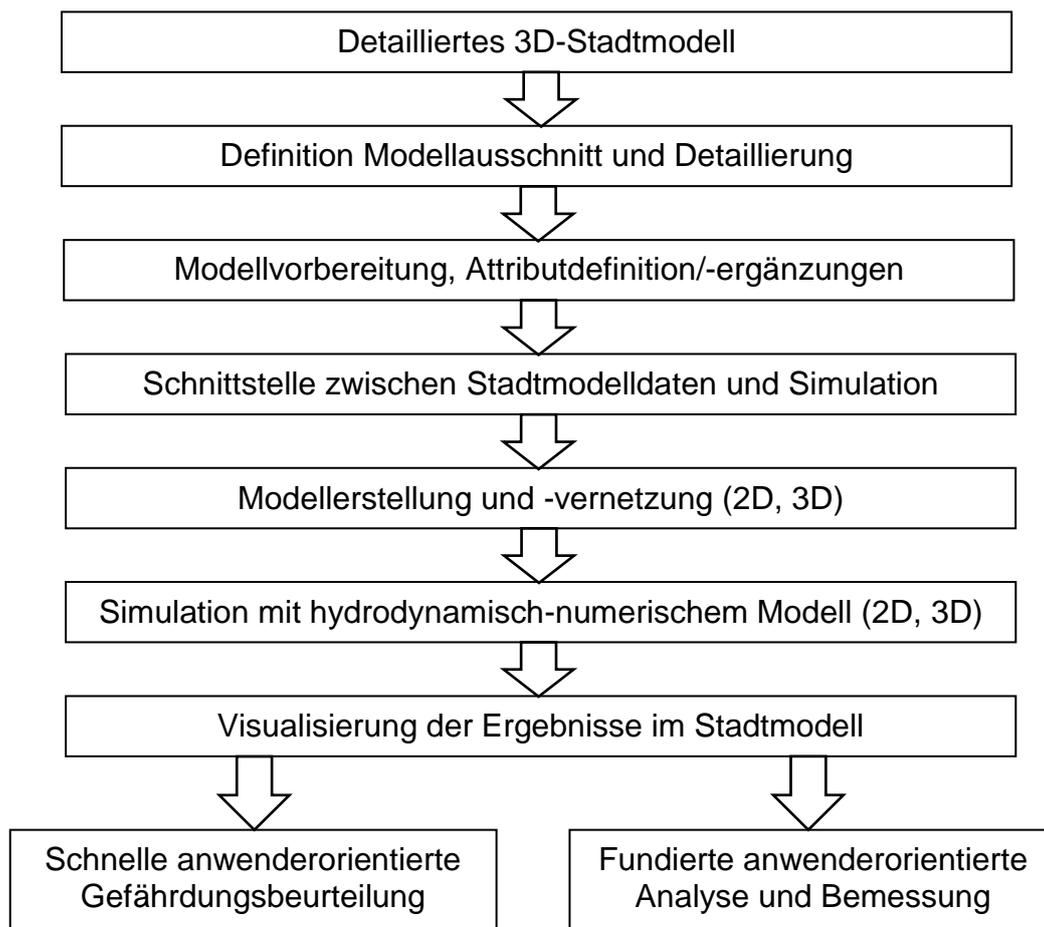


Abbildung 3: Flussdiagramm der verfolgten Methodik zur verbesserten Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum

In Projektphase 1 wurde zunächst die Machbarkeit von 2D- und 3D-Hochwasser-simulationen auf Basis der Stadtmodellplattform an vereinfachten Modellen bewiesen, bevor in Phase 2 eine kombinierte und detaillierte Analysefunktionalität entwickelt (z. B. stärkere Fokussierung auf Kalibrierungsmöglichkeiten) und das Verfahren validiert werden sollen. Dazu wurden in Phase 1 Ausschnitte in einem 3D-Modell der Stadt Dresden festgelegt und zu übertragende Attribute definiert. Das Stadtmodell wurde an die Anforderungen der Hochwassersimulation angepasst. Weitere hydraulisch relevante Daten wurden ergänzt, so dass Oberflächenabflussmodelle erstellt werden konnten. Parallel wurde eine Schnittstelle zur automatischen Überführung der in den 3D-Stadtmodellen vorgehaltenen Daten in funktionsfähige HN-Modelle entwickelt und anhand eines Ausschnitts aus dem Stadtmodell von Dresden im Bereich der Augustusbrücke erfolgreich getestet.

Wie aus Abbildung 3 ersichtlich, wurden im Projekt zwei Ansätze verfolgt: Für Simulationen, die nicht zeitkritisch sind, wurden 3D-HN-Modelle mit hohem Detaillierungsgrad verwendet. Solche Simulationen mit räumlich begrenztem Umfang können mit dem CAE-Programm ANSYS CFD durchgeführt werden. Für schnelle Ergebnisse, die z.B. für "ad hoc"-Simulationen zur Einschätzung der Wirksamkeit technischer Schutzmaßnahmen während des Hochwassers erforderlich sind, wurden Simulationen mit einem schnellen Solver durchgeführt, wobei das Modell eine geringere Detaillierung bzw. stärkere Vereinfachungen beinhaltet. Zu diesem Zweck wurden zunächst bestehende 2D-HN-Modelle eingesetzt, wie z. B. das open-source-Tool Telemac-Mascaret (unstrukturiertes Gitter, sehr detaillierte HN-Berechnung, langsamer) oder das Programm Lisflood (strukturiertes Gitter/Raster, vereinfachte HN-Berechnung, schnell). Diese eignen sich auch für großflächigere Betrachtungen im Maßstab großer Stadtgebiete bzw. ganzer Städte, erfüllen jedoch nicht vollständig die Anforderungen zur Zielerreichung dieses Forschungsprojekts. Aus diesem Grund wurde mit der Entwicklung eines eigenen 2D-HN-Solvers begonnen.

2D-Simulationen (eigentlich 2,5 D Simulationen, da jedem x,y-Knotenpunkt genau eine Höheninformation zugeordnet ist) können zur Berechnung der hydraulischen Randbedingungen für 3D-Simulationen eingesetzt werden, so dass z. B. die Zu- bzw. Abflüsse oder Wasserstände an den Rändern eines kleinräumigeren 3D-HN-Modells aus einem großräumigen 2D-HN-Modell extrahiert werden könnten. Nach dieser Vorgehensweise könnten z. B. Einströmungsszenarien von unterkellerten Wohngebäuden oder Tiefgaragen im Detail simuliert und analysiert werden, wie dies exemplarisch bei Schubert [2015] gezeigt wurde.

## **3.2 Darstellung der erzielten Ergebnisse**

### **3.2.1 Aufbau einer 3D Stadtmodellplattform zur Datenbereitstellung**

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.

Vom Projektpartner VCS wurde ein Online-Portal für das Stadtmodell von Dresden aufgebaut (siehe Abbildung 4). Das Web-Portal umfasst die Funktionen: Auswahl eines rechteckigen oder polygonförmigen Stadtausschnittes (siehe Abbildung 5), Triggern von Datenbankabfragen, Formatkonvertierung in das CAD-Austauschformat STEP (ISO-Standard 10303), Informationen zur Charakterisierung des Modells, wie z.B. Attribute oder LoD-Stufe (Level-of-Detail), sowie die Möglichkeit zum Download dieser Daten und Informationen.



Abbildung 4: Webbasierte 3D Stadtmodellplattform von Dresden



Abbildung 5: Exemplarische Polygonauswahl eines Modellausschnitts für Hochwasseranalysen

Für die online-Bereitstellung der 3D-Stadtmodelle und für die Überführung in das Programm ANSYS wurde ein sog. FME-Server (Feature Manipulation Engine) von SAFE Software aufgesetzt mit direktem Zugriff auf die Datenbanklösung virtualcityDATABASE von VCS zur effizienten Speicherung und Verwaltung von CityGML-Daten. Die FME-Technologie zur Modelltransformation aus der Geoinformatik konnte im Projekt zur Bearbeitung von räumlichen Daten und zur Datentransformation verwendet werden. Verschiedene Formate konnten umgewandelt werden. Da die mit FME erzeugte Datenqualität insbesondere bei der Geländedatenaufbereitung nicht immer zufriedenstellend war, wurde fallweise auch die Software ESRI ArcGIS verwendet.

Zu Testzwecken hat CADFEM Stadtmodelle und Geländemodelle von VCS kombiniert. Ein beispielhaftes Ergebnis zeigt Abbildung 6, in dem ein LoD2-Stadtmodell mit einem digitalen Geländemodell verschnitten und in das Programm ANSYS importiert wurde. Als Vorbereitung für die Simulation wird die Triangulierung des Geländes in eine Elementierung überführt. Dies gelingt nur bei einer hochwertigen konsistenten Geometriedefinition.

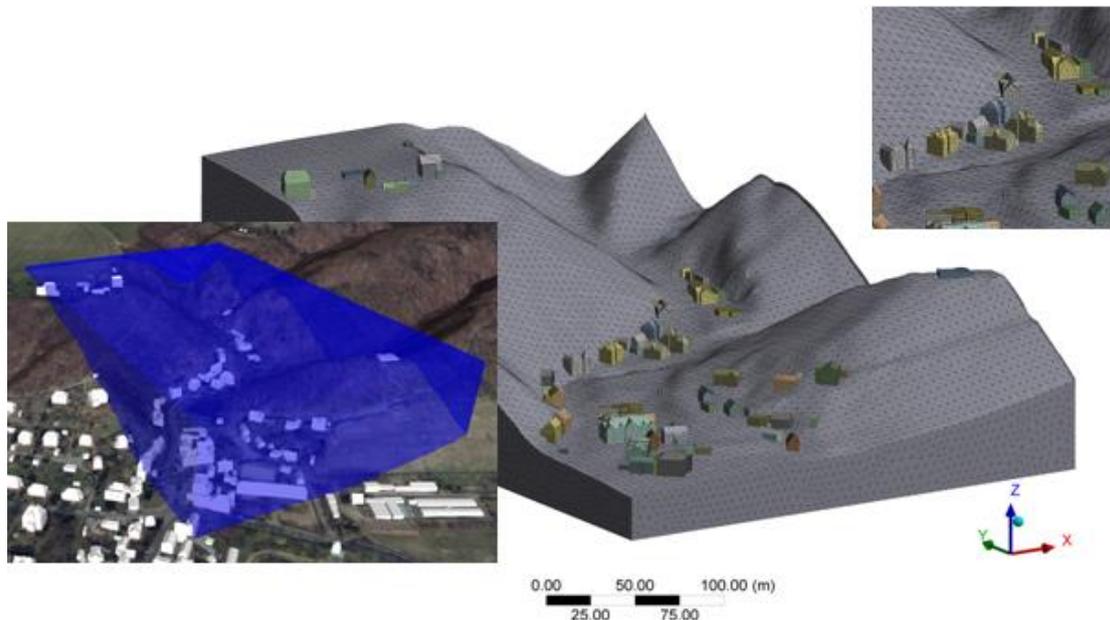


Abbildung 6: Kombination eines LoD2-Stadtmodells mit einem digitalen Geländemodell

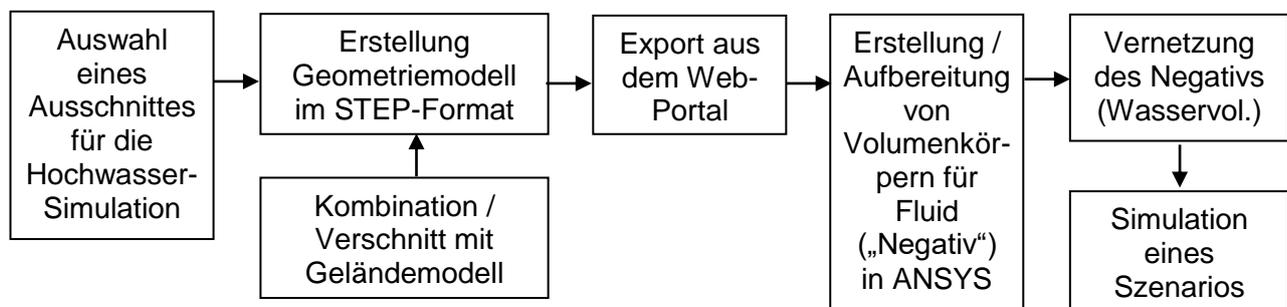


Abbildung 7: Workflow zur Übertragung der Stadtmodelle in die Simulationsumgebung

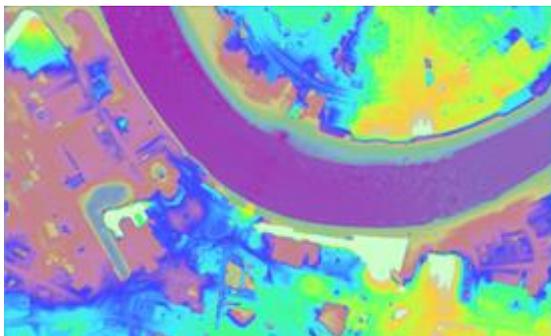
Zur Übertragung der Stadtmodelle in die Simulationsumgebung wird ein Workflow angestrebt, wie er in Abbildung 7 gezeigt ist. Nach der Bereichsauswahl wird der Ausschnitt mit dem Geländemodell verschnitten und im STEP-Format bereitgestellt. Auf Basis des exportierten Modells werden Volumenkörper für das Fluid erstellt, die aufzubereiten sind. Das Programm ANSYS bietet eine Vielzahl verschiedener Vernetzungsverfahren an, wie beispielsweise die Shrink-Wrap-Methode, die zur automatisierten Aufbereitung der Simulationsmodelle beitragen. Dennoch gibt es einzelne zentrale Objekte, wie Brücken, die momentan z. T. noch von Hand nachbearbeitet werden müssen, um ein hochwertiges Negativmodell für die Strömungssimulation zu erhalten.

### 3.2.2 Kombination von Bathymetrie mit Geländedaten

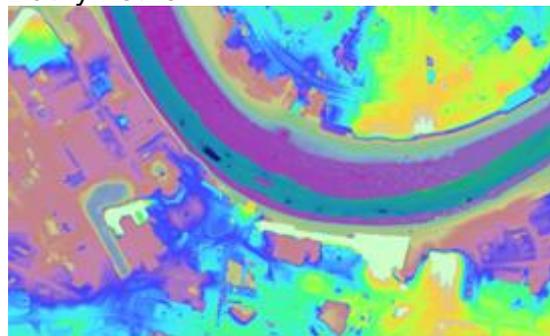
Mit der Geospatial Data Abstraction Library (GDAL), einer freien Programmbibliothek für die Übersetzung räumlicher Rasterdaten, wurden Prozesse entwickelt, um die Bathymetrie<sup>1</sup> der Elbe mit Geländedaten zu kombinieren. Mit Hilfe von Rasteroperationen können die bathymetrischen Daten mit dem digitalen Geländemodell (DGM) verschnitten werden. Eine Steuerung dieser Prozesse gelingt mit Unterstützung des freien Geoinformationssystem QGIS, das dem Betrachten, Bearbeiten und Erfassen von räumlichen Daten dient.

In Abbildung 8 sind verschiedene Kombinationsmöglichkeiten gezeigt. Bei der ursprünglichen aus einem Laserscan ermittelten Geometrie sind auf der in violetter Farbe gekennzeichneten Wasseroberfläche Unstetigkeiten aufgrund von Wellen zu erkennen. Da in hydronumerischen Modellen zunächst die Geländehöhen und somit auch die bathymetrischen Daten der vorhandenen Gewässer relevant sind, mussten aus den ursprünglichen Laserscandaten diejenigen Bereiche entfernt werden, welche die Lage der Wasserspiegeloberfläche repräsentieren. Diese Bereiche konnten mit Hilfe einer „Wassermaske“ identifiziert werden. Die darin liegenden Höhenpunkte wurden durch die verfügbaren bathymetrischen Daten der Elbe ersetzt. Fallweise war eine weitere Angleichung der Bathymetrie an das angrenzende Gelände notwendig. Das entstandene Modell kann nun in das standardisierte CityGML-Format konvertiert und für die Simulation aufbereitet werden. Nach Bedarf können die interpolierten Daten noch zu einem Triangulated Irregular Network (TIN) verarbeitet werden, das nur die notwendigsten Punkte zur Abbildung eines Geländes beinhaltet und damit weniger Speicherplatz beansprucht.

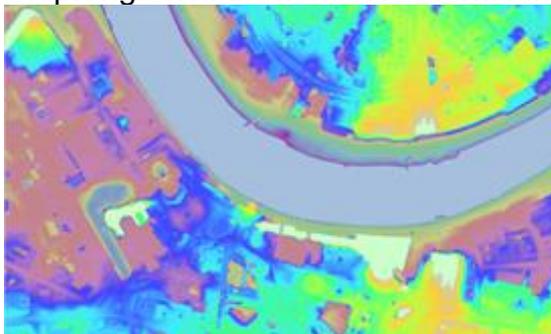
Ursprüngliches digitales Geländemodell



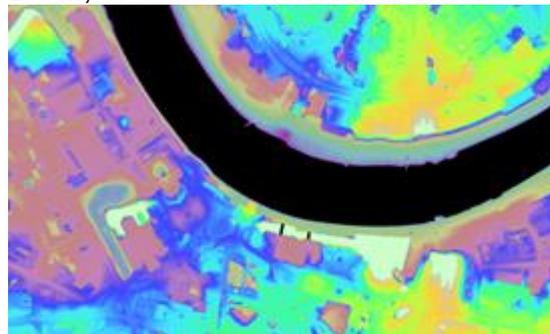
Ursprüngliches DGM mit überlagerter Bathymetrie



Ursprüngliches DGM mit Wassermaske

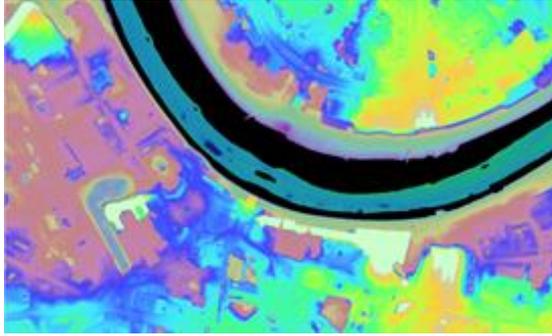


DGM, Wasserflächen auf 0 Meter

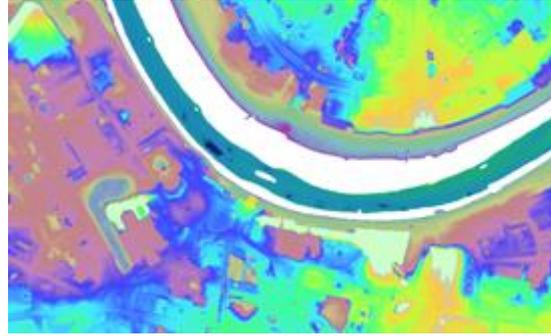


<sup>1</sup> Unter Bathymetrie wird die topografische Gestalt von Gewässerbetten verstanden.

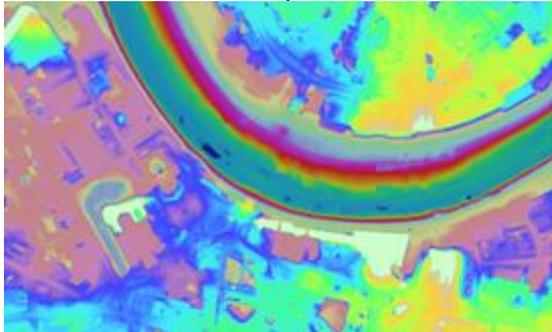
DGM kombiniert mit Bathymetrie



DGM u. Bathymetrie mit no-Data-Werten



no-Data Werte interpoliert



Verarbeitung zu einem optimierten TIN

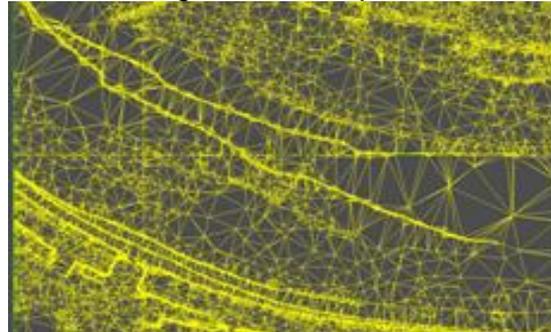


Abbildung 8: Verschneidung des digitalen Geländemodells mit der Bathymetrie der Elbe und exemplarische Aufbereitung eines optimierten TIN

### 3.2.3 Beispielhafte Auswahl eines geeigneten Stadtmodellausschnittes

Mit dem Stadtgebietsausschnitt zwischen Marienbrücke und Augustusbrücke, welcher auch die sog. „Brühlschen Terrassen“ im Norden der Dresdner Altstadt beinhaltet, wurde ein für die Hochwasserrisikoanalyse geeigneter Ausschnitt ausgewählt. Dort sind eine Uferbefestigung mit zwei Durchfahrten und eine Brücke über die Elbe vorhanden, die in LoD-Stufe 3 (Level-of-Detail) modelliert wurden (siehe Abbildung 9). Insbesondere die Unterführung war im offiziellen amtlichen Datensatz nicht vorhanden. Vom vorgelagerten Abschnitt der Elbe liegen bathymetrische Daten vor, welche auf Anfrage durch das zuständige Wasser- und Schifffahrtsamt bereitgestellt worden sind.

Als Attribute wurden neben architektonischen Angaben, wie z. B. Höhen und Dachformen von Gebäuden, auch Adressen und Objekt-Identifikationen hinterlegt, die für spätere analytisch-thematische Auswertungen interessant sein können, wenn es z. B. um die Prognose der zu erwartenden, hochwasserinduzierten Schäden in bestimmten Stadtteilen oder Straßenzügen geht. Als weitere Daten wurden die Landnutzungsklassen, die von der Stadt Dresden bereitgestellt wurden, berücksichtigt. Über die Landnutzungsinformationen können flächenbezogene Fließwiderstände definiert werden, welche auf die hydraulische Berechnung signifikanten Einfluss haben und dadurch u. a. für die Modellkalibrierung besonders wichtig sind.



Abbildung 9: Modellierter Unterführung an der Brühlschen Terrasse im Kontext von Stadt- und Geländemodell

Von der Stadt Dresden liegen derzeit die meisten Daten vor. Die Stadt Magdeburg hat ebenfalls Daten bereitgestellt, welche jedoch vorrangig in der Projektphase 2 für die weitere Entwicklung und Validierung der detaillierten Analysefunktionalität verwendet werden sollen. Der Stadtgebietsausschnitt Magdeburgs umfasst Bereiche des Stadtteils Rothensee, welcher beim Hochwasser 2013 besonders stark betroffen war. Der Ausschnitt beinhaltet u. a. auch ein Industriegelände sowie einen Hafen an der Elbe.

### 3.2.4 Erstellung von Strömungsmodellen

Zur Anpassung von Stadtmodellen an die Erfordernisse der Hochwassersimulation wurde die Aufgabe verfolgt, geometrisch konsistente, d.h. durchgängige und fehlerfreie, Geometrien von Gebäuden und Gelände zu erstellen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung, um Strömungssimulationen (CFD) aufsetzen zu können. Zudem wurde eine möglichst hohe Netzqualität angestrebt. Beim geometrischen Modell der Stadt Dresden wurde beispielsweise darauf geachtet, dass die Gebäudeobjekte etwas in den Boden ragen, so dass das Stadtmodell mit dem Geländemodell zu einer geschlossenen Oberfläche zusammengefügt („verschnitten“) werden kann, um Klaffungen zu vermeiden und Dichtigkeit zu gewährleisten. Aus dem entstehenden 3D-Modell wird das Volumen für Luft und Wasser quasi als Negativ für das Strömungsmodell abgeleitet. Dies ist in Abbildung 10 für einen fiktiven Stadtmodellausschnitt gezeigt.

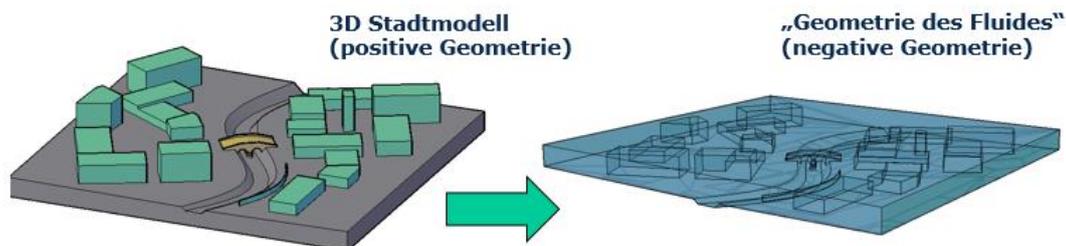


Abbildung 10: Definition des Strömungsmodells (rechts im Bild) als Negativ eines fiktiven 3D-Stadtmodells (links im Bild)

### 3.2.5 Durchführung erster vereinfachter 3D Strömungssimulationen

Die TU Dresden hat zunächst an einem vereinfachten, fiktiven Stadtmodellen (vgl. Abbildung 10), worin jedoch bereits typische urbane Strukturen wie Gebäude, Brücken, Hochwasserschutzwände enthalten sind, Strömungssimulationen durchgeführt. Dies diente vorrangig dem Zweck, Informationen bzgl. des Berechnungsaufwands (Simulationsdauer, Datenvolumen, Aspekte des Daten-Pre- und Postprocessings) zu erhalten, um auf dieser Grundlage Aussagen zu technischen Voraussetzungen, insbesondere aber auch bezüglich eines sinnvollen Verhältnisses aus räumlich-zeitlicher Modelldiskretisierung und der Größe des Untersuchungsgebiets treffen zu können. Aus hydraulischer Sicht waren hochwassertypische Randbedingungen festzulegen, wie z. B. Zuflüsse und die daraus resultierende Fließgeschwindigkeiten, welche unter realen Bedingungen in der Pilotstrecke durchschnittlich von 0,8 m/s (Niedrig- und Mittelwasserverhältnisse) bis zu ca. 4 m/s bei Hochwasser betragen können. Für die Simulation mit ANSYS CFX müssen Rauheiten von Oberflächen angenommen werden, die für das Flussbett pauschal mit 400 mm, für die sonstigen Oberflächen mit 6 mm gewählt wurden. Die Bodendurchlässigkeit wurde im Sinne einer bei Hochwasser oder Niederschlägen vorliegenden Sättigung zu Null angenommen, so dass keine Versickerungen oder Grundwasserzuflüsse möglich sind. Das geometrische Stadtmodell war zu vernetzen, wobei zunächst Zellgrößen von 0,3 m bis 0,8 m verwendet wurden, die ein Netz mit ca. 1,3 Mio. Elementen ergaben. Das Flussbett und Stellen, an denen Stauungen oder hohe Gradienten in den hydraulischen Parametern zu erwarten sind, wie vor allem im Bereich der Brücke, wurden feiner vernetzt. Für eine transiente Strömungsberechnung wurde eine Zeitdauer von 3600 s bei einer Zeitschrittweite von 0,2 s angenommen. Erste Strömungssimulationen wurden am Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen der TU Dresden (ZIH) auf CPUs mit 10-20 Kernen durchgeführt.

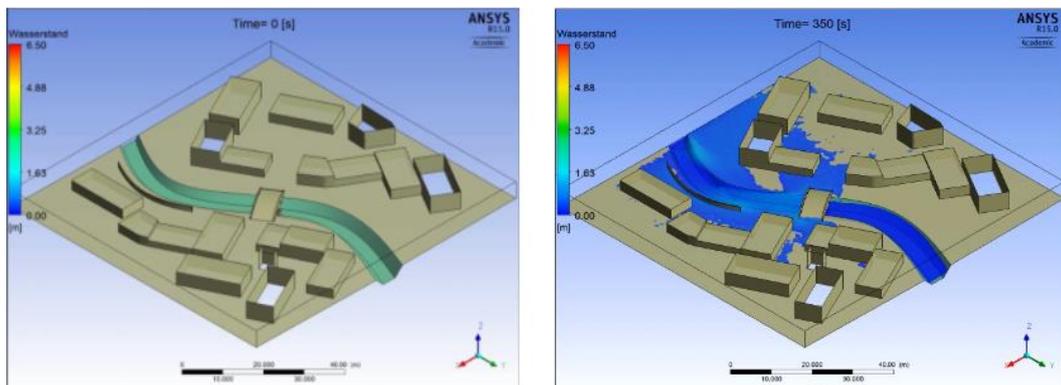


Abbildung 11: Wasserspiegellage bei beginnendem Hochwasser.  
Die rückstauende Wirkung der Brücke wird deutlich.

Das fiktive Stadtmodell beinhaltet einen Flussabschnitt sowie eine darüber führende Brücke und eine Hochwasserschutzwand mit strömungsleitender Funktion. Anhand dieses vereinfachten Beispiels wurde das Strömungsverhalten generell auf seine 3D-Effekte untersucht und direkt mit 2D-Simulationen verglichen. Die enthaltenen Objekte führten aber nicht nur aufgrund ihrer Wechselwirkung mit dem Fluid zu stärkeren 3D-Effekten bezüglich von Turbulenz-, Geschwindigkeits- und Druckverteilungen. Bei der Überströmung von Mauer und Brücke treten beispielsweise auch dynamische Effekte auf, wie sie in 2D-Simulationen nicht oder

nur stark vereinfacht berücksichtigt werden können. Abbildung 11 zeigt das fiktive Stadtmodell, in dem das Flussbett aus nordwestlicher Richtung mit einem Hochwasserzufluss beaufschlagt wird.

Es wurden verschiedene Netzfeinheiten mit Zellgrößen von 0,1 m bis 0,8 m untersucht, wodurch sich Berechnungsnetze mit bis zu 4,0 Mio. Elementen ergeben (siehe Tabelle 1). Trotz Verdopplung der Kernzahl des Rechners stieg dabei die Rechenzeit, die schon bei dem Modell mit 1,3 Mio. Elementen bei ca. 80 Stunden liegt, nochmals deutlich an.

Variante	Mesh	$\Delta X$ .min	$\Delta X$ .max	$\Delta t$ [s]	Cores	CPU [h]	t <sub>REAL</sub> [s]	t <sub>SIM</sub> [Stunden]	
1	1.375.301	0,3	0,8	0,2	10/ MB	1000	640	2500	80:00:00
2	3.102.612	0,2	0,5	0,2	20/2000 MB	~ 800	2400	2400	100:00:00
3	3.102.612	0,2	0,5	0,1	16/2000 MB	1920	670	670	120:00:00

Tabelle 1: Modellvarianten des fiktiven Stadtmodells für ANSYS-CFX-Simulationen

Daraus ergibt sich ein Optimierungsproblem hinsichtlich der notwendigen Netzauflösung und der damit verbundenen Rechendauer. Dabei kann eine zu grobe räumliche Diskretisierung zu einer signifikanten Verfälschung der Berechnungsergebnisse führen, wie exemplarisch in Abbildung 12 dargestellt. Deutlich erkennbar sind die unrealistischen Fließgeschwindigkeitsbeträge, die sich im Falle zu großer Berechnungszellen ergeben (rechte Abbildung). Somit wurde bewiesen, dass die Netzauflösung nicht beliebig generalisiert bzw. die Rechendauer minimiert werden kann, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten. Derartige Vorbetrachtungen waren im Rahmen der Phase 1 wichtig, um generell sinnvolle und praktikable Werte für die räumliche Diskretisierung eines Untersuchungsgebiets festzulegen. Hierbei flossen auch die Erkenntnisse aus dem nachstehenden Abschnitt zur Optimierung der 3D-Simulationen ein.

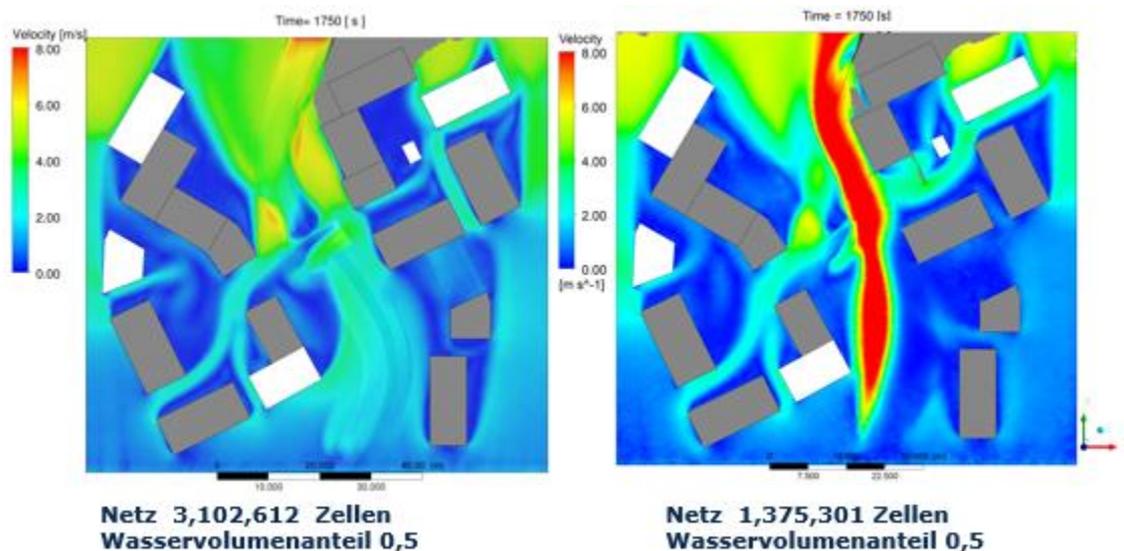


Abbildung 12: Geschwindigkeitsverteilung nach 1750 s für ein feineres (links) und ein gröberes (rechts) Rechengitter bei gleichen hydraulischen Randbedingungen

Hinsichtlich der Darstellung der Ergebnisse hat sich in den Voruntersuchungen herausgestellt, dass die angezeigten Überflutungsflächen vom gewählten Füllungsgrad der Elemente abhängen. Hierbei handelt es sich um die Festlegung, ab welchem Füllungsgrad ein Volumenelement des Rechengitters als mit Fluid gefüllt bzw. leer angezeigt wird. Je geringer der Betrag des Grenzfüllungsgrads gewählt ist, umso eher werden Bereiche als überflutet dargestellt, wie in Abbildung 13 beispielhaft für die Füllungsgrade von 20% und 50% (entspricht Wasservolumenanteile von 0,2 bzw. 0,5) gezeigt wird. Nachdem ca. eine halbe Stunde (1750 s) verstrichen ist, nähern sich die Ergebnisse an. In ANSYS-CFX ist ein Füllungsgrad von 50% standardmäßig definiert.

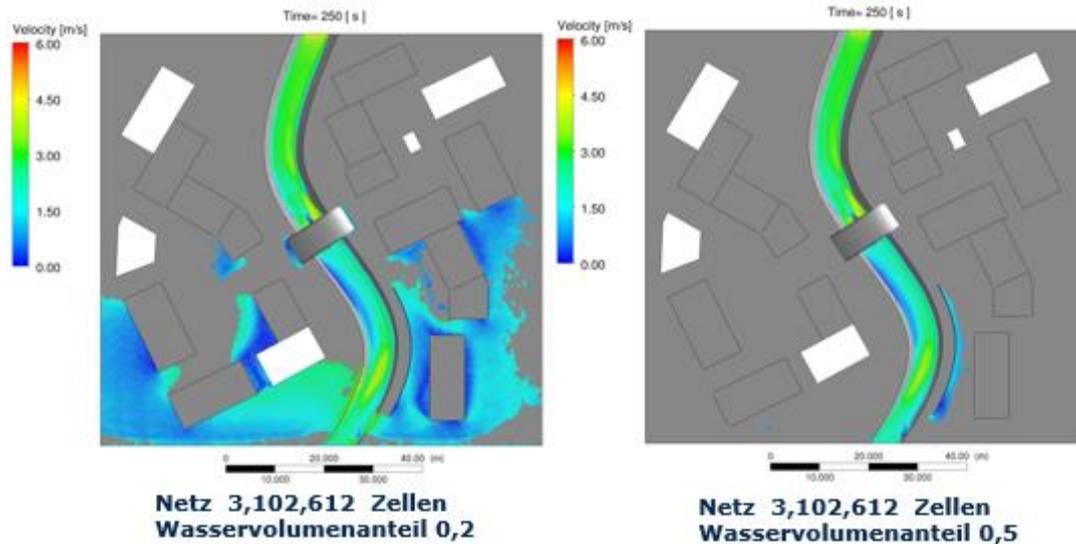


Abbildung 13: Darstellung des Simulationsergebnisses bei unterschiedlichem Füllungsgrad der Elemente nach 250 s bei beginnender Umströmung der Hochwasserschutzmauer

Aus den Darstellungen in Abbildung 13 ist weiterhin ersichtlich, dass die Hochwasserschutzwand ihren Zweck in der zunächst modellierten Form nicht erfüllt. Aus diesem Grund wurde die Wand in einem nächsten Bearbeitungsschritt bis an die südliche Modellgrenze bzw. bis an das rechte Brückenwiderlager verlängert. Folgende Abflussszenarien wurden mit dem so angepassten, vereinfachten 3D-HN-Modell untersucht:

- Fall 1: Mittelwasserabfluss (MQ-Szenario)
- Fall 2: HQ-Abfluss (WSP-Lage unterhalb der Oberkante HWS-Mauer)
- Fall 3: Bordvoller HQ-Abfluss (WSP-Lage bis Oberkante HWS-Mauer)
- Fall 4: HQ-Abfluss mit versagender HWS-Mauer (Anfangsbedingungen aus Fall 3)

Die in Abbildung 14 bis Abbildung 18 gezeigten Untersuchungen des fiktiven Modells zeigen sehr deutlich die Vorteile und Potentiale der detaillierteren 3D-HN-Modelle auf. So können beispielsweise zeitlich veränderliche Strömungscharakteristiken in allen drei Raumrichtungen bestimmt, ausgewertet und veranschaulicht werden. Zudem gelingt eine Auswertung der zeitlich und lokal veränderlichen Druckeinwirkungen auf die Objekte, wie z. B. auf die HWS-Mauer. Hierbei sind auch dynamische Effekte inbegriffen, wie sie beim plötzlichen Versagen der HWS-Mauer auftreten und zu einer stoßartigen Überhöhung der Einwirkungen führen, wie in Abbildung 18 angedeutet.

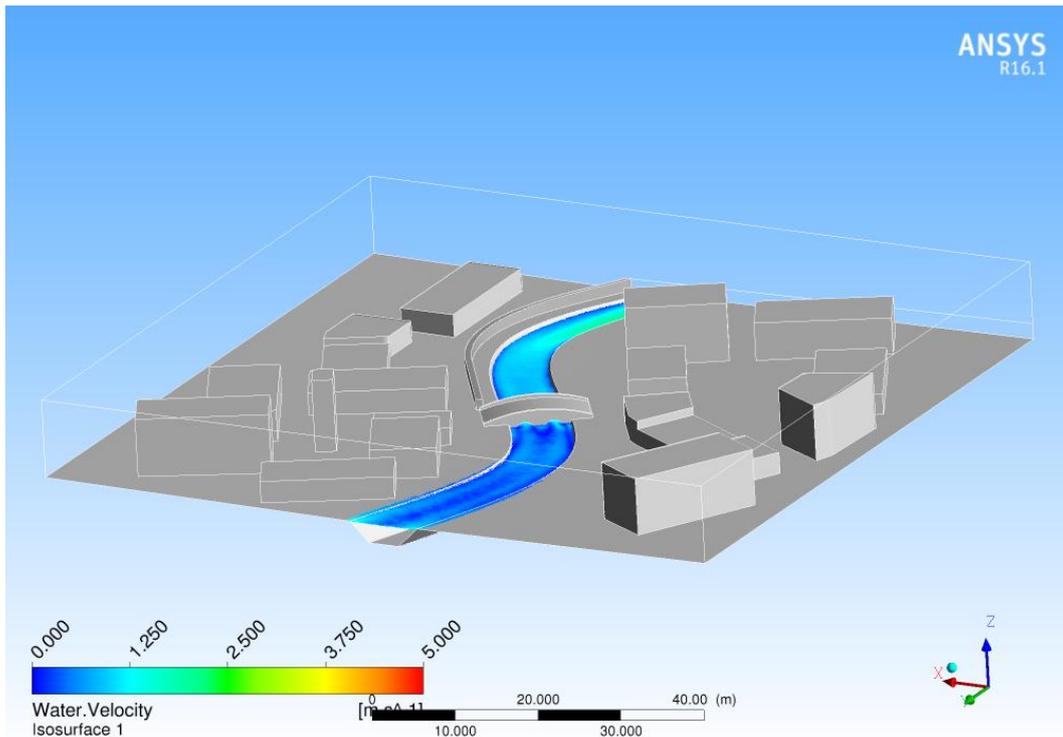


Abbildung 14: Fließgeschwindigkeitsdarstellung, Fall 1 (MQ-Szenario)

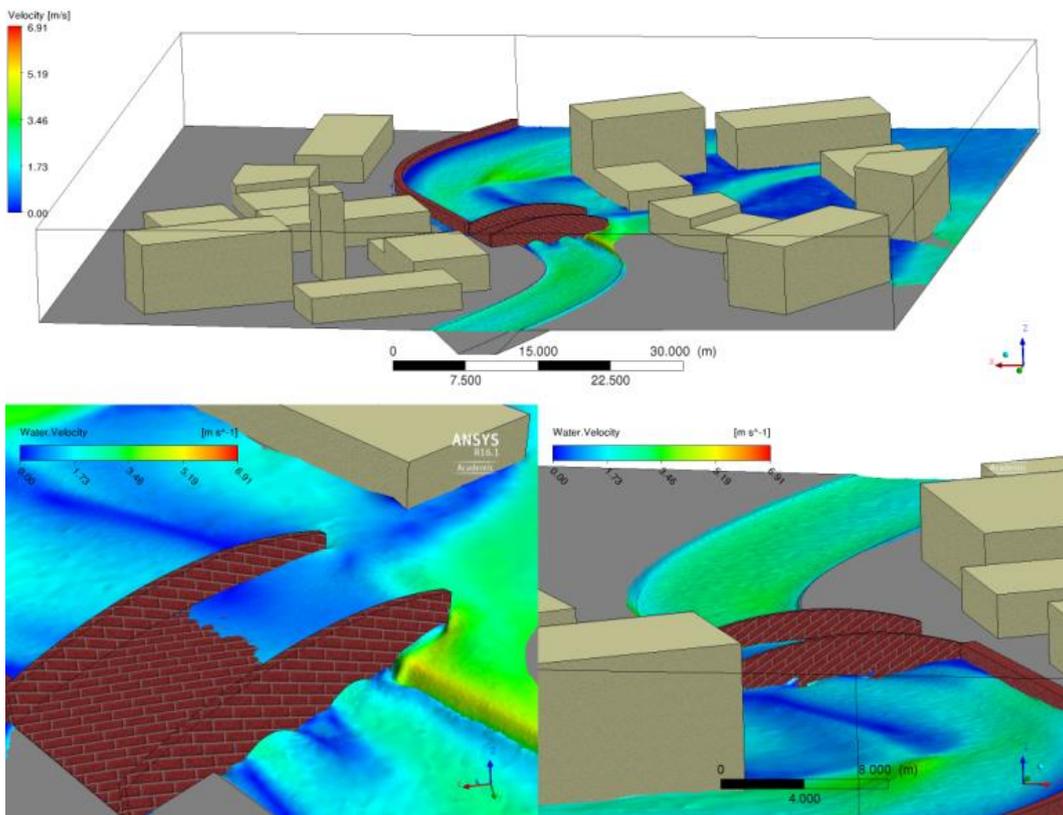


Abbildung 15: Fließgeschwindigkeitsdarstellungen, Fall 2 (HQ-Abfluss)

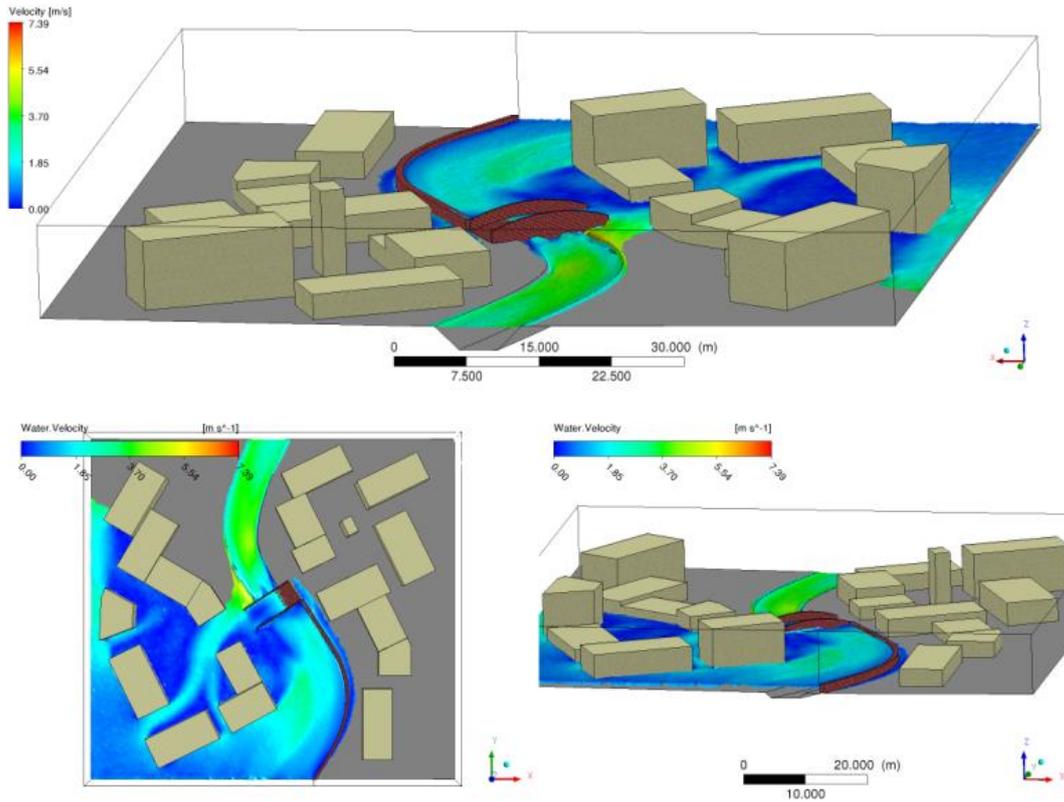


Abbildung 16: Fließgeschwindigkeitsdarstellungen, Fall 3 (Bordvoller HQ-Abfluss)

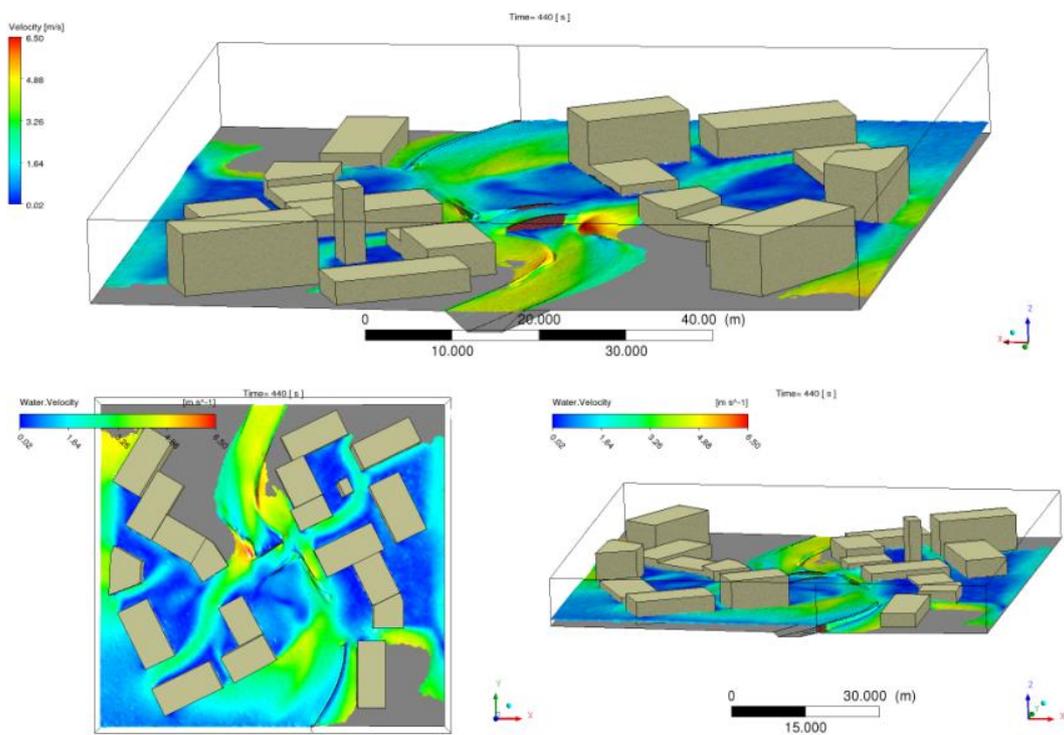


Abbildung 17: Fließgeschwindigkeitsdarstellungen, Fall 4 (HQ-Abfluss mit versagender HWS-Mauer, t = 440 s nach dem Bruch)

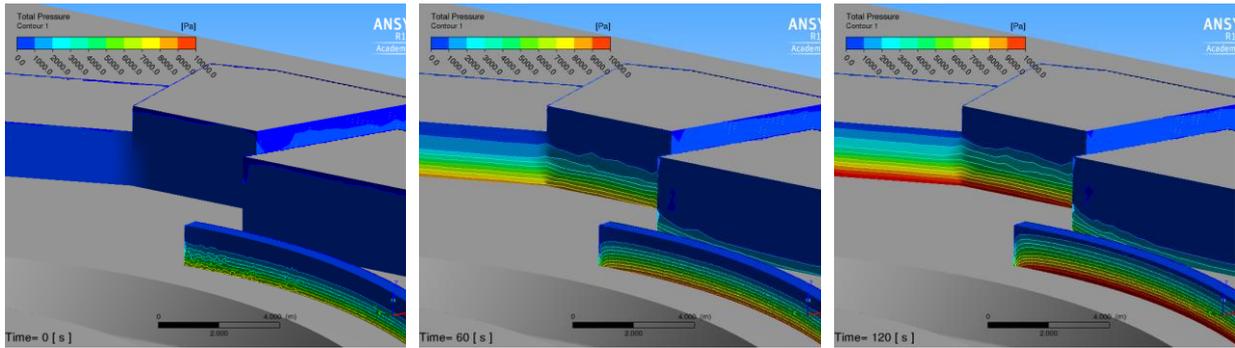


Abbildung 18: Darstellung lokalen Verteilung und der zeitlichen Änderung der Druckeinwirkung auf die HWS-Mauer und die angrenzenden Gebäude

### 3.2.6 Optimierung der erster vereinfachter 3D Strömungssimulationen

Wegen der Komplexität der 3D-HN-Modelle war es erforderlich, geeignete Simulationsparameter für robuste, effiziente und qualitativ hochwertige Simulationen zu identifizieren. Die Verwendung des fiktiven Stadtmodellausschnitts bietet sich hierfür an, da alle Kernmerkmale eines urbanen Szenarios (Gelände, Gebäude, Brücke, Hochwasserschutzmauer) enthalten sind, das Modell aber eine begrenzte Ausdehnung und eine reduzierte geometrische Komplexität besitzt, um sich ganz auf die hydrodynamisch-numerisch relevanten Effekte zu konzentrieren. Bei diesen Arbeiten wurde die CADFEM GmbH durch die ANSYS Germany GmbH im Rahmen eines Unterauftrages unterstützt. ANSYS Germany betreut als Kompetenzzentrum die CFD-Programme ANSYS CFX und Fluent, einschließlich Fluid-Struktur-Wechselwirkung und der Netzgenerierung (ANSYS ICEM CFD, TGrid). Die Ergebnisse wurden mit der TU Dresden diskutiert und flossen direkt in die zuvor beschriebenen Forschungsarbeiten ein.

Im Rahmen der Untersuchungen ging es neben der Wahl von Simulationsparametern auch um spezielle strömungstechnische Fragestellungen. So lag ein erster Fokus der Arbeiten auf der adäquaten Vernetzung des Modells. Die Herausforderung hierbei besteht darin, in Bereichen, in denen große Gradienten und dynamische Effekte auftreten, ein ausreichend feines Netz vorzuhalten. Die Optimierungsaufgabe besteht darin, dass das Netz an jeder Stelle so fein wie nötig, jedoch so grob wie möglich sein sollte, um keine Einbußen bei der Ergebnisqualität und der Dauer der Lösung in Kauf zu nehmen. So wurde beispielsweise der Bereich um die Brücke, in dem es zu den stärksten Turbulenzeffekten kommt, mit der höchsten Netzauflösung abgebildet. Es wurde auch deutlich, dass die Wahl einer ausreichenden Netzqualität stark vom Ziel der Simulation abhängt. Abbildung 19 zeigt beispielsweise einen vertikalen Schnitt längs des Flusslaufes im Bereich der Brücke. Der Wasserstand (rot) führt bereits zu einer Überströmung der Brücke und somit zu den ausgeprägtesten dynamischen Effekten im Modell. Infolge der Überströmung kommt es sogar zu einer Wellen- und Gischtbildung, wie aus Abbildung 19 ersichtlich wird. Um den Wassernebel der Gischt realitätsnah abzubilden wäre jedoch eine noch viel höhere Auflösung des Modells erforderlich. Im Fokus der Untersuchung liegt aber eine hinreichend gute Prognose der Wasserspiegellagen sowie der Beträge und Richtungen der Strömungsgeschwindigkeiten und der daraus resultierenden Bauwerkseinwirkungen in räumlicher und zeitlicher Abhängigkeit. Somit kann die Darstellung

zugrundeliegende Vernetzung als ideal für das betrachtete Szenario gewertet werden. Zusammenfassend wurden bei gleicher Elementzahl eine detailliertere Abbildung der neuralgischen Punkte und eine deutliche Steigerung der allgemeinen Netzqualität erreicht, was sich wiederum positiv auf die Ergebnisqualität und die Rechendauer auswirkt.

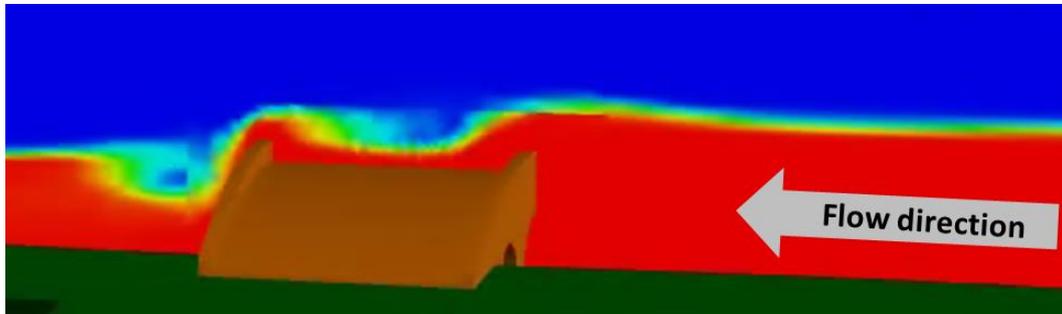


Abbildung 19: Darstellung der Überströmung des Brückenbauwerks im fiktiven Stadtmodellausschnitt in Form eines vertikalen Schnittes längs des Flusslaufes

Im Weiteren wurden optimale Simulationsparameter bezüglich der Definition der Randbedingungen und der allgemeinen Turbulenzmodelle, der Iterationsverfahren und der Konvergenzkriterien identifiziert. Damit kann sowohl für den fiktiven Stadtmodellausschnitt als auch für die weiteren Realszenarien eine hinreichend genaue und effiziente Abbildung des Fließverhaltens in komplexen urbanen Gebieten sichergestellt werden.

Zudem wird deutlich, dass in der 3D-Simulation wichtige Informationen zur hydraulischen Wirkung bestimmter geometrischer Elemente und deren möglichen Auswirkungen auf die Überflutungscharakteristik im Stadtmodell gewonnen werden können, die in dieser Detailliertheit von 2D-Modellen nicht geliefert werden können.

### 3.2.7 Bewertung von Strategien zur 2D Flachwassermodellierung

Um die Möglichkeiten und Grenzen bestehender vereinfachter Modellierungsstrategien zu identifizieren und dadurch die erforderlichen Eigenschaften eines für die schnelle und verlässliche Modellierung von urbanen Flusshochwassern geeigneten Flachwassermodells abzuleiten, wurde eine vergleichende Anwendung von zwei kontrastierenden Flachwassermodellen durchgeführt. Hierbei wurden Modelle für ein fiktives und ein reales Gebiet mit der Software Telemac2D und LISFLOOD-ACC untersucht:

1. Telemac2D ist ein Finite-Elemente-Flachwassermodell, das auf einem unregelmäßigen Gitter basiert und dadurch eine sehr gute Anpassung des Modellnetzes an die Stadt- und Geländegeometrien erlaubt. Dieses seit den 80er Jahren weit verbreitete Modell vertritt eine Modellierungsstrategie, bei der ein Modellnetz aus der Verschneidung der verfügbaren Daten erzeugt und anschließend manuell bearbeitet wird. Das Ziel eines solchen Netzes ist die realistische Darstellung der Stadtgeometrie, was allerdings eine Reihe von Arbeitsschritten erfordert, bei denen der manuelle Bearbeitungsaufwand sehr hoch sein kann.

2. LISFLOOD-ACC ist im Gegensatz zu Telemac2D ein physikalisch, numerisch und geometrisch einfacheres Modell. Es basiert auf der sog. ‚local inertial formulation‘ der Flachwassergleichungen [Bates et al. 2010], worin die Rechenzeiten aufgrund der Vernachlässigung der Advektion maßgeblich reduziert werden können. Ferner arbeitet LISFLOOD-ACC mit einem regelmäßigen Gitter, das sich direkt von den normalerweise verfügbaren geometrischen Daten (z.B. Digitales Geländemodell im Rasterformat, GeoTIFFs, etc.) ableiten lässt bzw. mit einem sehr geringen Bearbeitungsaufwand verbunden ist. Der Einsatz dieser Art von Flachwassermodellen entwickelt sich in Europa im European Flood Awareness System seit einigen Jahren als Alternative für die schnelle und zuverlässige Flachwassersimulation von Überflutungsprozessen [Falter et al. 2015, Hunter 2008, Liang & Borthwick 2009].

Die Genauigkeit und der Aufwand dieser beiden unterschiedlichen 2D-Solver wurden mit den Ergebnissen der 3D-Simulationen für das fiktive Testgebiet verglichen. Abbildung 20 zeigt die Simulationsergebnisse der beiden Flachwassermodelle im Vergleich mit den Ergebnissen eines 3D-Modells (ANSYS). Beide 2D-Modelle überschätzen die Wassertiefen, wobei Telemac2D eine bessere Übereinstimmung mit den ANSYS-Ergebnissen aufweist als LISFLOOD-ACC. Dabei spielt die Abbildung des Druckabflusses unter der Brücke eine wesentliche Rolle, die bei den 2D-Modellen durch stark vereinfachte empirische Ansätze nur ungenügend möglich ist, welche manuell definiert und kalibriert werden müssen. An dieser Stelle werden die Vorteile durch den Einsatz von 3D-Modellen sehr deutlich, wobei die realitätsnähere Abbildung zu Lasten des Rechenaufwands geht.

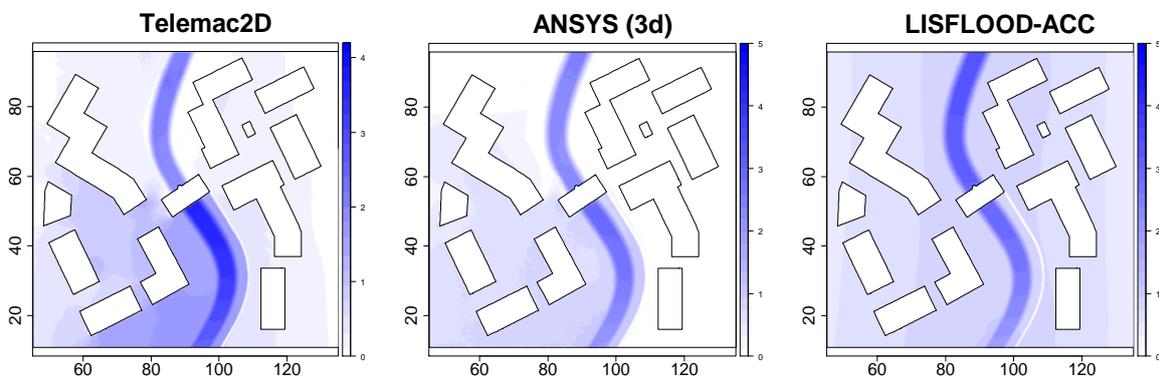


Abbildung 20: Vergleich der Berechnungsergebnisse der 2D-Verfahren (links und rechts) mit der 3D-Berechnung mit ANSYS (Mitte); dargestellt ist die Fließtiefe [m]; Fließrichtung von Süd nach Nord

Das einfachere Modell LISFLOOD-ACC ist mit einer CPU-Zeit von einer Stunde (HP Workstation Z840, Intel Xeon (R) CPU, 3.10 GHz, 128 GB RAM) für das fiktive Beispiel mit ca. 120.000 Elementen wesentlich schneller als Telemac2D (9 Stunden). Allerdings vernachlässigen solche einfachen Modelle hydraulische Prozesse wie die Advektion, was neben Schwierigkeiten bei der Abbildung des Druckabflusses unter der Brücke zu weiteren Ungenauigkeiten führen kann. Trotzdem sind sie aufgrund ihres geringen Bearbeitungsaufwand beim Pre- und Postprocessing sehr interessant für einfache und überschlägige Anwendungen. Telemac2D liefert zwar wesentlich genauere Ergebnisse, ist aber mit einem höheren Bearbeitungsaufwand verbunden. Für das fiktive Beispiel mit ca. 39.000 Elementen betrug die CPU-Zeit 9 Stunden, und der Pre- und Postprocessing-Aufwand war mindestens dreimal so hoch wie bei LISFLOOD-ACC.

Für das analysierte Beispiel sind die Unterschiede zwischen beiden Modellen vorrangig auf die Abbildung der Brücke zurückzuführen. Telemac2D verbindet Ober- und Unterstromseite durch den Einsatz von Quellen und Senken an den entsprechenden Netzknoten. Dadurch ermöglicht dieses Modell die Berücksichtigung des Staueffektes der Brückenpfeiler und gleichzeitig die Abbildung des Druckabflusses unter der Brückenunterkante. LISFLOOD-ACC ist in dieser Hinsicht begrenzt, da einerseits die Abbildung des Druckabflusses unter der Brücke nicht möglich ist und andererseits die Vernachlässigung der Advektion die korrekte Abbildung der hydraulischen Effekte der Brückenpfeiler auf dieser Skala nur bedingt erlaubt (keine räumliche Beschleunigung des Wassers). Es besteht jedoch die Möglichkeit, die Ergebnisse des Telemac2D-Modells im Rahmen einer weiteren Kalibrierung der empirischen Koeffizienten für den Druckabfluss unter der Brücke an die 3D-Ergebnisse anzugleichen. Dies stellt ein weiteres Einsatzgebiet der detaillierten 3D-HN-Modelle dar.

Erste Test-Simulationen für das reale Gebiet mit dem vereinfachten Modell LISFLOOD-ACC (Advektion = 0) zeigen physikalisch plausible Ergebnisse (s. Abbildung 21) mit einem geringen Bearbeitungsaufwand. In einem 2. Schritt wurde eine LISFLOOD-Berechnung für eine extreme Hochwassersituation durchgeführt mit dem Ziel, die mit diesem Modell berechneten Wasserspiegellagen mit den Ergebnissen des am IWD bestehenden und validierten 2D-HN-Modell des gleichen Gebiets zu vergleichen. Gleichzeitig ermöglicht diese Simulation eine Prüfung der Anwendbarkeit eines Flachwassermodells ohne Advektion bei einem Szenario, bei dem erwartet werden kann, dass diese eine wichtige Rolle spielt (hoher Abfluss und hohe erforderliche Modellauflösung).

In Anlehnung an das IWD-Modell wurden bei LISFLOOD ein Abfluss von  $3166 \text{ m}^3/\text{s}$  am östlichen Rand (entspricht einem Abfluss von  $6255.0 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Pirna) und ein freies Ausströmgefälle von  $0.0002 \text{ [m/m]}$  ca.  $1 \text{ km}$  unterhalb der Marienbrücke als Randbedingungen verwendet. Abflusswirksame Strukturen wie Durchlässe und Schutzwände wurden in dieser Simulation nicht berücksichtigt.



Abbildung 21: Testsimulation Dresdner Innenstadt (OW-Pegel = 110.87 müNN) mit dem vereinfachten 2D-Modell LISFLOOD; visualisiert in der 3D Stadtmodellplattform

Die berechneten Wassertiefen weisen in beiden Modellen eine vergleichbare räumliche Verteilung auf. Dennoch wurden lokale Abweichungen festgestellt, die in Abbildung 22 (unten) ausgewertet werden. Diese sind vorrangig auf Ungenauigkeiten zurückzuführen, die durch die Vernachlässigung der Advektion bei der gewählten Skala (Zellgröße: 4 x 4 m) auftreten.

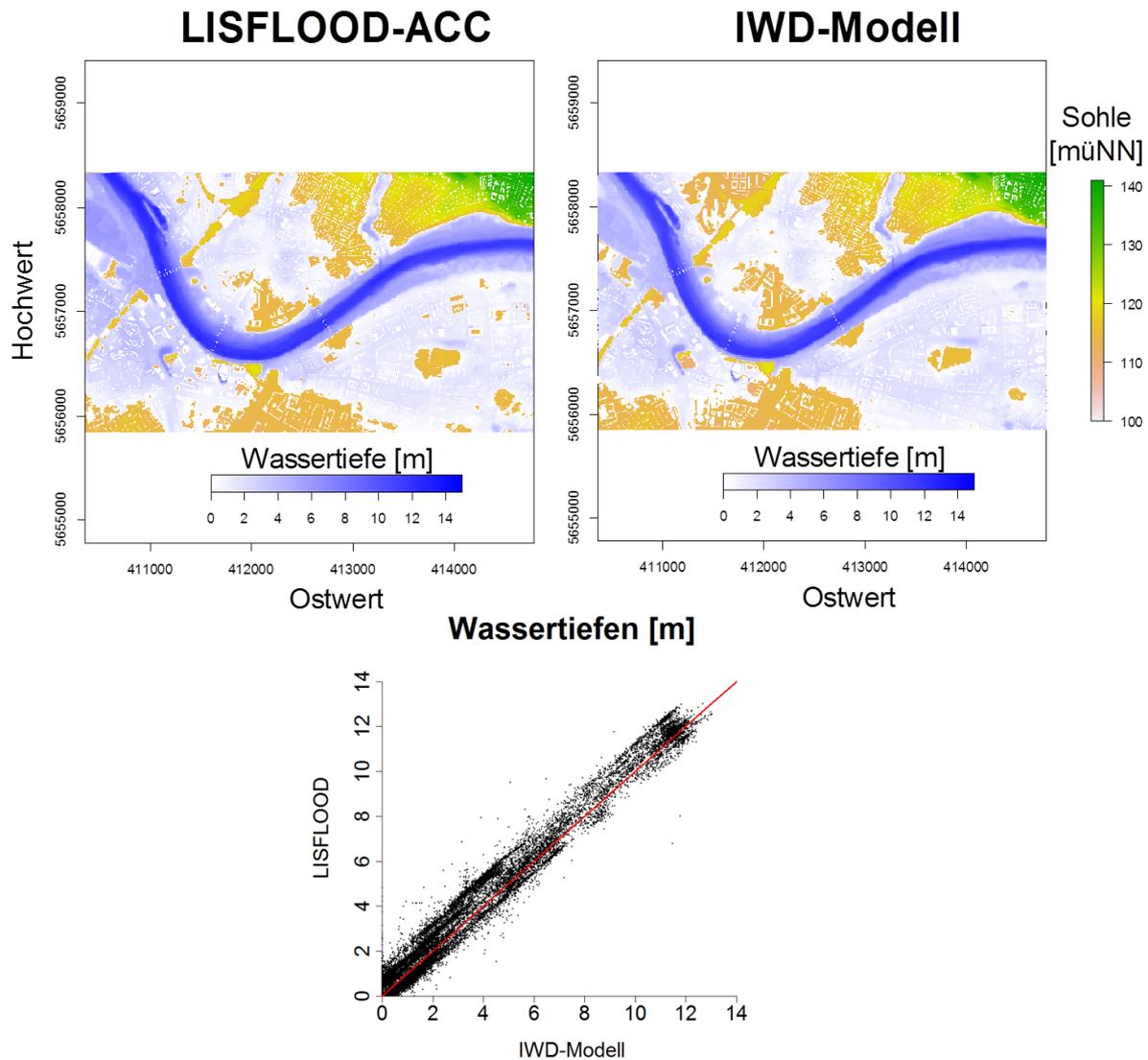


Abbildung 22: Fließtiefen für das LISFLOOD-ACC-Modell und das IWD-Modell im Stadtgebiet von Dresden (oben) und Auswertung der Unterschiede zwischen beiden Ergebnissen (unten)

### 3.2.8 Entwicklung einer eigenen schnellen Analysefunktionalität

Da eine 3D-HN-Simulation für große 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 detaillierte 3D-HN-Simulationen extrahiert werden können. Dies ist auch für lokal begrenzte Bereiche einer detaillierten 3D-Simulation erforderlich, z. B. für spezifische Gebäudetypen (Denkmäler, Regierungsgebäude, Hauptbahnhof, usw.), wenn die

Randbedingungen nicht direkt aus Pegelinformationen abgeleitet werden können. Die Randbedingungen umfassen die hydraulischen Verhältnisse (Zu- und Abflüsse, Fließtiefen, Fließgeschwindigkeiten, usw.) an den Modellgrenzen eines ausgewählten Teilbereichs inklusive ihrer Veränderung über die Dauer der Simulation.

Dazu wurde an der TU Dresden mit der numerischen Programmierumgebung DIFFPACK Development Framework der Firma inuTech (Nürnberg) und selbst erstellten Routinen ein eigenes Finite-Volumen-Flachwassermodell mit einem Approximate-HLLC-Riemann-Solver [Toro 2001] erstellt. Dieses entspricht dem aktuellen Stand der Forschung im Bereich der numerischen Flachwasserhydrodynamik hinsichtlich Stabilität und Genauigkeit [Liang 2009] und vereint weitere Vorteile bestehender 2D-Verfahren.

Um die Stabilität und Schnelligkeit des numerischen Verfahrens zu veranschaulichen wurden zwei Testfälle untersucht, in denen die Geschwindigkeits- und Druckgradienten extreme Bedingungen aufweisen: Beim Testfall Tsunami (siehe Abbildung 23) wird die Ausbreitung einer glockenförmigen Erhöhung der Wasserspiegellage simuliert. Beim zweiten Testfall, einem Dambruch (siehe Abbildung 24), wird ein im Modell als zylindrisch angenommener Damm zum Startzeitpunkt entfernt. Beide Testsimulationen wurden mit einem Zeitschritt von 0.005 Sekunden, einer Realzeit von 100 Sekunden und einer räumlichen Schrittweite von 1 m für ein flaches Gebiet von 50 x 50 m simuliert. Bei der 2D-Simulation entstehen ein Höhenwert (entspricht Wasserspiegellage) und ein Geschwindigkeitsvektor pro Punkt in Zeit und Raum. Mit CPU-Zeiten von 1 min beim Testfall Tsunami bzw. 4 min beim Testfall Dambruch (HP Workstation Z840, Intel Xeon (R) CPU, 3.10 GHz, 128 GB RAM) wird die Simulation dank des Einsatzes des Riemann-Solvers deutlich beschleunigt. Die Ergebnisse dieser Prüfung zeigen, dass das implementierte Verfahren in der Lage ist, hochdynamische Überflutungsverhältnisse stabil und rechnerisch effizient abzubilden. Dies gewährleistet gleichzeitig die numerische Qualität des Verfahrens bei Hochwasserereignissen geringerer Dynamik. In dieser ersten Entwicklungsphase wurde noch auf die Abbildung des wetting-and-drying und der Schnittstelle zur Handhabung von internen Randbedingungen verzichtet.

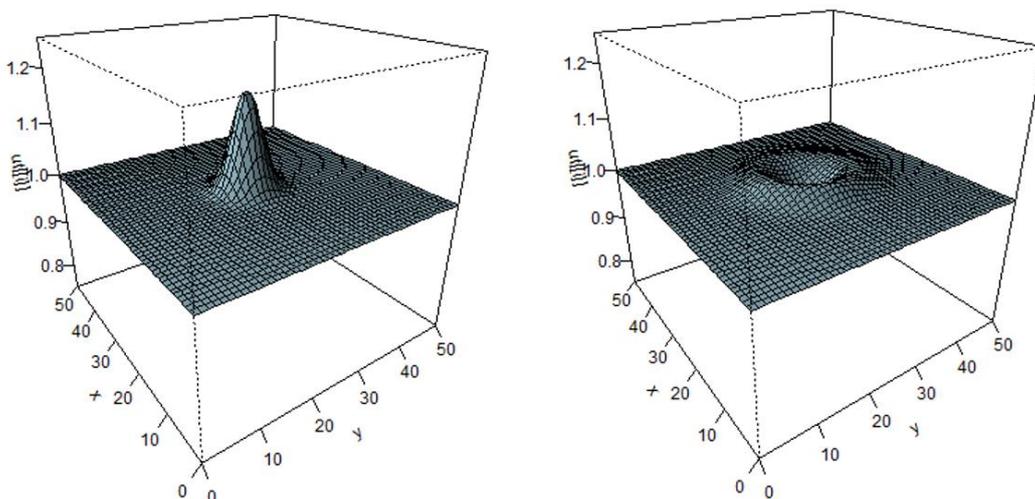


Abbildung 23: Testfall 1 – Ausbreitung einer Tsunami-Welle als zentrierte, glockenförmige Erhebung von 10 cm Höhe

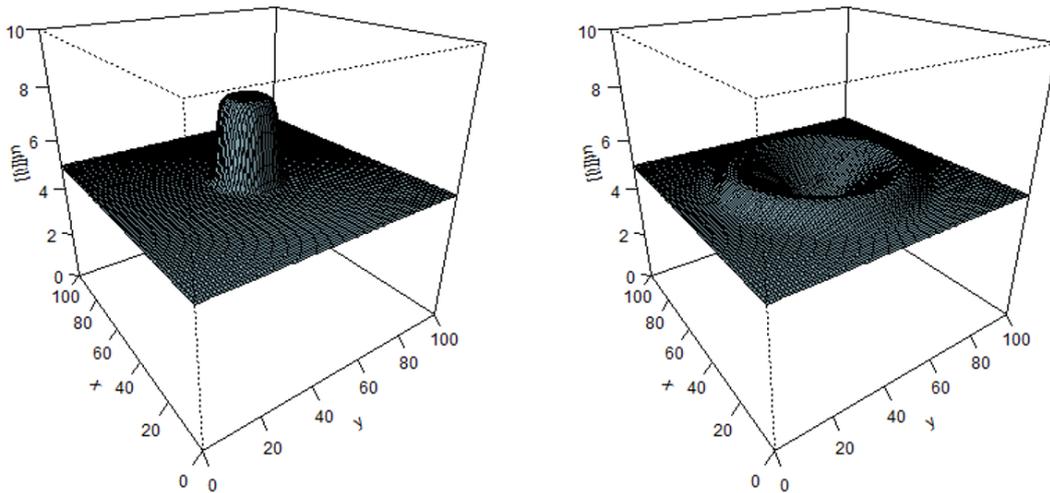


Abbildung 24: Testfall 2 – Dambruch mit einer Fallhöhe von 3 m

Um die hydrodynamischen Randbedingungen für 3D-HN-Simulationen von Teilgebieten zu ermitteln und zur Verfügung zu stellen, wurde die 2D-Simulation an das FE-Programm ANSYS angebunden. Für die 2D-HN-Modellierung sollte das Stadtmodell die folgenden Informationen enthalten: Gebäudegrundrisse, digitales Geländemodell, Flächenrauheiten (Fließwiderstände) sowie Lage und Attribute von hydraulisch wirksamen Strukturen wie Konstruktionskanten, Schutzmauern, Wehre, Brücken, usw.. Der Umgang mit solchen Strukturen ist von besonderer Relevanz, da diese typischerweise manuell ins Netz integriert werden müssen, was bei großen Untersuchungsgebieten zu einem erheblichen Bearbeitungsaufwand führen kann. Nur wenn diese geometrischen Daten in der korrekten Form vorliegen und in die Modellerstellung einbezogen werden, ist die Erzeugung realitätsnaher Ergebnisse auf Grundlage eines Flachwassermodells für große urbane Gebiete realistisch.

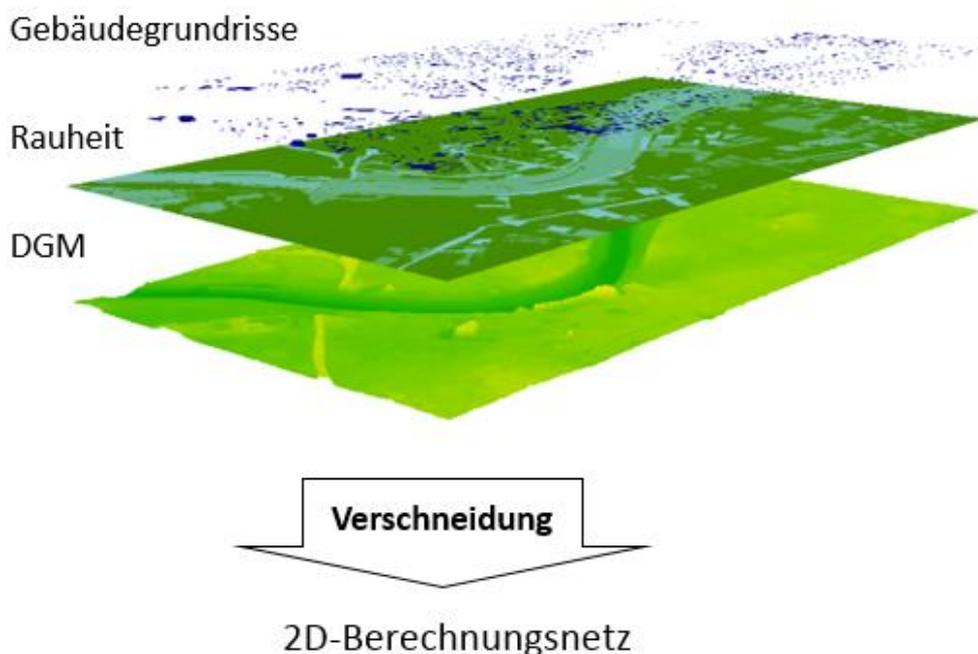


Abbildung 25: Ermittlung des Berechnungsgitters für 2D-HN-Simulationen durch Verschneidung verschiedener geometrischer Informationen am Beispiel der Stadt Dresden

Aus der Verschneidung aller geometrischen Informationen ergibt sich ein zweidimensionales Berechnungsnetz, wie Abbildung 25 am Beispiel der Dresdner Innenstadt gezeigt. Im Projekt wurden Möglichkeiten zur Automatisierung dieser Vorgänge untersucht.

### 3.2.9 Modellvorbereitung für den Anwendungsfall Dresden

Die im Rahmen der Phase 1 grundsätzlich entwickelte Methodik, beginnend mit dem aufbereiteten Stadtmodell, über die Nutzung der webbasierten Stadtmodellplattform bis hin zur Modellvorbereitung (Randbedingungen) und Simulation wurde in ausgewählten Bereichen des in Abbildung 26 dargestellten Untersuchungsgebietes getestet. Die Festlegung dieses Hauptuntersuchungsgebietes erfolgte in Abstimmung mit dem Umweltamt der Stadt Dresden.



Abbildung 26: Definiertes Untersuchungsgebiet in Dresden

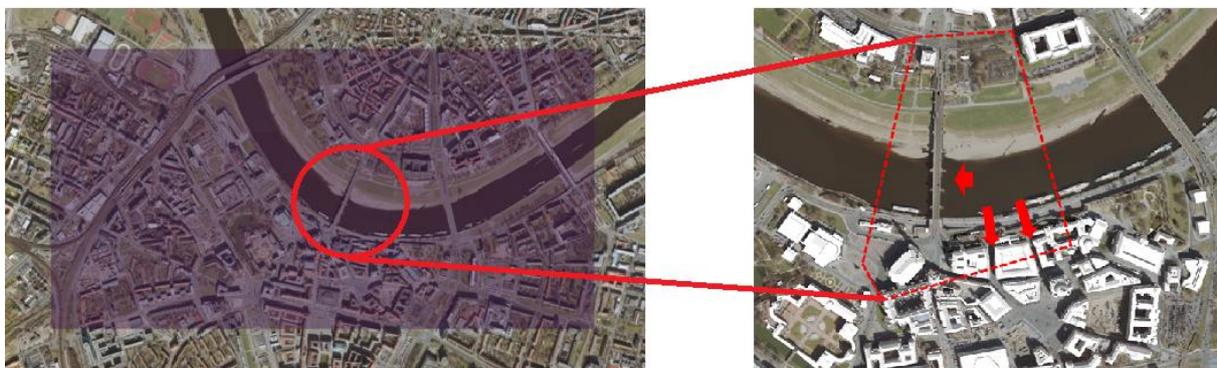


Abbildung 27: Gebietsauswahl in der 3D-Stadtmodellplattform (links) und Definition des Detailbereichs um Augustusbrücke und Terrassenufer für erste 3D-Untersuchungen (rechts)

Die in Abbildung 27 in der Stadtmodellplattform dargestellte rechteckige Gebietsauswahl beinhaltet das vorgeschlagene Untersuchungsgebiet in Dresden. Für die ersten noch vereinfachten 3D-Untersuchungen in einem realen Kontext wurde der Bereich um die Augustusbrücke gewählt. Dieser eignet sich aufgrund des komplexen Strömungsverhaltens in Folge der Durch-, Um- und Überströmung der Augustusbrücke sowie der Durchfahrten des Terrassenufers in Richtung Innenstadt ideal für detaillierte 3D-Simulationen. Diese neuralgischen Punkte sind in Abbildung 28 nochmals in der Seitenansicht sowie in Abbildung 29 beim Hochwasser im Jahr 2013 dargestellt. Somit besitzt der ausgewählte Detailbereich um die Augustusbrücke alle Anforderungen, um die Vorteile der 3D-Simulation sowie die Funktionsfähigkeit der Schnittstelle zwischen Stadtmodellplattform und Simulationsprogramm aufzuzeigen. Alle Elemente aus den Stadtmodellen, wie Gebäudemodelle, Geländemodell, Bathymetrie des Flusses und Landnutzungs-klassen sind darin bereits enthalten.

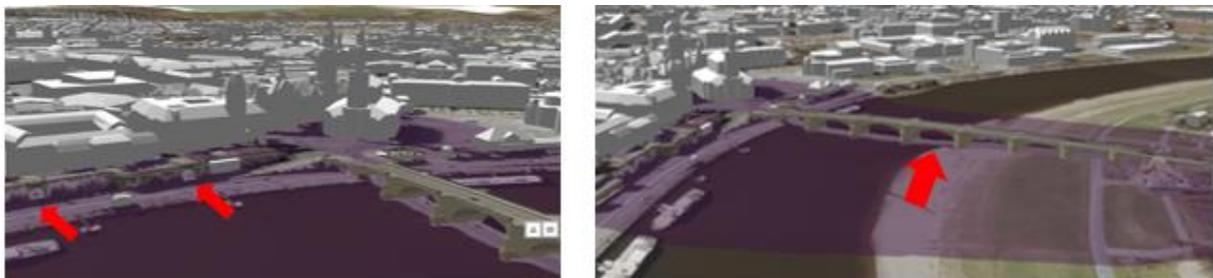


Abbildung 28: Augustusbrücke und Terrassenufer mit Durchfahrten als neuralgische Punkte im Abfluss der Elbe im Stadtbereich von Dresden

So schnell sich die Bereitstellung des Modells aus den verschiedenen Datenquellen über die entwickelte Export-Import-Schnittstelle aus der Stadtmodellplattform in die Simulationsumgebung von ANSYS bewerkstelligen ließ, so aufwendig ergab sich die für die Simulation erforderliche Geometrieaufbereitung des Szenarios „Augustusbrücke“. Dies ist darin begründet, dass das zur Verfügung gestellte CAD-Modell der Brücke zwar die zentralen geometrischen Details des Bauwerks enthält, jedoch nicht als konsistentes Volumenmodell oder CityGML-Objekt vorliegt und lediglich als generisches Objekt aus einzelnen unzusammenhängenden Flächen und Linien in der Datenbank vorlag.

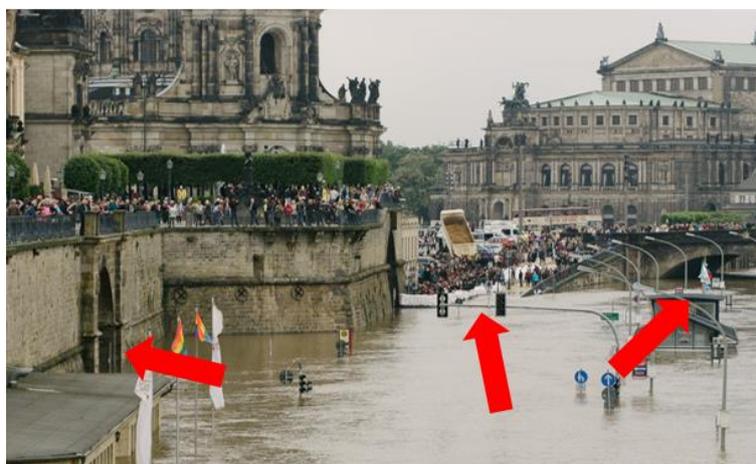


Abbildung 29: Augustusbrücke und Terrassenufer beim Hochwasser am 04.06.2013, 16:30 Uhr (Quelle: Sächsische Zeitung)

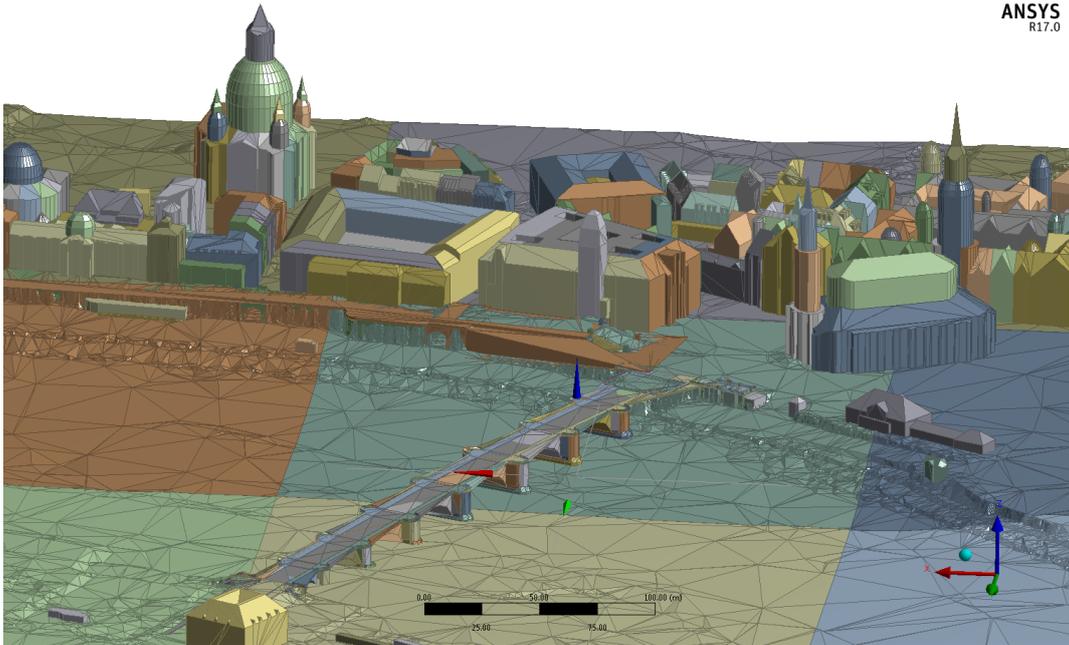


Abbildung 30: Import der 3D-Geometrie des Szenarios um die Augustusbrücke in die Simulationsumgebung von ANSYS

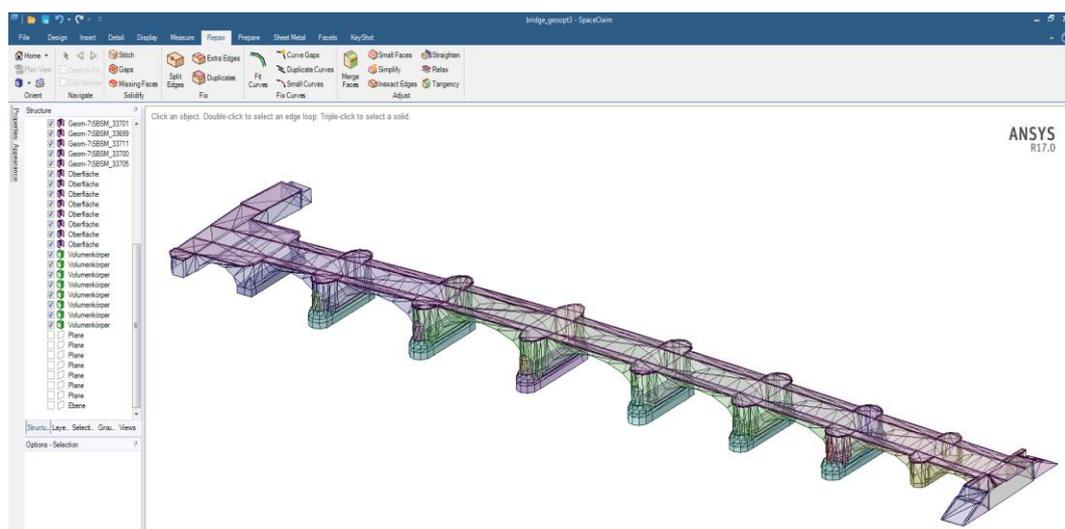


Abbildung 31: Import des zur Verfügung gestellten und unzureichenden Flächenmodells der Augustusbrücke in ANSYS SpaceClaim

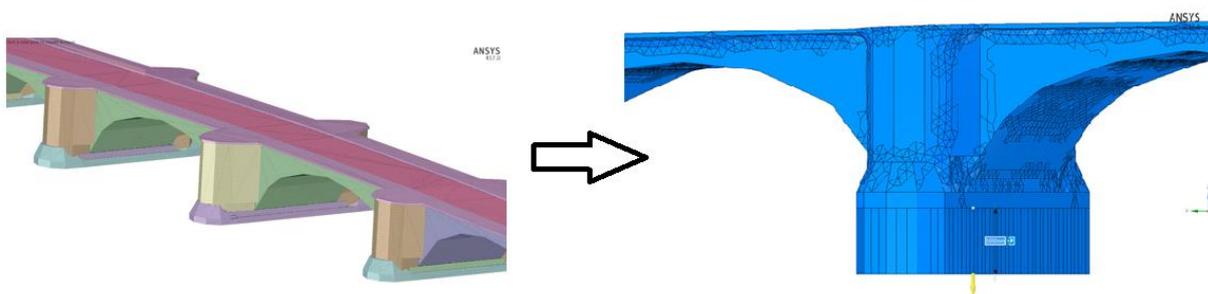


Abbildung 32: Darstellung der letzten Prozessschritte bei der Aufbereitung des Brückenmodells zu einem konsistenten Volumenmodell

Abbildung 30 zeigt die zunächst in ANSYS importierte Geometrie, die neben Augustusbrücke und Terrassenufer auch den angrenzenden Stadtmodellausschnitt bis zur Frauenkirche beinhaltet und in der dargestellten Betrachtungsentfernung visuell stimmig erscheint. Aber erst eine manuelle Aufbereitung aller Geometriebestandteile, wie in Abbildung 31 und Abbildung 32 exemplarisch für die Brücke dargestellt, führte zu einer für 3D-HN-Simulationen notwendige konsistente Geometriebeschreibung über fehlstellenfreie (Lücken, Spalten, usw.) Volumenkörper. Der Prozess der Geometrieaufbereitung konnte differenziert für die einzelnen typischen Modellbestandteile (CityGML-Gebäudeobjekte, generische Objekte und Geländemodellobjekte) vereinheitlicht werden. Dies stellt die Grundlage für eine robuste und effiziente Modellaufbereitung dar, die universell anwendbar ist und die für Phase 2 angestrebte Automatisierung ermöglicht. Hierzu zählt beispielsweise auch die Verlängerung der Brückenpfeiler von der Wasseroberkante zum Zeitpunkt der Modellerfassung nach unten, um eine Verschneidung mit dem Geländemodell im Bereich der Bathymetrie der Elbe zu erreichen, wie in Abbildung 32 auf der rechten Seite ersichtlich ist. Die in Abbildung 34 dargestellte Zusammenführung der einzeln aufbereiteten Modellobjekte erlaubt schließlich die Definition des Wasservolumenkörpers, der in den nächsten Schritten vernetzt und für die Analyse mit Randbedingungen versehen werden muss.

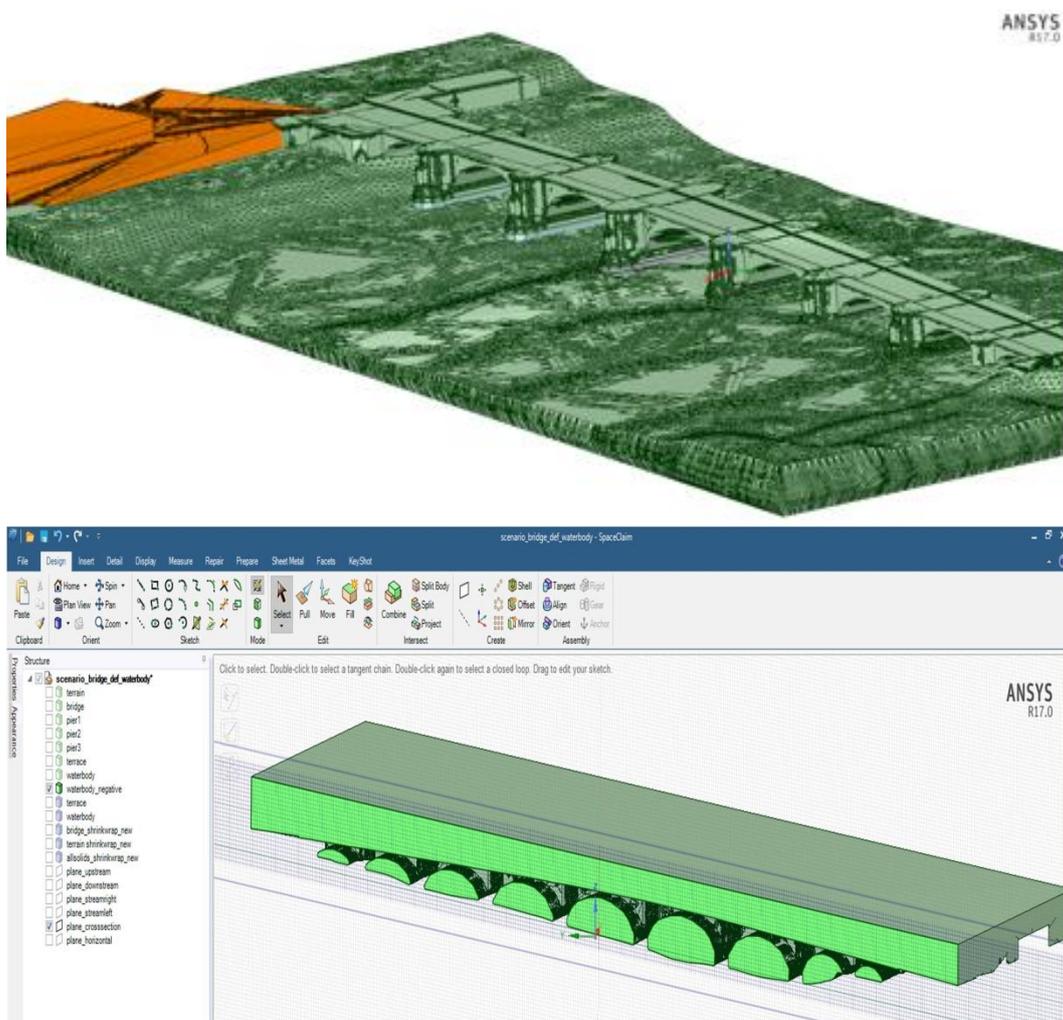


Abbildung 33: Zusammenführung der aufbereiteten Einzelmodelle (oben) für die Definition des negativen Wasservolumenkörpers, dargestellt als Querschnitt im Brückenbereich (unten)

### 3.2.10 3D-Hochwassersimulationen für den Anwendungsfall Dresden

Mit dem zuvor aufbereiteten und nun vernetzten Modell wurde zunächst ein Mittelwasserabfluss (MQ-Szenario) modelliert. Die Geschwindigkeitsverteilung an der Wasseroberfläche der Elbe und die allgemeine Wasserspiegellage im Bereich der Augustusbrücke als Ergebnisse der 3D-Simulation sind in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellt.

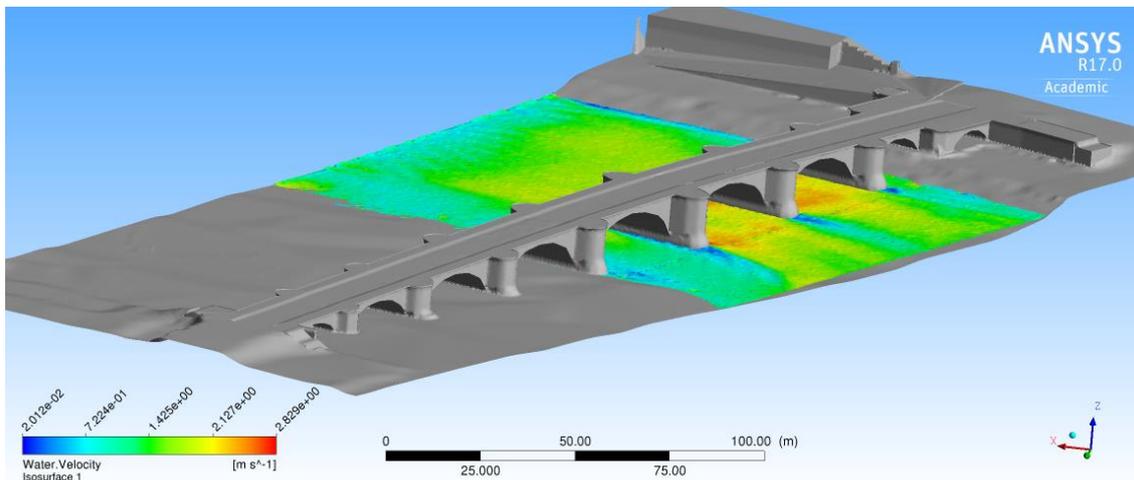


Abbildung 34: Geschwindigkeitsverteilung der Elbe im Bereich der Augustusbrücke als Ergebnis einer 3D-Simulation (MQ-Szenario)

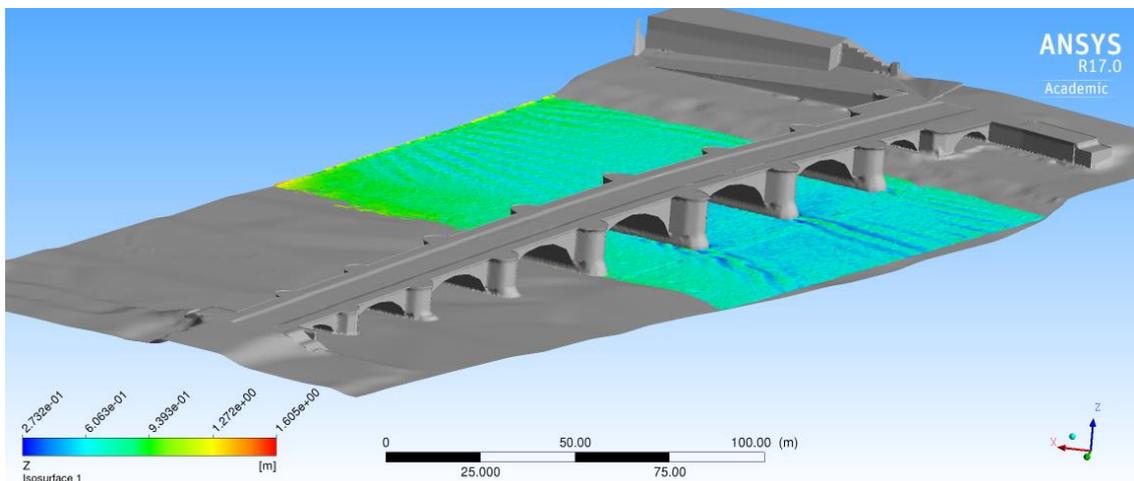


Abbildung 35: Wasserspiegellage der Elbe im Bereich der Augustusbrücke als Ergebnis einer 3D-Simulation (MQ-Szenario)

Auf Basis der guten Ergebnisse für den Mittelwasserabfluss wurde für die Validierung des Modells das Hochwasserereignis aus dem Jahr 2013 (HQ-Szenario) modelliert. Basierend auf den bekannten hydraulischen Randbedingungen des Szenarios wurde ein 3D Simulationsmodell mit etwa 5 Mio. Elementen aufgebaut. Die notwendige Elementgröße betrug hierbei in Detailbereichen lediglich 20 cm. Abbildung 36 vergleicht beispielsweise eine reale Aufnahme am Lattenpegel der Augustusbrücke mit der simulierten Wasserspiegellage des 3D-Modells und zeigt eine gute Übereinstimmung. Auch am altstadtseitigen Widerlager der Augustusbrücke bildet

das 3D-Modell das Hochwasserszenario aus dem Jahr 2013 in guter Genauigkeit ab (s. Abbildung 37).

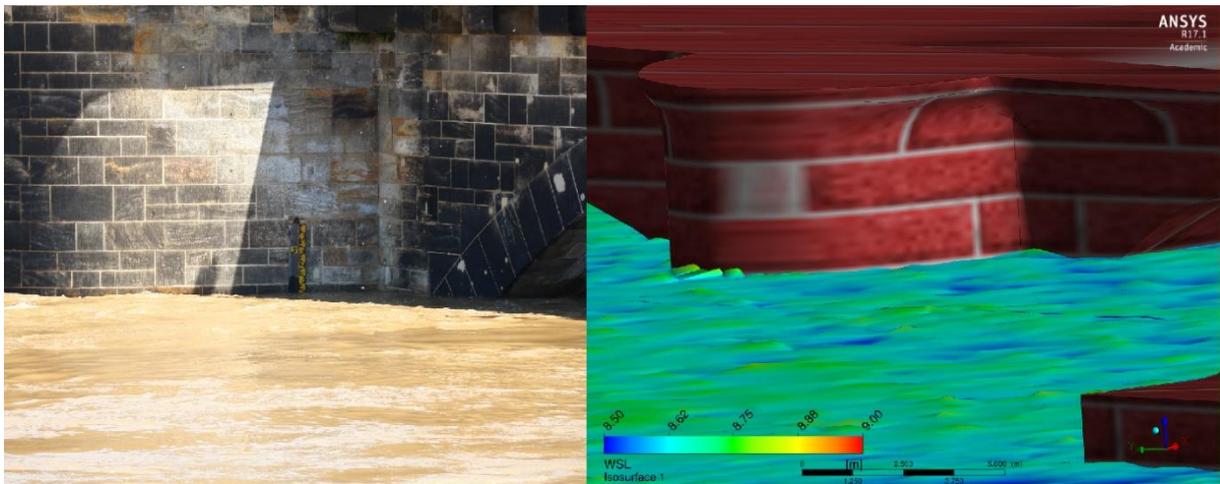


Abbildung 36: Wasserspiegellage im Bereich des Lattenpegels an der Augustusbrücke (Pegel „Dresden 1“) (HQ-Szenario, HW 2013,  $Q = 3910 \text{ m}^3/\text{s}$ )

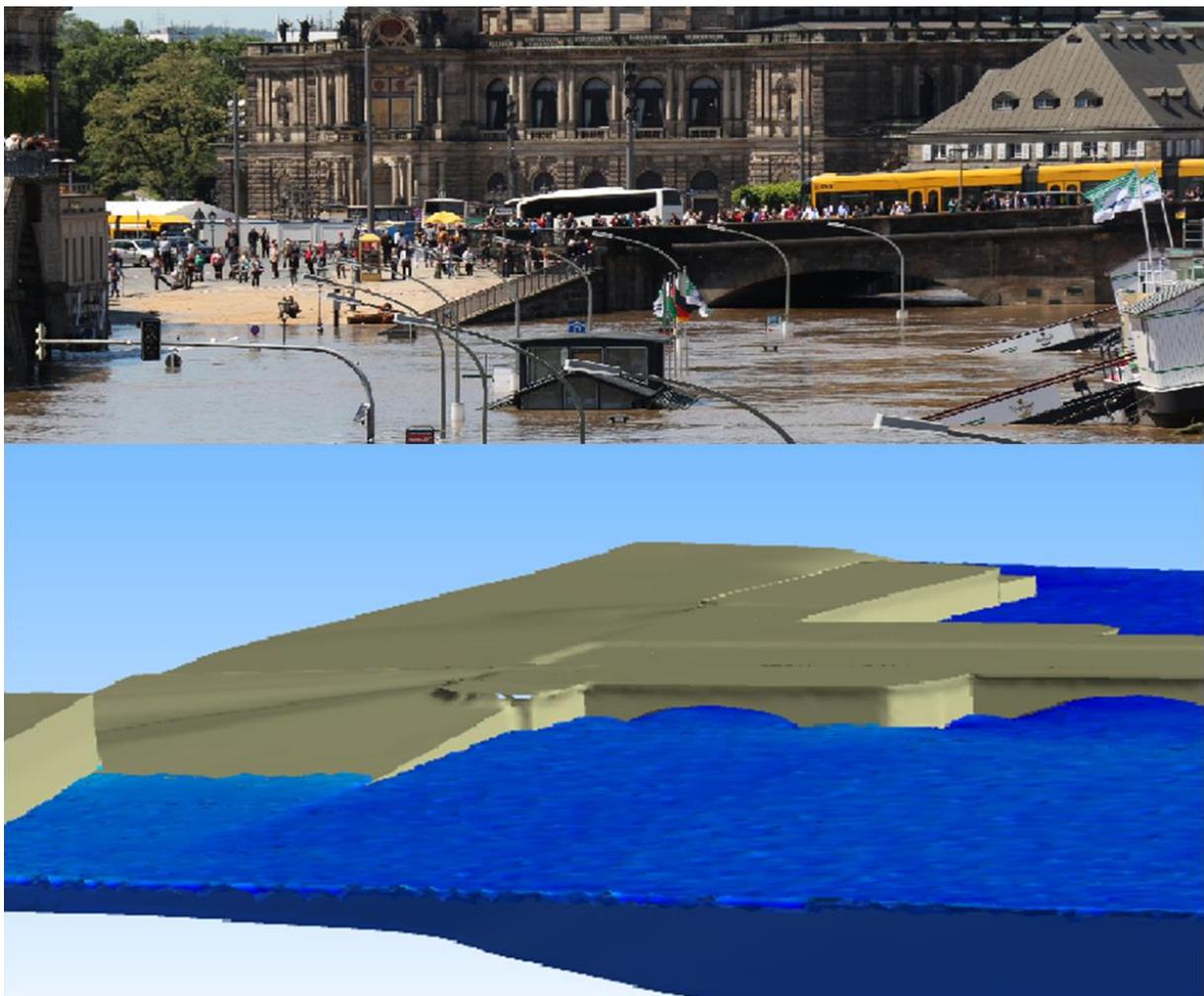


Abbildung 37: Wasserspiegellage am alstadtseitigen Widerlager der Augustusbrücke (HQ-Szenario, HW 2013,  $Q = 3910 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Die 3D Simulation des Hochwasserereignisses erlaubt aber nun eine wesentlich detailliertere Analyse des Szenarios und der damit verbunden 3D Strömungseffekte, wie sie in Abbildung 38 und Abbildung 39 veranschaulicht werden. In Abbildung 38 ist die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt der Elbe im Bereich der Augustusbrücke dargestellt. Die dunkelblauen Bereiche kennzeichnen hierin die nicht bewegte Luft. Im Bereich des Hochwassers, das bis fast an die Oberkanten der Brückenbögen reicht, treten Fließgeschwindigkeiten von bis zu 2.9 m/s auf und fokussieren sich im kurvenäußeren Bereich mit der größten Fließtiefe. In Abbildung 39 sind Fließgeschwindigkeitsverteilungen in Längsrichtung der Elbe einmal im Bereich eines Brückenpfeilers und einmal im Bereich des vorgelagerten Brückenbogens ausgewertet. Man erkennt die hinter dem Brückenpfeiler sogar bis auf null reduzierte Fließgeschwindigkeit und im Kontrast dazu die erhöhte Fließgeschwindigkeit im Bereich des Bogens.

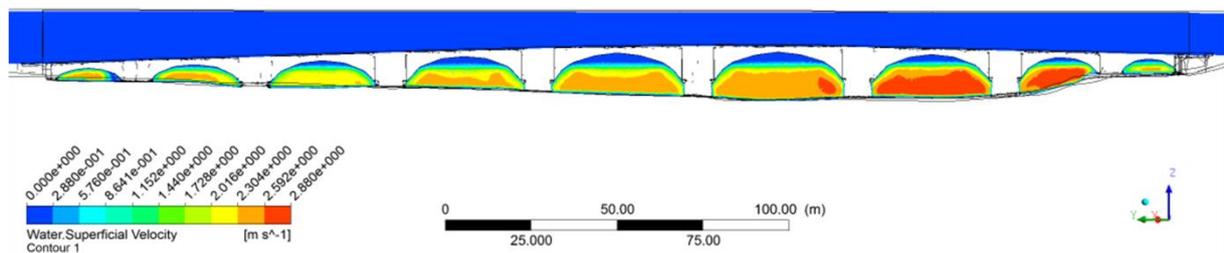


Abbildung 38: Schnittdarstellung der Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der Augustusbrücke (HQ-Szenario, HW 2013,  $Q = 3910 \text{ m}^3/\text{s}$ , blau = Luft)

Auch die konsekutive Auswertung der für die Bewertung und den Erhalt der Objekte relevanten Einwirkungen (statische und dynamische Drückeinwirkungen) und deren räumliche und zeitliche Differenzierung werden nun möglich, wie in Abbildung 40 anhand der Druckeinwirkung auf die Oberfläche der Augustusbrücke gezeigt wird.

Das gewählte Beispiel zeigt sehr anschaulich, dass bereits an klassischen Brückenbauwerken komplexere 3D Effekte auftreten, für deren Analyse 3D-HN-Modelle ein adequates und notwendiges Mittel darstellen.

Neben den Visualisierungsmöglichkeiten in der ANSYS Simulationsumgebung sollen die Ergebnisse in Phase 2 des Projekts zurück ins Stadtmodell übertragen und in geeigneter Weise für Entscheidungsträger und zur Bürgerinformation visualisiert werden.

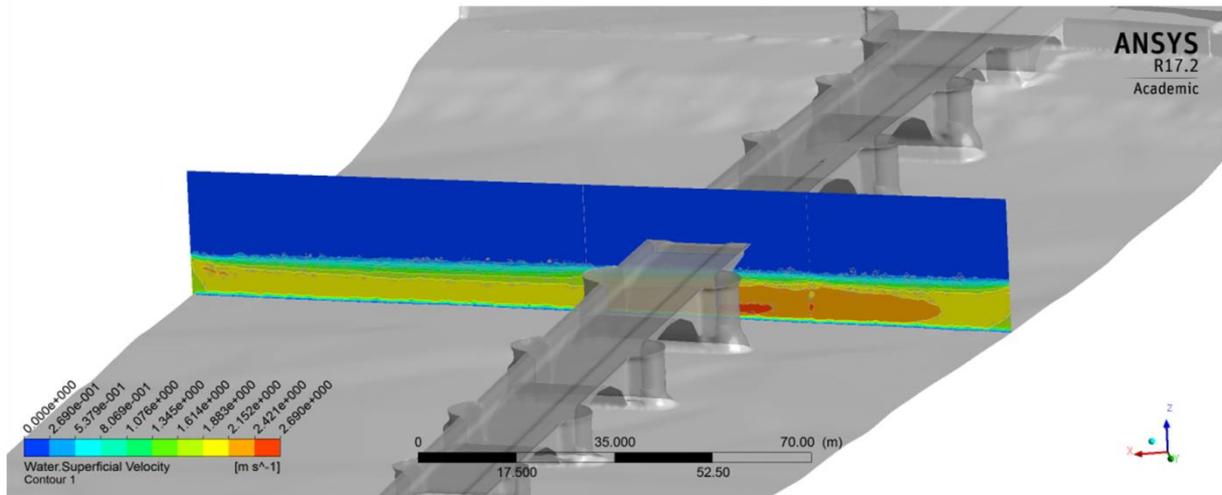
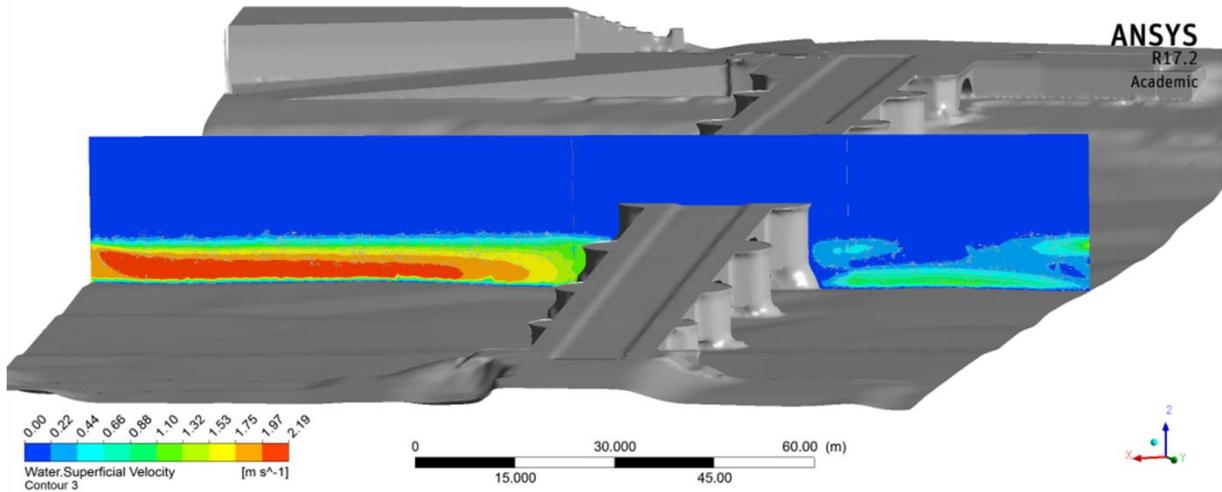


Abbildung 39: Darstellung der Geschwindigkeitsverteilungen im Bereich der Augustusbrücke in Längsschnitten auf Höhe eines Brückenpfeilers (oben) und im vorgelagerten Bogenbereich (unten) (HQ-Szenario, HW 2013,  $Q = 3910 \text{ m}^3/\text{s}$ , blau = Luft)

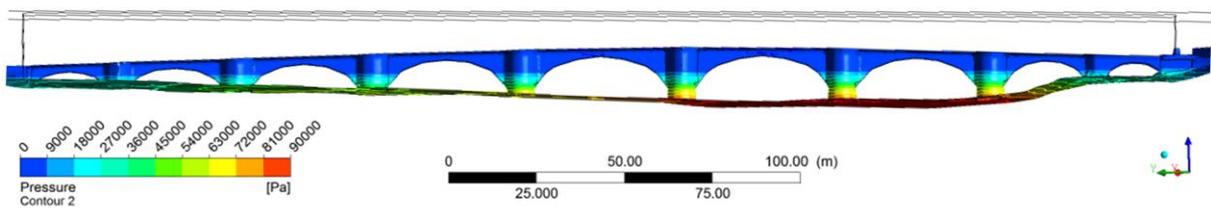


Abbildung 40: Darstellung der Druckverteilung auf die Augustusbrücke (HQ-Szenario, HW 2013,  $Q = 3910 \text{ m}^3/\text{s}$ )

### 3.3 Diskussion der Ergebnisse

Das Vorhaben hat in Phase 1 bisher die folgenden Ergebnisse erbracht:

- 3D-Stadtmodelle im CityGML-Datenstandard der Landeshauptstadt Dresden wurden für die Simulation aufbereitet und durch weitere Informationen für hydrodynamische Simulationen ergänzt, wie z. B. durch flächige Landnutzungsklassen und die Bathymetrie der Elbe. Es entstand eine webbasierte Stadtmodellplattform, welche einen Download relevanter Daten mit zahlreichen Auswahl- und Anpassungsoptionen ermöglicht.
- Durch die Stadt Dresden wurden Gebäude in den Auflösungen LoD2 und 3 bereitgestellt. Ein vom Stadtvermessungsamt Dresden bereitgestelltes Geländemodell liegt in unterschiedlichen Qualitäten vor.
- Eine Verschneidung des Geländemodells mit der Flussbathymetrie der Elbe und den beidseitigen Uferübergangsbereichen ist gelungen. Hierbei wurde berücksichtigt, dass sich die Wasserspiegelausdehnung zwischen dem Zeitpunkt der Befliegung zur Erfassung von Geländedaten und dem Zeitpunkt der Bathymetrie ändern kann.
- Generische Objekte wie u.a. Brücken wurden als einfache CAD-Modelle bereitgestellt und exemplarisch manuell für die detaillierten 3D-Analysen aufbereitet.
- Alle zur Verfügung gestellten und aufbereiteten Daten wurden in einer webbasierten Stadtmodellplattform (Web-Portal) zusammengeführt und für die Definition von Hochwasserszenarien im Stadtgebiet von Dresden bereitgestellt. Über einen Auswahldialog können die Modellgrenzen entlang von zu untersuchenden Überflutungsflächen polygonförmig selektiert werden. Die ausgewählten Stadtbereiche können für die Simulation exportiert werden.
- Von der TU Dresden wurde mit der Entwicklung eines eigenen 2D-Simulationstools begonnen, mit dem großflächige HN-Simulationen des Stadtgebietes sowie die Ermittlung von Randbedingungen für 3D-Simulationen gelingen sollen. Diese Entwicklung bildet die Grundlage für die angestrebte schnelle Berechnungs- und Analysemöglichkeiten der Hochwasserprozesse, da sie, im Vergleich zu verfügbaren Solvern, zahlreiche Vorteile bieten wird (Geschwindigkeit, maßgeschneiderte Anpassung an Ausgangsdaten des Stadtmodells, verbesserte Integration hydraulisch relevanter Strukturen, automatisierte Übertragung von Randbedingungen für 3D-Teilmodelle)
- Erste 3D-Simulationen mit einem Stadtmodellausschnitt im Bereich der innenstadtnahen Augustusbrücke in Dresden sind gelungen. Das über die Stadtmodellplattform bereitgestellte Modell enthält bereits alle notwendigen Informationen, auf deren Basis hydraulische Simulationen möglich sind (z. B. Gebäude- und Geländemodelle, eine detaillierte Brücke, die Bathymetrie des Flusses sowie Landnutzungsklassen).

Die durchgeführten Untersuchungen zu 3D-Simulationen erbringen den als Ergebnis der Projektphase 1 angestrebten Nachweis zur Anwendbarkeit der Methodik und zeigen deren Potentiale, aber auch die momentan (noch) bestehenden Restriktionen (Rechenleistung, Datenaufkommen) auf. Mittels erster 3D-HN-Simulationen an einem fiktiven Stadtmodellausschnitt konnten beispielsweise optimale Simulationsparameter bezüglich der Geometriequalität, Netzqualität, Randbedingungen, Turbulenzmodelle, Iterationsverfahren, Zeitschrittweite, Konvergenzkriterien, usw. identifiziert werden. Damit kann eine hinreichend genaue und effiziente Abbildung

des Fließverhaltens in komplexen urbanen Gebieten sichergestellt werden. Nicht zuletzt die detaillierten Auswertemöglichkeiten der 3D-Analysen tragen somit zu verbesserten Hochwasserrisikoanalysen im urbanen Raum bei.

Die Vor- und Aufbereitung von Stadtmodellen für die Hochwassersimulation hat sich jedoch als anspruchsvoller und umfangreicher erwiesen als zum Zeitpunkt der Antragstellung vermutet. Da der Aufwand zur Erstellung der HN-Modelle unmittelbar von der Qualität der Eingangsdaten, in diesem Fall vorrangig der Stadtmodelldaten, abhängt, resultierte daraus ebenfalls ein höherer Aufwand als ursprünglich angenommen. Zwar wurden Bereinigungsverfahren für inkonsistente Geometrien oder Überschneidungen in den Modellen entwickelt, jedoch muss eingestanden werden, dass der Nachbereitungsaufwand momentan noch nicht akzeptabel ist.

Eine Sonderrolle bei den Objekten nehmen Brücken ein. Als flussquerende oder in flussnähe befindliche Bauwerke besitzt insbesondere der bauwerksbedingte Verbauungsgrad des Abflussprofils eine hohe Relevanz für die Hochwasserableitung in der Stadt. In besonders hohem Maße betrifft das historische Brücken, welche üblicherweise als Bogenkonstruktionen mit relativ breiten Pfeilern ausgebildet sind, woraus eine beträchtliche Verbauung des Fließgewässerquerschnitts resultiert. Zudem erhöht sich der Verbauungsgrad bei zunehmendem Wasserstand aufgrund des damit einhergehenden stärkeren Einstaus der bogenförmigen Brückenöffnungen. 3D-HN-Modelle sind in der Lage, derartige Änderungen bzw. deren Auswirkungen auf die hydraulischen Verhältnisse unmittelbar zu berücksichtigen. Eventuelle Auf- und Rückstaueffekte, wie sie bei Extremhochwassern speziell an historischen Brücken häufig zu beobachten sind und wodurch verheerende Schäden hervorgerufen werden können (z. B. Pöppelmannbrücke in Grimma beim HW 2002), werden in 3D-HN-Simulationen unmittelbar berücksichtigt und ausgewiesen.

2D-HN-Modelle, die üblicherweise nur die Grundrisse der Brückenpfeiler in Form von nicht durch- oder überströmbaren Lücken im Berechnungsnetz abbilden, sind nur bedingt in der Lage, derartige Effekte abzubilden. Gleichwohl ist es auch dort möglich, Höhenlagen von Brückenunterkanten zu definieren, so dass ein Druckabfluss berechnet wird, sobald der Wasserspiegel dieses Höhenniveau erreicht. Dennoch ist die Realitätsnähe der Ergebnisse der 2D-HN-Simulation im Vergleich zu denen der 3D-HN-Simulationen speziell an Querbauwerken i. d. R. geringer einzuschätzen.

Für die angestrebten Analyseverfahren wurden ideale Prozessketten erarbeitet und Strategien zur Automatisierbarkeit untersucht. Je besser die gesamten Prozesse integriert und automatisiert werden können, desto leichter können später Lösungen zu Berechnungsdienstleistungen für Hochwasserrisikoanalysen angeboten werden. Hier sind Cloud-basierte Lösungen genauso denkbar wie die Einbeziehung von Hochleistungsrechenzentren. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die Automatisierbarkeit stark von der Qualität der verschiedenen vorhandenen Datenquellen abhängt. Wenn gut gepflegte Stadtdateien in hoher Qualität vorliegen, erscheint eine weitgehende Automatisierung und damit eine Modellerstellung, Analyse und Auswertung „auf Knopfdruck“ möglich. Weisen aber einige Modellbestandteile, wie die generischen Brückenobjekte im untersuchten Fall, eine nicht ausreichende Qualität auf, so muss das Modell aufbereitet werden. Dies gelang mit dem CAD-Werkzeug SpaceClaim in ANSYS. Im Rahmen der Untersuchungen konnten für die unterschiedlichen Objekttypen zwar standardisierte Optimierungs-

prozesse erarbeitet werden, diese sind aber nach gegenwärtigem Stand nicht voll automatisierbar und können lediglich durch gezielte Anwenderhinweise, sogenannte Wizards, unterstützt werden. Auf der anderen Seite zeigen die erzielten Ergebnisse aber auch, dass bei unterschiedlichen Qualitäten der Basisdaten stets eine standardisierte Modellaufbereitung, Nachbereitung und Anpassung möglich ist, und somit robuste und ganzheitliche Verfahren entwickelt wurden, die den realen Herausforderungen gewachsen sind.

### **3.4 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse**

#### **3.4.1 Ökologische Bewertung**

Mit der webbasierten Stadtmodellplattform und den verschiedenen Analyseverfahren, insbesondere aber mit der noch in Phase 2 zu entwickelnden Kopplung zwischen 2D und 3D Analysen und der Ergebnisvisualisierung in der Stadtmodellplattform, können für hochwassergefährdete Städte, wie z. B. Dresden und Magdeburg, hydrodynamisch-numerische Simulationen vor, während und nach einem Hochwasser erstellt werden, so dass eine unmittelbare und praxisrelevante Nutzung der Forschungsergebnisse möglich wird. Zu diesem Zweck orientieren sich die Ziele des Forschungsprojekts besonders auch an den Anforderungen, welche durch den Abteilungsleiter des Bereichs „Kommunaler Umweltschutz“ der Stadt Dresden formuliert worden sind. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf bislang unberücksichtigten Fragestellungen, die mit Hilfe der bereits entwickelten und in Phase 2 vervollständigten Analysewerkzeuge beantwortet werden können: Bei Hochwasserereignissen können neben den maximalen Wasserspiegellagen auch lokal auftretende maximale Strömungsgeschwindigkeiten, wie sie bei Systemwechseln (steigender Pegel führt z.B. zu lokalem Einströmen in tieferliegende Bereiche) zu beliebigen Zwischenpegeln auftreten können, von entscheidender Bedeutung sein. Die Abbildung dieser transienten und dynamischen Vorgänge gelingt mit Hilfe der detaillierten und gekoppelten Analysewerkzeuge.

Vor einem Hochwasser können über Prognoseberechnungen verschiedenste Szenarien simuliert werden, welche sich hinsichtlich der Randbedingungen (hydrologisches Ereignis) oder der im Modell berücksichtigten Rahmenbedingungen (Wirkung von geänderten Systemparametern) unterscheiden können. Mögliche Fragestellungen wären z. B.:

- die Analyse von Abflussganglinien unterschiedlicher Dauer bzw. Fülle oder Scheitelabflussbeträge (z. B. zur Identifizierung möglicher Hystereseeffekte)
- die Analyse des Einflusses saisonal bedingter Systemveränderungen auf die Abflusscharakteristik (z. B. geändertes Fließwiderstandsverhalten von Vegetationszonen im Sommer und im Winter)
- die Bewertung der Wirksamkeit von singular oder gekoppelt wirkender Hochwasserschutzeinrichtungen als Grundlage für Nutzen-Kosten-Analysen
- Untersuchung zur langfristigen Gewährleistung der hydraulischen Leistungsfähigkeit eines Fließgewässers (z. B. zur Ermittlung der Wirkung von Auflandungen); Identifizierung von potenziellen Anlandungsbereichen (Beispiel: Alte Elbe in Magdeburg)

- Nachrechnung historischer Hochwasserereignisse (z. B. für Rückschlüsse auf historische Stadtentwicklungen)

Während eines Hochwassers kann die tatsächliche Überflutung fortlaufend abgebildet werden, indem entweder von der öffentlichen Hand betriebene Sensoren (z.B. Radar an Brücken) für die Messung der Wasserstände an zentralen Aufspannpunkten abgefragt oder die Wasserspiegellagen in verortbaren Fotos aus sozialen Netzwerken („crowdsourcing“) ausgewertet werden. Außerdem können vormodellierte Überflutungsflächen für höhere Wasserstände entsprechend festgestellter Abweichungen von prognostischer und tatsächlicher Entwicklung angepasst werden. Darüber können Ressourcen der Hochwasserabwehr (z. B. ereignis- und gebietsabhängige Festlegung des Zeitpunkts und der Menge von Sandsäcken) besser eingeplant werden. Denn speziell während des Hochwassers 2013 hatte sich gezeigt, dass die Steuerung solcher Aktivitäten über soziale Netzwerke (Facebook, Twitter) grundsätzlich möglich, jedoch eine Überprüfung und Kanalisierung von Informationen zukünftig zwingend erforderlich ist, um einen effizienten Einsatz der Ressourcen zu gewährleisten.

Nach dem Hochwasser kann schließlich neues Wissen, z. B. in Form von Ereignis- oder Abweichungsanalysen zu vorberechneten Szenarien, aufgenommen werden. Dies besitzt eine hohe Bedeutung, um über die Identifizierung und anschließende Behebung von Unzulänglichkeiten im aktuellen Hochwasserrisikomanagement die Schäden bei zukünftigen Ereignissen weiter minimieren zu können.

Oft sind Hochwasserereignisse neben den gesundheitlichen und materiellen Schäden auch mit beträchtlichen Umweltschäden verbunden. In überfluteten Gebieten können Öltanks aufschwimmen, leck schlagen oder Leitungen abgerissen werden, so dass Heizöl in die Umwelt oder die Bausubstanz gelangen und Bauteile oder Isolierungen, wie z.B. Estrichdämmungen, zerstören kann. Bei der Überflutung von Kläranlagen oder Chemieanlagen werden Giftstoffe in Flüsse oder Grundwasser eingetragen. Nach Messungen der Wassergütestelle der Arbeitsgemeinschaft zur Reinhaltung der Elbe (Arge Elbe) haben die Fluten des Hochwassers 2002 zu einer fünf- bis zehnfach höheren Belastung mit Schwermetallen geführt (Quelle: FAZ 22.08.2002). Durch den Ausfall von Kläranlagen sinkt der Sauerstoffgehalt, was zu Fischsterben führt. Krankheitserreger verbreiten sich in den überfluteten Gebieten. In der Landwirtschaft entstehen neben direkten Schäden, wie z.B. Ernteauffällen oder Qualitätsverlusten, durch den Schadstoffeintrag in die Böden auch nachhaltige Schäden für die landwirtschaftliche Produktion. Aus der Überflutung und Verschlammung von Gebäuden ergeben sich große Mengen an Abfällen aller Art. Mit den bis zum Abschluss der Phase 2 des Projekts entwickelten Werkzeugen und den dadurch verbesserten Möglichkeiten beim Umgang mit Hochwasserereignissen wird natürlich auch all den damit verbundenen ökologischen Gefahren und Risiken entgegengewirkt. Zudem bildet nicht zuletzt die im Projekt entwickelte detaillierte Analysefunktionalität für Hochwasserereignisse umfangreiche Möglichkeiten der genauen Abbildung von Transport- und Ausbreitungsprozessen dieser Gefahrstoffe.

### **3.4.2 Technologische Bewertung**

Aus technologischer Sicht stellt die Kombination großer und komplexer Stadtmodelle mit strömungsmechanischen Berechnungen eine Neuerung dar. Es wurden

Grundlagen für Simulationen erarbeitet, die am Ende von Phase 2 in akzeptabler Rechenzeit realitätsnahe und für die Einsatzplanung nutzbare Ergebnisse liefern können.

Um die volle Funktionalität der 2D und 3D-Hochwassersimulationen zu erreichen und die Vorteile der verfolgten Methodik weiter aufzuzeigen, müssen in Projektphase 2 die Methodik weiter optimiert sowie weitere Anwendungsfälle (z. B. für Magdeburg) und Szenarien (z. B. versagende Hochwasserschutzmauer) untersucht werden.

Darüber hinaus ist speziell auch die anwenderfreundliche Aufbereitung und Visualisierung der Simulationsergebnisse mit Blick auf den praktischen Mehrwert der Forschungsergebnisse sehr wichtig. Auch hierzu sollen in Phase 2 noch weitreichendere Visualisierungstechniken entwickelt werden, die auf eine geeignete Rückübertragung und Darstellung der HN-Ergebnisse im Stadtmodell abzielen, um so das Risikobewusstsein der Bevölkerung aufrecht zu erhalten und zu fördern. Perspektivisch sind hier Weiternutzungen im Sinne der erweiterten Realität („augmented reality“) möglich.

### **3.4.3 Ökonomische Bewertung**

Es besteht das Ziel, dass das neue Verfahren zu einem günstigen Preis angeboten werden kann, damit es für Umweltämter und Gemeindeverwaltungen im In- und Ausland erschwinglich ist. Zudem sind alle Komponenten möglichst robust und allgemeingültig definiert, dass eine gute Übertragbarkeit der Entwicklungen auf beliebige Kommunen mit begrenzten Anpassungen möglich wird. Ob dies erreicht wird, kann erst am Ende der Phase 2 abschließend bewertet werden, die vorgestellten Ergebnisse erlauben aber gegenwärtig eine positive Prognose.

## **3.5 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabens- ergebnisse**

Zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse gemäß Bewilligungsaufgabe im Zuwendungsbescheid der DBU sind die folgenden Vorträge und Veröffentlichungen erfolgt:

- Vortrag bei einem chinesisch-deutschen Symposium in Shanghai („2016 Sino-German Symposium on Novel Materials and Techniques for Emerging Pollutants Immobilization form Aqueous Media“, Tongji University) im Jan. 2016
- Vortrag und Veröffentlichung (Tagungsband) im Rahmen des 39. Dresdner Wasserbaukolloquiums im März 2016 [Heyer et al., 2016]. Dabei entstand u. a. im Anschluss an den Vortrag die Diskussion, wie Daten für hydraulische Modelle zukünftig vorzuhalten sind, damit bei Änderungen stets nur eine zentrale Datenquelle zu aktualisieren ist. Das Forschungsprojekt liefert und verfolgt genau diesen Lösungsansatz.
- Vortrag auf der 34. CADFEM ANSYS Simulation Conference am 07.10.2016 in Nürnberg

- Vorstellung des Projektes auf der Baumesse Chemnitz (<http://www.baumesse-chemnitz.de/>) vom 03.02.-05.02.17. Der Messestand wurde durch die Ingenieurkammer Sachsen zum Thema "Hochwasserrisikomanagement im urbanen Raum" veranlasst.
- Besuch des niederländischen Königspaares in Dessau am 10.02.17 und Vorstellung von "Wasserthemen" (Stand gemeinsam mit Sächsischem Ministerium für Umwelt und Landwirtschaft)
- Messe "Haus Dresden 2017" (<https://www.messen.de/de/7587/dresden/haus-dresden/info>) vom 03.03.-05.03.17. Der Messestand wurde durch die Ingenieurkammer Sachsen zum Thema "Hochwasserrisikomanagement im urbanen Raum" veranlasst.
- Projektpräsentation auf dem Wasserbaukolloquium 2017 in Dresden vom 09.03.-10.03.17
- Bewerbung (akzeptierter Abstract, Aufforderung zur Einreichung eines Vollbeitrags) zur Projektpräsentation auf dem nächsten Weltkongress der International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) im August 2017 in Kuala Lumpur (Malaysia)

Ferner wurde im Oktober 2016 an der TU Dresden eine Diplomarbeit fertiggestellt [Winker, 2016], welche sich im Kern mit der Simulation von Starkregenereignissen (Niederschlag-Abfluss-Simulation) auf Grundlage von Stadtmodelldaten mit der hier verfolgten Methodik beschäftigt hat. Im Rahmen dieser Arbeit wurden wichtige Erkenntnisse bezüglich zukünftig anzustrebender Entwicklungen in der Erstellung semantischer, digitaler Stadtmodelle erhalten.

## 4 Fazit

Die erste Phase des FuE-Projekts war neben dem Aufbau einer Stadtmodellplattform auf die Untersuchung der grundsätzlichen Machbarkeit der Transformation von 3D-Stadtmodell-Daten in HN-Modelle sowie auf die direkte Rückübertragung und Darstellung der Simulationsergebnisse in die Stadtmodelle fokussiert. Neben der Entwicklung der benötigten Schnittstellen standen die Entwicklung (2D-Modell) und die zweckmäßige Anpassung (3D-Modell) der hydronumerischen Solver im Mittelpunkt der Bearbeitung. Es wurde zunächst ein vereinfachtes 3D-HN-Modell erprobt, welches einige wesentliche Komponenten eines urbanen Gebiets beinhaltet. Aus hydronumerischer Sicht weist dieses Modell bereits eine deutlich höhere Komplexität auf als die sonst üblichen 2D-HN-Modelle, da z. B. eine tiefendifferenzierte Analyse der Strömungsverhältnisse und daraus resultierender Effekte (z. B. Wasserspiegellage in Flusskrümmungen) und Einwirkungen (z. B. hydrodynamische Druckverteilungen an Bauwerken) möglich wird.

Neben mehreren Gebäuden im LOD 1 beinhaltet das Modell u. a. eine Brücke, Hochwasserschutzwände sowie verschiedene lokale Rauheiten, welche als Fließwiderstände in die Berechnung eingehen. Wesentliches Ziel war es dabei auch, neben der dreidimensionalen Abbildung des Strömungsverhaltens, die aktuell bestehenden soft- und hardwareseitigen Erfordernisse und Limitierungen zu analysieren.

Die bisherigen Entwicklungen und Ergebnisse sollen in der angestrebten zweiten Phase des Vorhabens optimiert bzw. finalisiert, weiter miteinander verbunden und bestmöglich automatisiert werden, damit ein praxistauglicher Prototyp entsteht, wie er für das Gesamtvorhaben angestrebt wird. Für die zweite Phase, die jetzt beantragt wird, bestehen folgende Kernziele, die einer logischen und konsequenten Fortführung der Forschungen entsprechen und deutlich über die angestrebten und erreichten Entwicklungen der ersten Phase hinausgehen:

- Entwicklung einer kombinierten und detaillierten Analysefunktionalität aus der Kopplung von großräumigen 2D-Analysen mit detaillierten 3D-Analysen auf Basis der Stadtmodellplattform zur Abbildung transienter und dynamischer Vorgänge an komplexen dreidimensionalen Modellen. Hierzu zählt die Finalisierung des 2D-HN-Solvers, die Entwicklung der Schnittstelle zwischen 2D und 3D-HN-Simulation auf Basis der Stadtmodellplattform und die bestmögliche Automatisierung aller Prozesse.
- Test und Validierung des Verfahrens anhand von komplexeren Realszenarien aus vorhandenen Daten der Städte Dresden und Magdeburg. Die repräsentativen Szenarien werden in enger Kooperation mit den Städtepartnern untersucht und liefern daher einen direkten Mehrwert für die Aufgaben der Städtepartner im Sinne eines modernen Hochwasserrisikomanagements. Sie befördern zudem die Demonstration und Verbreitung der Projektergebnisse. Hierzu wird auch eine Stadtmodellplattform für die Stadt Magdeburg aufgebaut.
- Realitätsnahe und zweckorientierte Visualisierung der zentralen Simulationsergebnisse (Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, spezifische Abflüsse) in der webbasierten Stadtmodellplattform. Der Betroffenheitsgrad von kritischen Infrastrukturen (z. B. Krankenhäuser, Versorgungswerke, usw.) soll zur anschaulichen Information von Bürgern und Entscheidungsträgern differenziert ausgewiesen werden. Zusätzlich erfolgt eine Verlinkung mit sensorerfassten Realdaten (Überflutungsflächen, Wasserstände) zur verbesserten Bürgerinformation während eines Hochwasserereignisses.

Der im Vorhaben verfolgte neue Ansatz der Verknüpfung semantischer 3D-Stadtmodelle mit hydronumerischen Solvern trägt zu einer Weiterentwicklung des modernen Hochwasserrisikomanagements bei und im weiteren Sinne auch zur Minimierung damit verbundenen ökologischen Risiken. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund der rasanten Entwicklung auf dem Gebiet der Gebäudedigitalisierung, wie z. B. dem Building Information Modeling (BIM). Infolge dieser Entwicklung werden zahlreiche weitere Informationen auf der Einwirkungs- (Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten usw.) und auf der Widerstandsseite (Gebäudeelemente, innere Gebäudestruktur usw.) 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. Sie sind hierfür eine ideal geeignete Basistechnologie.

## Literaturverzeichnis

- Bates et al. Bates, P.; Horrit, M.; Fewtrell, T. J. (2010): A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modeling. *Journal of Hydrology* 387:33-45.
- Gröger et al. 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.
- Falter et al. Falter, D.; Schröter, K.; Nguyen, V. D.; Vorogushyn, S.; Kreibich, H.; Hundecha, Y.; Apel, B.; Merz, B. (2015): Spatially coherent flood risk assessment based on long-term continuous simulation with a coupled model chain. *Journal of Hydrology* 524: 182–193.
- INSPIRE INSPIRE Thematic Working Group Buildings (2013): D2.8.III.2 INSPIRE Data Specification on Buildings – Draft Technical Guidelines. INSPIRE, 214 pages.
- Heyer et al. Heyer, T.; Trometer, S.; Hammoudi, H.; Schilling, A., Muvdi, R.T. (2017): Flood simulation and risk analysis based on semantic 3d city models coupled with hydronumeric models (FloRiCiMo). 37th IAHR World Congress. Kuala Lumpur, Malaysia 13-18 August 2017 (Abstract angenommen).
- Heyer et al. Heyer, T.; Trometer, S.; Hammoudi, H.; Schilling, A., Muvdi, R.T. (2016): Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum auf Basis von gekoppelten hydrodynamisch-numerischen Modellen und semantischen 3D-Stadtmodellen. 39. Dresdner Wasserbaukolloquium 2016, „Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement“
- Hunter et al. Hunter, N. M.; Bates, P. D.; Neelz, S.; Pender, G.; Villanueva, I.; Wright, N. G.; Liang D., Falconer R. A.; Lin B.; Waller S.; Crossley A. & Mason D. C. (2008): Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management*, 161, WMI, 13-30.
- Liang 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 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
- Toro Toro, E (2001): *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*. 326p. Wiley.
- Winker Winker, D. (2016): Hydronumerische Analyse urbaner Sturzfluten im Stadtgebiet Dresdens auf Basis gekoppelter 3D-Stadt- und 2D-HN-Modelle. Diplomarbeit. Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik. TU Dresden