

virtualcitySYSTEMS GmbH, Berlin  
Technische Universität Dresden, Fakultät  
Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Technische  
Hydromechanik, Professur Wasserbau

**Detaillierte Hochwasserrisikoanalyse im urbanen  
Raum auf der Basis von gekoppelten  
hydrodynamisch-numerischen Modellen und 3D-  
Stadtmodellen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert  
unter AZ 34205-23 von der Deutschen Bundesstiftung  
Umwelt

von

Dr.-Ing. Stefan Trometer,  
Dr. rer. nat. Arne Schilling,  
Dr.-Ing. Torsten Heyer,  
Dipl.-Ing. Rocco Zimmermann  
Dipl.-Ing. Hellen Hammoudi,  
B. Sc. Lars Backaus  
und Dr.-Ing. Klaus Mager

Oktober 2019

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



Az	<b>34205</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>235.104 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

<b>Antragstitel</b>	<b>Detaillierte 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>01.02.2018</b>	<b>31.10.2019</b>	<b>1</b>

Zwischenbericht

<b>Bewilligungsempfänger</b>	virtualcitySYSTEMS GmbH (VCS) Tautenzienstraße 7 b/c 10789 Berlin	Tel 08092 7005-35 Fax 08092 7005-570
		Projektleitung Dr.-Ing. Stefan Trometer
		Bearbeiter Dr.-Ing. Stefan Trometer

<b>Kooperationspartner</b>	Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydro-mechanik (IWD), George-Bähr-Straße 1, 01062 Dresden
----------------------------	---

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

Vor dem Hintergrund der geforderten Umsetzung der Europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EU-HWRM-RL) stellt die Simulation von Überflutungsprozessen infolge Hochwasser aktuell einen bedeutenden Arbeits- und Forschungsschwerpunkt in den Umweltwissenschaften dar. Dabei verschiebt sich der Fokus zunehmend von der Analyse großflächiger Überflutungen in ländlichen Räumen hin zu Analysen von komplexeren Überflutungsszenarien in städtischen Gebieten, da das vorhandene Schadenspotenzial dort i. d. R. deutlich größer ist.

Für Mensch und Umwelt bedeuten Hochwasser erhebliche Belastungen, da - neben den immensen gesundheitlichen Gefährdungen - große Schäden an Gebäuden oder Industrieanlagen entstehen, Schadstoffe in die Umwelt gelangen können und enorme Mengen an unbrauchbar gewordenen Gegenständen als Müll zu entsorgen sind. Große Teile der Infrastruktur werden lahmgelegt.

Um ein besseres Hochwasserrisikomanagement speziell im urbanen Raum zu ermöglichen, entwickelten die Kooperationspartner VCS und das IWD eine Methodik der detaillierten Hochwasserrisikoanalyse, worin erstmals hydrodynamisch-numerische (HN-) Simulationen mit detaillierten, semantischen 3D-Stadtmodellen kombiniert wurden.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden sowie Workflow-Einführung**

- Entwicklung einer kombinierten und detaillierten Analysefunktionalität aus der Kopplung von großräumigen 2D-Analysen mit detaillierten 3D-Analysen auf Basis einer Stadtmodellplattform zur Abbildung transienter und dynamischer Vorgänge an komplexen dreidimensionalen Modellen
- Test und Validierung der Verfahren anhand von komplexeren Realszenarien aus vorhandenen Daten der Stadt Dresden. Die repräsentativen Szenarien wurden in enger Kooperation mit dem Umweltamt der Stadt Dresden untersucht und liefern daher einen direkten Mehrwert für die Aufgaben des städtischen Partners im Sinne eines modernen Hochwasserrisikomanagements.
- Realitätsnahe und zweckorientierte Visualisierung der zentralen Simulationsergebnisse (Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, spezifische Abflüsse) zur Schaffung bzw. Steigerung des Risikobewusstseins in der Bevölkerung und zur besseren Information von Entscheidungsträgern; differenzierte Ausweisung des Betroffenheitsgrades von Gebäudeobjekten

## **Ergebnisse und Diskussion**

Im Projekt ist ein durchgängiger Prozess als Prototyp für die detaillierte Hochwasserrisikoanalyse entstanden. Auf Basis einer Internet-basierten Stadtmodellplattform (Web-Portal), auf die der Endanwender über einen Browser zugreifen kann, werden transiente und dynamische Vorgänge von Hochwasserereignissen abgebildet. Alle zur Verfügung gestellten und aufbereiteten Daten wurden in der Stadtmodellplattform zusammengeführt und für die Definition von Hochwasserszenarien im Stadtgebiet von Dresden bereitgestellt. Die ausgewählten Stadtbereiche können für die Simulation exportiert werden. Die einzelnen Dienste können als Widgets oder Plugins zugeschaltet werden. Die folgenden Funktionalitäten sind enthalten:

- Durchgängiger Workflow für detaillierte Hochwasserrisikoanalysen, der die Funktionalität aus großräumigen 2D-Analysen mit detaillierten 3D-Analysen abgegrenzter Objekte auf Basis der Stadtmodellplattform zur Abbildung transienter und dynamischer Vorgänge an komplexen dreidimensionalen Modellen kombiniert
- (Berücksichtigung operativer Hochwasserschutzmaßnahmen im Modell. Hiermit können z. B. temporär errichtete Barrieren aus Sandsäcken oder Spundwänden berücksichtigt werden.)
- Einbindung zusätzlicher Daten, z. B. aus Flusspeilungen (Bathymetrie) oder dem 3D-Laserscanning sowie von Dritten gemessenen Pegelständen
- Ermittlung möglicher Hochwasserschäden und deren Darstellung im Stadtmodell. Für ein Hochwasserszenario können pro Gebäude oder für einen ganzen Stadtteil Schadensprognosen erstellt werden.
- Visualisierung und Aufbereitung der Berechnungsergebnisse nach Vorgaben des Umweltamtes der Stadt Dresden. Hierbei wurde insbesondere das Ziel verfolgt, der Bevölkerung eine Einschätzung über die Hochwassergefährdung zu vermitteln und das Risikobewusstsein zu steigern.

Das Ergebnis war nur durch ein interdisziplinär arbeitendes Team zu erreichen mit den Schwerpunkten Stadtmodell, hydraulisch-numerische Simulation und dem Rendering, das dem Bereich der Informatik zuzuordnen ist. Die Plattform kann jetzt an städtische Informationsverarbeitungssysteme angekoppelt werden. Weitere Schritte würden die Einbindung von Fachanwendern erfordern. Nachdem bei den Landesvermessungsämtern bereits die 3D-Grunddaten vorliegen, müssten die Städte und Kommunen nun den Einstieg in die Anwendung finden.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Projektergebnisse wurden mit Vertretern der Stadt Dresden sowie weiteren Organisationen (siehe Protokoll Forschungsbegleitkreis) diskutiert, die verschiedene Ansatzpunkte sehen und aufgreifen wollen:

- Bessere Information der Bürger über Hochwassergefahren und Pegelstände
- Umsetzung von Vorgaben des Freistaates Sachsen, wie z. B. Risikokarten, in der Stadtmodellplattform
- Nutzung von Augmented Reality als Angebot von Informationen über mobile Endgeräte zu Verkehr, Umwelt und – neu – zu Hochwasserständen an ausgezeichneten Punkten
- Nutzung der Plattform zur Automatisierung und Vernetzung verwandter städtischer Daten und Prozesse, wie z.B. Wasserhaushaltsfragen oder bioklimatische Erwärmung
- Abstimmung mit Nachbargemeinden, in welchen Bereichen 3D-Modelle eingeführt werden können. Vorrangig werden Bauwerksschadensanalysen oder Abflussverteilungsberechnungen gesehen.

## **Fazit**

Der im Vorhaben verfolgte neue Ansatz der Verknüpfung semantischer 3D-Stadtmodelle mit hydro-numerischen 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 zu ermöglichen. Generell ist davon auszugehen, dass semantische, virtuelle Stadtmodelle zunehmend als Basis für weitere Planungsaufgaben in urbanen Räumen eingesetzt werden.

# 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 .....	11
3.1 Übersicht der Arbeitsschritte und angewandten Methodik .....	11
3.2 Darstellung der erzielten Ergebnisse.....	12
3.2.1 Entwicklung einer kombinierten und detaillierten Analysefunktionalität aus der Kopplung von großräumigen 2D-Analysen mit detaillierten 3D-Analysen 12	
3.2.2 Berücksichtigung operativer Hochwasserschutzmaßnahmen im Modell 17	
3.2.3 Einbindung zusätzlicher Daten.....	19
3.2.4 Visualisierung und Aufbereitung der Berechnungsergebnisse .....	20
3.2.5 Ermittlung möglicher Schäden und deren Darstellung im Stadtmodell.	24
3.2.6 Realitätsnahe und zweckorientierte Visualisierung der zentralen Simulationsergebnisse .....	25
3.3 Diskussion der Ergebnisse.....	30
3.4 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse .....	31
3.4.1 Ökologische Bewertung .....	31
3.4.2 Technologische Bewertung .....	33
3.4.3 Ökonomische Bewertung .....	33
3.5 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse .....	33
4 Fazit.....	35
Veröffentlichungen.....	37
Vorträge.....	37

# Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1: Darstellungen von potenziellen Überflutungsflächen der Elbe im Stadtgebiet Dresdens ohne (links) und mit (rechts) Hochwasserschutzmaßnahmen .....	7
Abbildung 2: Flussdiagramm zur Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum mit den Hauptarbeitsgebieten der Projektpartner (blau: 2D-/3D-Solvertechnik seitens des IWD, grün: 3D-Stadtmodell seitens VCS), sonstige Komponenten andersfarbig .....	13
Abbildung 3: 2D-HN-Simulationen zum Vergleich verschiedener Solver und zum Test des Workflows .....	14
Abbildung 4: Simulation des Niederschlagsabflusses aus dem Jahr 2016 mit verschiedenen Diskretisierungen von 0,5 m bis 0,05 m .....	14
Abbildung 5: Datengrundlagen und Berechnungsnetzerstellung für den Aufbau von 2D-HN-Modellen.....	15
Abbildung 6: Demonstration für die Integration eines BIM-Modells in das 3D-Stadtmodell sowie der Grundlage für die sich anschließende 3D-HN-Simulation des An- und Einströmverhaltens zum BIM-Modell.....	16
Abbildung 7: Ergebnisse aus der 3D-HN-Simulation (links: Strömungskraft auf das Gebäude, rechts: turbulente kinetische Energie).....	16
Abbildung 8: Modellhafte Einbindung operativer HWS-Maßnahmen in ein 2D-HN-Berechnungsnetz (automatisiert), gelb: Damm, blau: temporäre HWS-Mauer...	18
Abbildung 9: 2D-HN-Simulation mit dem Software-Paket MIKE-21, Darstellung der Wassertiefen mit den zugehörigen Vektoren der Fließgeschwindigkeiten.....	18
Abbildung 10: Elbe und Augustusbrücke ohne (links) und mit Bathymetrie (rechts)..	19
Abbildung 11: Peildaten der Elbe (2018/19) zur Einbindung in das 3D-Stadtmodell (links als schwarzes Band dargestellt, rechts im Detail) .....	19
Abbildung 12: Live-Pegelstand an der Augustusbrücke samt Prognose als Info-Fenster in der Anwendung .....	20
Abbildung 13: Integration der Simulation in die Geodateninfrastruktur (GDI) .....	21
Abbildung 14: Aufbereitung eines Geländemodells mit Geodaten zur Vorbereitung einer HN-Simulation (je nach gewählter Ausdehnung sowie der technischen Ausstattung variieren die Modellladezeiten und die Dateigrößen erheblich.) .....	22
Abbildung 15: Simulationsergebnisse dargestellt als leicht transparente 3D-Wasserspiegellage. ....	23
Abbildung 16: Darstellung der Wasserspiegellage aus 2D Simulation verschiedener Szenarien. ....	23
Abbildung 17: Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten von Ergebnissen aus der 2D-Simulation: Fließgeschwindigkeit (links), Wassertiefe (rechts) bei einem außergewöhnliches HW. ....	24
Abbildung 18: Gebäudeschadensfunktionen (Der Schaden steigt mit der Wassertiefe um das Gebäude.).....	24
Abbildung 19. Schadensabschätzung für ein ausgewähltes Gebiet und objektspezifische Ausweisung des baulichen Schadens .....	25
Abbildung 20: Grundlagen der Wasserdarstellung .....	26
Abbildung 21: Photorealistische Wasserdarstellung durch Rendering der Wellenbewegungen.....	27
Abbildung 22: Visualisierung in Form von Gefahrenkarten (hier modelliert nach dem „Umsturz“-Grenzwert) für Personen, die einer Strömung ausgesetzt sind .....	28

Abbildung 23: Visualisierung einer 3D-HN-Strömungssimulation an und in einem Gebäude in Form von Schnittebenen.....	28
Abbildung 24: Realisierung einer Augmented-Reality-Anwendung zur Sichtbarmachung von Pegelständen aus ausgewählten Standpunkten .....	29
Abbildung 25: Beispielhafte Darstellung der angestrebten Augmented-Reality-Anwendung .....	29
Tabelle 1: Parametrisierung der Wasserdarstellung.....	27

## Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

2D bzw. 3D	zwei- bzw. dreidimensional
BIM	Building Information Modeling
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
EG-HWRM-RL	EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
DGM	Digitales Geländemodell
GDI	Geodateninfrastruktur
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
OGC	Open Geospatial Consortium, internationale Organisation zur Standardisierung von räumlichen Daten
TIN	Triangulated Irregular Network
VCS	virtualcitySYSTEMS GmbH
W-Q-Beziehung	Abflusskurve eines Gewässerprofils - Zusammenhang zwischen Wasserstand W und Abfluss Q

# 1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der geforderten Umsetzung der Europäischen Hochwasserrisiko-management-Richtlinie (EU-HWRM-RL) stellt die Simulation von Überflutungsprozessen infolge Hochwasser aktuell einen bedeutenden Arbeits- und Forschungsschwerpunkt in den Umweltwissenschaften dar. Dabei verschiebt sich der Fokus zunehmend von der Analyse großflächiger Überflutungen in ländlichen Räumen hin zu Analysen von komplexeren Überflutungsszenarien in städtischen Gebieten, da das vorhandene Schadenspotenzial dort i. d. R. deutlich größer ist<sup>1</sup>.

Für Mensch und Umwelt bedeuten Hochwasser eine erhebliche Belastung, da neben den immensen gesundheitlichen Gefährdungen, 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. Verheerende Hochwasser mit Schäden in Milliardenhöhe waren z. B. die Überflutung weiter Teile Sachsens und Sachsen-Anhalts infolge des Elbe- und Saalehochwassers im Jahr 2013 oder die Elbe-Flut (inkl. Mulde-Hochwasser) im Jahr 2002. Dennoch geraten Erkenntnisse oder Erfahrungen, die während solcher Ereignisse gesammelt wurden, wegen den eher längeren 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 zu ermöglichen, entwickelten die Kooperationspartner virtualcitySYSTEMS GmbH und das Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) der TU Dresden eine Methodik der detaillierten Hochwasserrisikoanalyse, worin erstmals hydrodynamisch-numerische (HN-) Simulationen mit detaillierten, semantischen 3D-Stadtmodellen kombiniert werden.

Im Vorprojekt (AZ 32125-23) zu diesem Forschungsvorhaben wurden Konzepte und Werkzeuge erarbeitet, wie digitale Stadtmodelle für die Durchführung von HN-Simulationen aufzubereiten sind. Die Machbarkeit wurde sowohl für zwei- als auch für dreidimensionale HN-Simulationen anhand vereinfachter Modelle bewiesen, wobei eine automatisierte Generierung der HN-Modelle noch nicht vollständig erreicht werden konnte. Im vorliegenden Projekt wurde die Methodik weiter detailliert und optimiert. Ein durchgängiger Workflow ist entstanden, der die Funktionalität aus großräumigen 2D-Analysen mit detaillierten 3D-Analysen abgegrenzter Objekte auf Basis der Stadtmodellplattform kombiniert. Die Modellverfeinerung betraf die Einbindung zusätzlicher Daten, z.B. aus Flusspeilungen (Bathymetrie), sowie die Berücksichtigung operativer Hochwasserschutzmaßnahmen. Für die Ermittlung von Schäden wurden Gebäudeschadensfunktionen integriert. Alle Berechnungsergebnisse können im Stadtmodell visualisiert werden. Zusätzlich ist es durch eine photorealistische Darstellung gelungen, die Hochwassergefährdung intuitiv greifbar und allgemeinverständlich zu vermitteln.

Das Entwicklungsvorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen 34205-23 gefördert.

---

<sup>1</sup> Neal J., Bates P., Fewtrell T., Hunter N., Wilson M. and Horritt M. (2009) Distributed whole city water level measurements from the Carlisle 2005 urban flood event and comparison with hydraulic model simulations. *Journal of Hydrology*, 368, 1-4, 42-55.



## 2 Einleitung

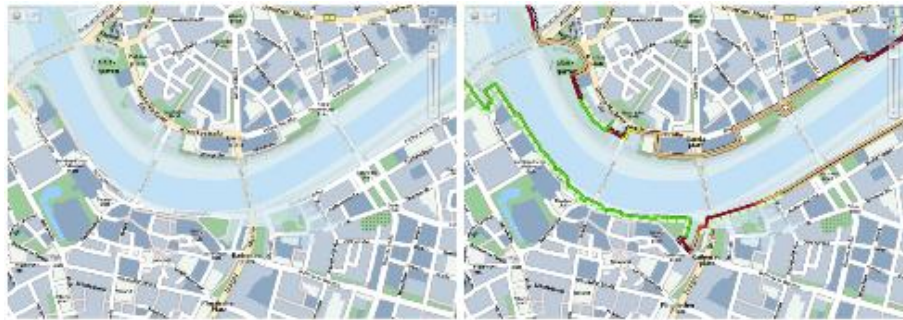
Das übergeordnete Ziel des Vorhabens bestand in der Schaffung der notwendigen Voraussetzungen für ein verbessertes Hochwasserrisikomanagement in Städten und Kommunen. Es sollte ein praxistaugliches Werkzeug entstehen, das für Analysen vor (Prognoserechnungen), während (Anpassungen an den tatsächlichen Ablauf innerhalb kurzer Zeit, als Entscheidungshilfe zur Planung von Hochwasserabwehrmaßnahmen) und nach einem Hochwasser (Aufnehmen neuen Wissens, Ereignisanalyse, Nachkalibrierung) eingesetzt werden kann.

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 in regelmäßigen Abständen 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 stellte 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 abzielte, einen wesentlichen Fortschritt dar. Über diese Stadtmodellplattform wurde eine direkte Überführung aktuell verfügbarer Informationen in ein Simulationsmodell ermöglicht. Die 3D Stadtmodellplattform dient darüber hinaus auch zur zeitgemäßen 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. Die Überflutungsflächen werden der Bevölkerung als kartografische, zweidimensionale Informationen zur Verfügung gestellt (Abbildung 1). 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. Automatisierte Prozesse bis hin zur Visualisierung von Ergebnissen auf Basis der 3D-Stadtmodellplattform sollten hierbei zu einer deutlichen Verbesserung der aktuellen Situation beitragen.



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

Abbildung 1: Darstellungen von potenziellen Überflutungsflächen der Elbe im Stadtgebiet Dresdens ohne (links) und mit (rechts) Hochwasserschutzmaßnahmen

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 Stadt Dresden erarbeiteten Basistechnologien wurden in Form konkreter Demonstratoren aufbereitet, die auch auf kleinere Kommunen, welche über ein digitales Stadtmodell verfügen, anwendbar sind. So wird auch dort ein verbessertes Hochwasserrisikomanagement ermöglicht.

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse tragen 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.

Im Vorhaben wurden 3D-Stadtmodelle und HN-Modelle (2D und 3D) für den vorbeugenden Hochwasserschutz direkt miteinander verknüpft und über eine webbasierte Stadtmodellplattform bereitgestellt. Hydrodynamisch-numerische Berechnungen können somit direkt auf Basis eines bestehenden Stadtmodells vorgenommen werden, so dass sich der bisher gängige zeitaufwändige manuelle Prozess der HN-Modellerstellung größtenteils erübrigt bzw. dieser automatisiert werden kann. Bauliche Maßnahmen gegen Hochwasser, auch temporärer Art, können kurzfristiger in ihrer Wirkung überprüft und verbessert werden. Bereits vorliegende Simulationsergebnisse können 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 gut 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 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. Daher sollte eine Verknüpfung von 2D-HN-Modellen mit 3D-Stadtmodellen insbesondere für Bereiche vorgenommen werden, 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 allen drei Raumrichtungen gekennzeichnet. Im urbanen Raum können solche Prozesse z. B. infolge von Sturzfluten (im Gebirgsraum bzw. im Oberlauf von Flüssen), Dammbrochen oder auch durch plötzlich versagende Hochwasserschutzanlagen (Deiche, Mauern, temporäre HWS-Wände) auftreten.

Die Entwicklungsarbeiten folgten im Wesentlichen der nachstehend abgebildeten Arbeitsplanung. Die Meilensteine und angestrebten Ziele wurden erreicht, wobei sich das vorliegende Projekt vor allem durch das Erreichen der vollen Analysefunktionalität und -methodik gegenüber dem Vorprojekt auszeichnet. Dazu zählen die Kopplung und Verwendung der 2D- und 3D-HN-Simulationen in der Weise, 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 werden durch geeignete Darstellungsformen in der 3D-Stadtmodellplattform so visualisiert, dass sie für die ggf. von Hochwasserereignissen betroffene Bevölkerung leicht verständlich und handlungsweisend sind.





## **3 Hauptteil**

### **3.1 Übersicht der Arbeitsschritte und angewandten Methodik**

Nachdem bereits im Vorprojekt eine Kopplung von 3D-Stadtmodellen mit hydrodynamisch-numerischen Modellen für die Simulation von Oberflächenabflüssen bei Hochwasser begonnen wurde, bestanden die Schwerpunkte des vorliegenden Projektes in der Verknüpfung, Weiterentwicklung und Automatisierung der Prozesse. Dies wurde mit großflächigen 2D-Analysen zur Generierung von Randbedingungen für die 3D-Simulationen kombiniert. Einbezogen wurden semantische 3D-Stadtmodelle im Datenstandard CityGML, der für Deutschland bereits etabliert ist und sich zum globalen Standard für 3D-Stadtmodelle entwickelt hat. Die Geobasisdaten sind inzwischen deutschlandweit über die Landesvermessungsämter verfügbar. Die Integration der 3D-Stadtmodelle über eine webbasierte Stadtmodellplattform als unkompliziertes Userinterface in die automatisierte Prozesskette ermöglicht eine direkte und anwendungsorientierte Daten- und Modellbereitstellung für individuelle Simulationsszenarien. Zudem ermöglicht sie die Visualisierung von numerischen Simulationsergebnissen auf eine Art und Weise, die zum besseren Verständnis der tatsächlichen Gefährdungen bei Entscheidern aber auch bei der Bevölkerung beiträgt, wie es die EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EU-HWRM-RL) fordert.

Im Vorhaben wurden zwei Analyse-Varianten entwickelt: Eine schnelle, vereinfachte Lösung auf Basis eines 2D-HN-Solvers für kurzfristig durchzuführende Simulationen sowie eine detaillierte Lösung unter Verwendung von 3D-HN- bzw. CFD-Modellen (Computational Fluid Dynamics) für Betrachtungen vor und nach einem Hochwasser, bei denen die Berechnungsdauer eine untergeordnete Rolle spielt. Letztere Variante dient neben der klassischen Ausweisung der Wasserstände, Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten als strömungscharakterisierende Parameter auch der unmittelbaren räumlich und zeitlich differenzierteren Darstellung von Drücken bzw. Kräften auf Bauwerke, Fahrzeuge oder auch Menschen, was insbesondere in urbanen Räumen von hoher Relevanz ist.

Analog zu physikalischen Modellversuchen nach dem „Baukastenprinzip“ wurden die Stadtmodelle und die HN-Modelle direkt über eine browserbasierte Stadtmodellplattform miteinander verknüpft werden. Dadurch bestehen auch erweiterte Möglichkeiten für die Stadtplanung. Außerdem können Schadenserwartungswerte besser bewertet werden, wenn z. B. Schäden an Gebäuden durch unmittelbaren Verschnitt der hydraulischen Parameter mit signifikanten Bauwerkshöhenknoten (Fußbodenoberkante, Fenstersims usw.) und Bauwerkscharakteristiken (Alter, Bauweise, etc.), ausgedrückt durch wasserstands- und/oder fließgeschwindigkeitsabhängige Schadensfunktionen, besser absehbar sind. Die Ergebnisse dieser Analysen bilden die Grundlage für eine optimierte Hochwasservorsorge und ein ereignisangepasstes Katastrophenmanagement, so dass z. B. notwendige Evakuierungen oder Hochwasserverteidigungsmaßnahmen (Objektverteidigung, linienhafter Verbau) besser koordiniert werden können.

## **3.2 Darstellung der erzielten Ergebnisse**

### **3.2.1 Entwicklung einer kombinierten und detaillierten Analysefunktionalität aus der Kopplung von großräumigen 2D-Analysen mit detaillierten 3D-Analysen**

Als wichtigstes Projektergebnis ist ein durchgängiger Workflow für detaillierte Hochwasserrisikoanalysen entstanden (Abbildung 2). Er kombiniert die Funktionalität aus großräumigen 2D-Analysen mit detaillierten 3D-Analysen abgegrenzter Objekte auf Basis der Stadtmodellplattform zur Abbildung transienter und dynamischer Vorgänge an komplexen dreidimensionalen Modellen.

Als Pilotstrecken im Einzugsgebiet der Elbe wurden die Dresdner Altstadt, das Gebiet Dresden-Kleinzschachwitz sowie auch das gesamte Stadtgebiet verwendet. Sie beinhalten sowohl flussnahe als auch flussfernere Gebiete zur Durchführung von Abflusssimulationen. Ausschnitte aus diesen Gebieten können in der Stadtmodellplattform für die Simulation ausgewählt und samt Parametern, die für den HN-Modellaufbau benötigt werden, exportiert werden. Zuvor wurden Stadtmodelle, die bisher meist nur der Visualisierung dienten, speziell aufbereitet, damit Simulationen unmittelbar aufgesetzt werden können. Beispielsweise wurden geometrisch inkonsistente Bereiche der Stadtmodelle (z. B. Löcher oder Überschneidungen), die bei einer reinen Visualisierung nicht stören oder zu Tage treten, behoben. Außerdem wurden semantische Angaben der Gebäude, wie z. B. Beschaffenheit oder Nutzung, mit übertragen, um so z. B. Schadens erwartungswerte aus baulichen Schädigungen für verschiedene Überflutungsszenarien direkt ableiten zu können. Ausgehend von einem Stadtmodell, dessen geometrische Konsistenz und Auflösung vorab hinreichend verbessert wurde, wurde ein Transfer dieser Oberflächengeometrie inklusive evtl. vorhandener Informationen zur Oberflächenbelegung (für die Zuordnung von Fließwiderstandsparametern) über die browserbasierte Stadtmodellplattform realisiert.

Je nach Art des zu erstellenden HN-Modells werden das Geometriemodell im 2D-HN-Modell über flächige Elemente bzw. im 3D-HN-Modell über finite Volumenkörper in geeigneter Auflösung diskretisiert (Erstellung des Berechnungsnetzes bzw. -gitters) und mit Fließwiderstandsbeiwerten belegt. In Abhängigkeit von dem zu simulierenden Hochwasserszenario werden die Randbedingungen an den offenen Rändern des vordefinierten Ausschnitts festgelegt, womit dann die hydraulische Simulation durchgeführt werden kann. Wenn auf Basis einer großflächigen 2D-HN-Simulation eine kleinräumige (z. B. objektbezogene) 3D-HN-Simulation erfolgen soll, so können die hydraulischen Randbedingungen dafür aus der 2D-HN-Simulation in Form von Zu- und Abflüssen an die Ränder des 3D-HN-Modells automatisiert übergeben werden.

Beim IWD wurden verschiedene Solver für die 2D-HN-Simulation untersucht bzw. mit Ergebnissen aus Diplomarbeiten verglichen (Abbildung 3). Im Vorhaben wurde vor allem das Software-Paket MIKE-21 genutzt, da es mit den exakten Gebäudegrundrissen arbeitet.

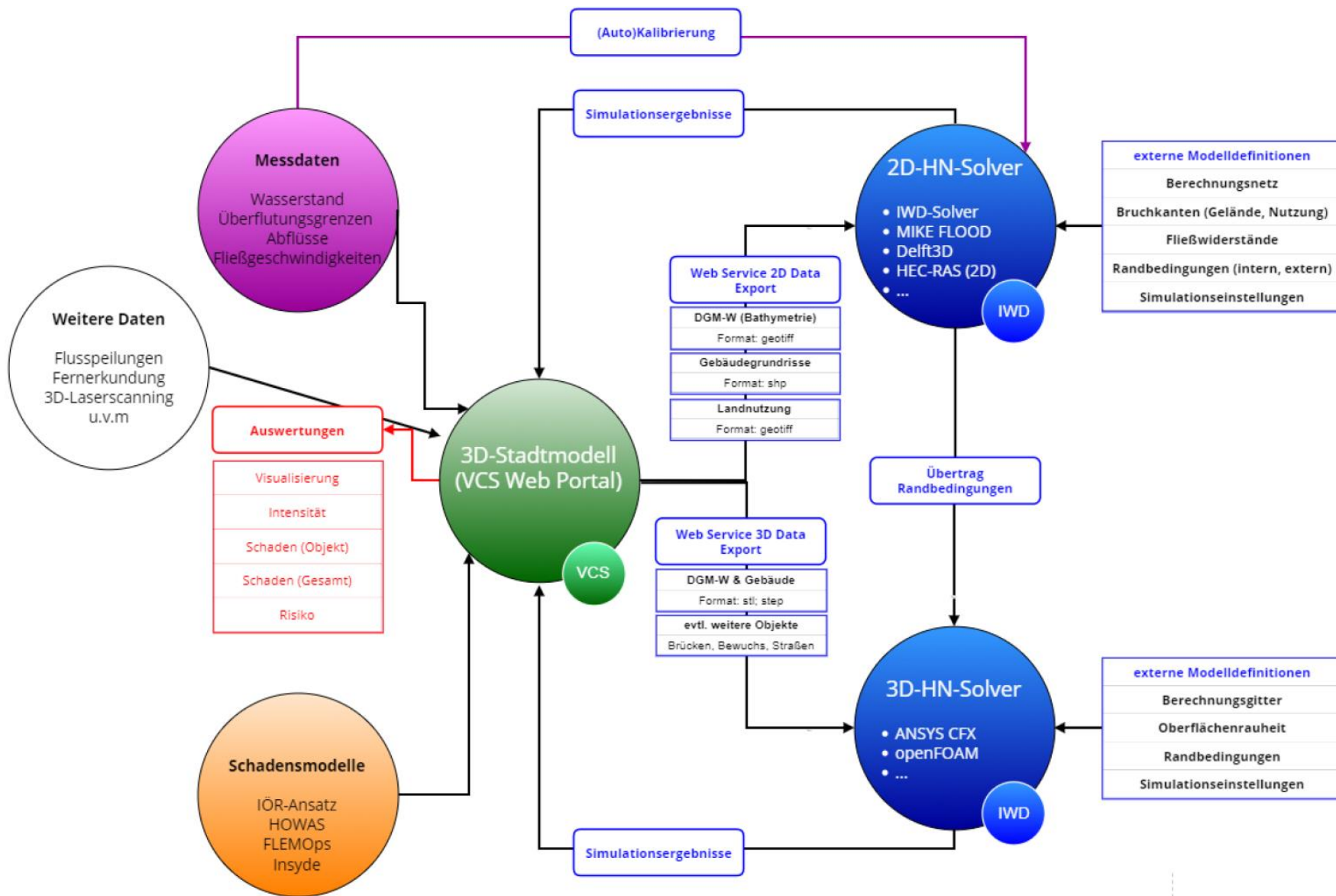


Abbildung 2: Flussdiagramm zur Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum mit den Hauptarbeitsgebieten der Projektpartner (blau: 2D-/3D-Solvertechnik seitens des IWD, grün: 3D-Stadtmodell seitens VCS), sonstige Komponenten andersfarbig



Solver: MIKE 21  
(H. Hammoudi, IWD)

Solver: Delft3D  
(Diplomarbeit M. Burucker, 2018)

Solver: HECRAS (2D)  
(Diplomarbeit D. Zhao, 2018)

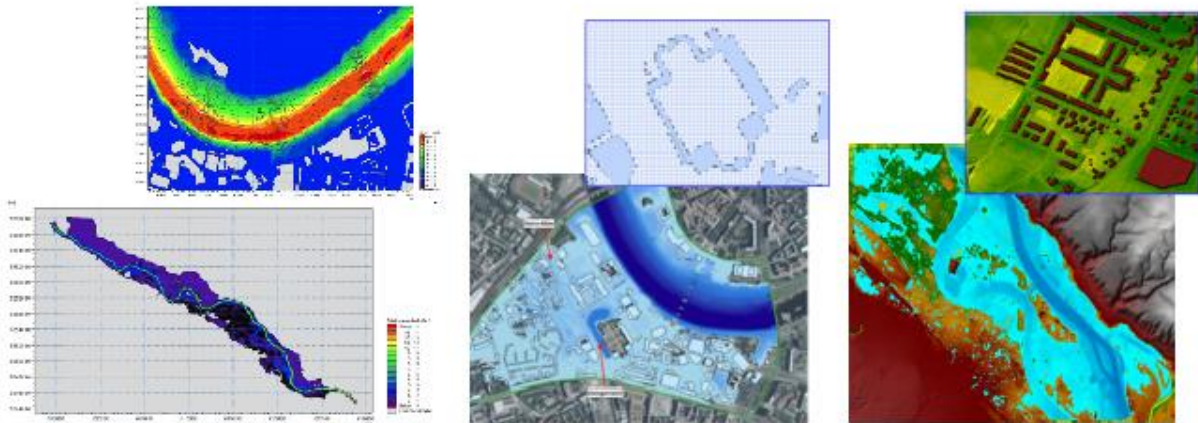


Abbildung 3: 2D-HN-Simulationen zum Vergleich verschiedener Solver und zum Test des Workflows

Weiterhin erfordert die Simulation die Definition numerischer Randbedingungen, wie z. B. die Zeitdauer des betrachteten Hochwasserereignisses oder die Größe der Modellvernetzung. Wie z. B. eine 2D-Simulation des Niederschlagsabflusses zeigte, hat die Diskretisierung einen großen Einfluss auf das Ergebnis (Abbildung 4). Im Projekt konnten Erfahrungen gesammelt werden, wie die räumliche Auflösung an das jeweils betrachtete Szenario anzupassen ist, um hinreichend genaue Ergebnisse zu erhalten. Die Netzgenerierung wurde mit Unterstützung der Firma LOCIS GmbH automatisiert. Hinzu kommen Bruchkanten im Gelände oder als Bordsteine, deren Berücksichtigung die Qualität der Berechnungsergebnisse nochmals steigert. Sie können aus digitalen Stadt- oder Geländekarten entnommen werden und müssen ggf. noch attribuiert werden.

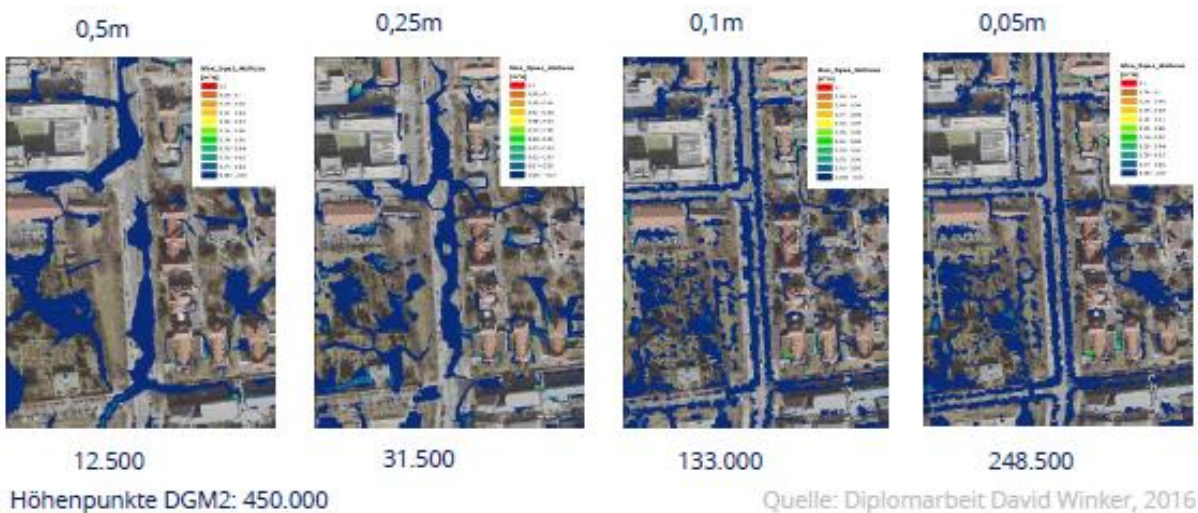


Abbildung 4: Simulation des Niederschlagsabflusses aus dem Jahr 2016 mit verschiedenen Diskretisierungen von 0,5 m bis 0,05 m

Abbildung 5 veranschaulicht den Datenbedarf (inkl. Netzerstellung) eines 2D-HN-Modells. Der gesamte Aufbereitungsprozess umfasst die Erstellung des Berechnungsnetzes aus dem digitalen Geländemodell, die Vernetzung als strukturiertes oder unstrukturiertes Netz und die Berücksichtigung von Fließwiderständen aus der Landnutzung. Es schließt sich die eigentliche numerische Berechnung mit einem geeigneten Solver an, um dann die Berechnungsergebnisse zur Visualisierung zurück in die Stadtmodellplattform zu importieren.

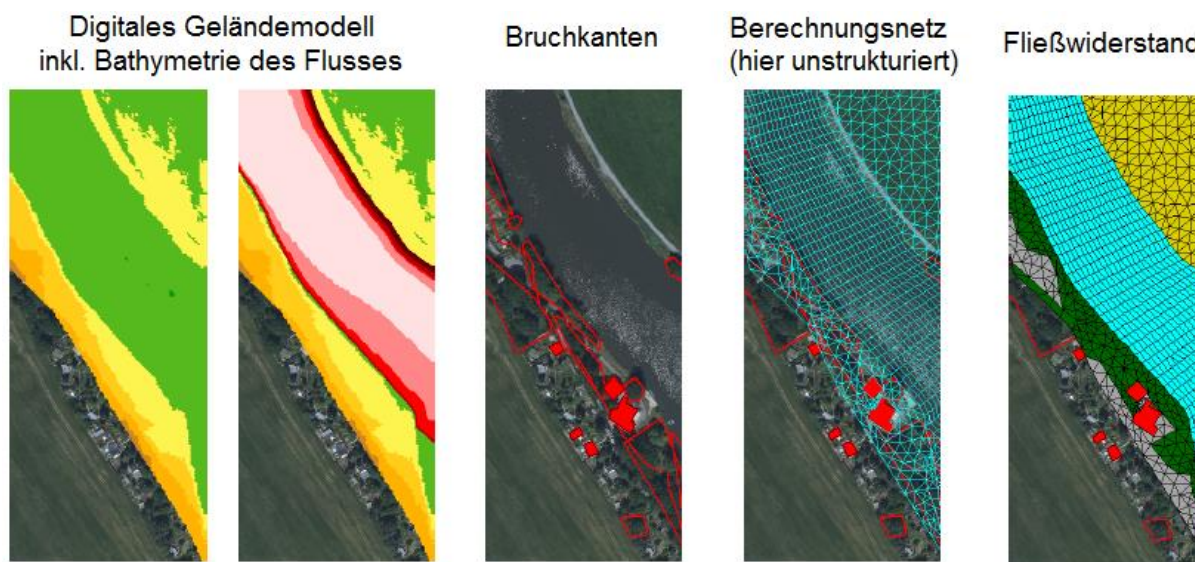


Abbildung 5: Datengrundlagen und Berechnungsnetzerstellung für den Aufbau von 2D-HN-Modellen

Mit den Betrachtungen zur 2D-HN-Simulation konnten die anvisierten Arbeiten zum 2D-HN-Solver weitgehend finalisiert werden, ebenso die Entwicklung der Schnittstelle zwischen der 2D- und der 3D-HN-Simulation auf Basis der Stadtmodellplattform mit bestmöglicher Automatisierung aller Prozesse. Auf Basis dieser Arbeiten konnten dann auch eher kleinräumige, detaillierte 3D-Simulationen einzelner Objekte angegangen werden.

Zu diesem Zweck wurden Untersuchungsgebiete definiert und Gebäudedaten eingearbeitet. Zur 3D-Simulation können 3D-Gebäudedaten z. B. aus BIM-Modellen eingebunden werden, was in puncto Genauigkeit den Idealfall darstellen würde. Hinsichtlich des Bestandes relevanter BIM-Modelle im Raum Dresden wurde Kontakt zur HTW Dresden, Lehrgebiet Bauinformatik, aufgenommen. Außerdem besteht eine Zusammenarbeit mit dem Leibnitz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR). Zur Datenerfassung und Verarbeitung der Bestandsbebauung wurde Kontakt mit der Professur für Photogrammetrie aufgenommen. Zur Modellerstellung für die 3D-HN-Simulation sind die Gebäudegeometrien zu vernetzen und die Randbedingungen wurden aus einer 2D-HN-Simulation entnommen und konvertiert. Die Basisdaten wurden aus der Stadtmodellplattform exportiert.

Im Rahmen der vorbereitenden Arbeiten der 3D-HN-Modellierung wurde ein bestehendes BIM-Modell eines Bürokomplexes entsprechend der



Simulationsanforderungen aufgearbeitet und anschließend im 3D-Stadtmodell verortet. Einen Überblick hierzu liefert die Abbildung 6.

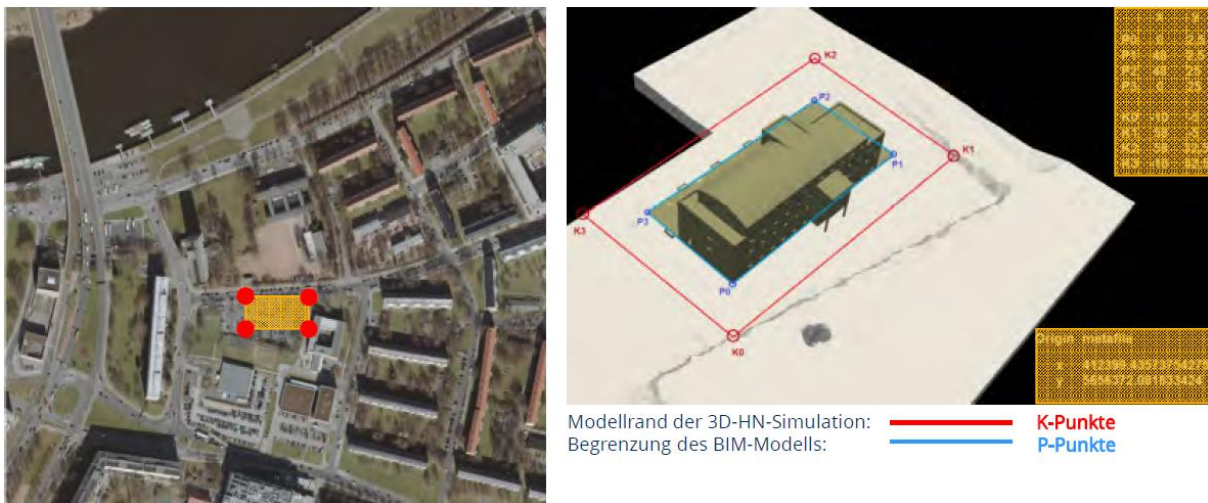


Abbildung 6: Demonstration für die Integration eines BIM-Modells in das 3D-Stadtmodell sowie der Grundlage für die sich anschließende 3D-HN-Simulation des An- und Einströmverhaltens zum BIM-Modell

Die Abbildung 7 zeigt ausgewählte Simulationsergebnisse am zuvor vorgestellten Bürokomplex. Hier zeigt das linke Bild exemplarisch die in der Hauptströmungsrichtung belastete Gebäudewand im EG, welche farblich die auftretenden Strömungskräfte wiedergibt (blau – belastungsfrei, rot – Druckkraft). Das rechte Bild zeigt die Draufsicht des Umströmungs- bzw. Einströmverhaltens am Bürokomplex, wobei Strömungsschatten bzw. strömungsberuhigte Bereiche blau gekennzeichnet sind, wohingegen Bereiche mit erhöhtem Aufkommen von Turbulenzen rot visualisiert sind (Farbkennung anhand der turbulenten kinetischen Energie, TKE).

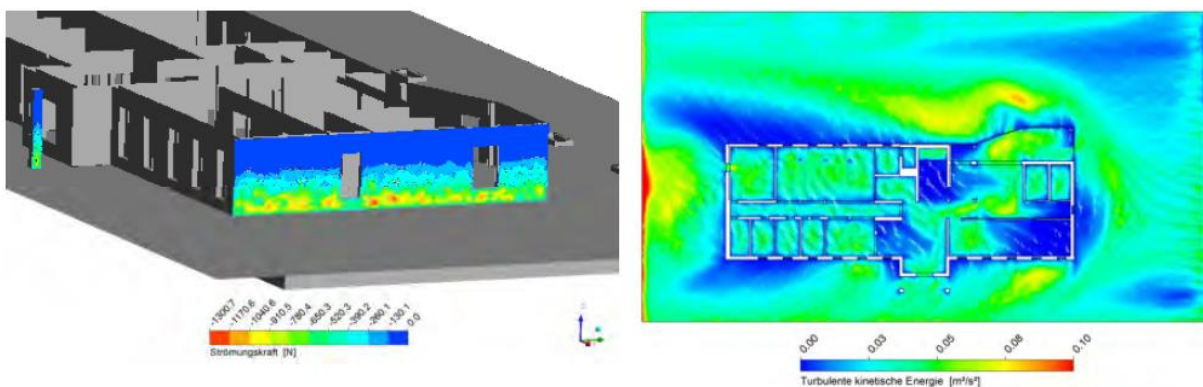


Abbildung 7: Ergebnisse aus der 3D-HN-Simulation (links: Strömungskraft auf das Gebäude, rechts: turbulente kinetische Energie)

Grundsätzlich ermöglicht die 3D-HN-Simulation eine plausible Prognose hydraulischer Verhältnisse. In manchen Fragen, wie z. B. bei der Klärung lokaler Strömungsverhältnisse, stellt sie die einzig mögliche Methode des Erkenntnisgewinns dar. Auch wenn eine Ablösung der 2D-HN-Modellierung bei großflächigen Hochwassersimulationen aus Gründen des Berechnungsaufwandes und der Datenerzeugung auch längerfristig nicht absehbar ist, stellt die 3D-HN-Modellierung ein geeignetes Mittel zur Ergänzung bzw. Erweiterung der Modellierung urbaner Hochwasserrisikoanalysen dar, wenn es um eine differenzierte Ausweisung des Betroffenheitsgrades von Gebäudeobjekten und kritischen Infrastrukturen geht, wie z. B. Krankenhäuser, Versorgungswerke, usw. Die Kopplung der 3D-HN-Modellierung an Stadtmodell-Daten ermöglicht in Zukunft noch detailliertere Erkenntnisse zur Abschätzung von Hochwasserschäden. Wenn entsprechende Gebäudeschadensfunktionen vorliegen, welche sich am Gebäudetyp und -alter orientieren, dann können die Folgen von Gebäudeflutungen über die Anwendung auch monetär beziffert werden.

Neben der reinen Hochwassersimulation ermöglicht der Workflow weiterreichende Funktionen:

- 1) Berücksichtigung operativer Hochwasserschutzmaßnahmen im Modell. Hiermit können z. B. temporär errichtete Barrieren aus Sandsäcken oder Spundwänden in die Analyse mit einfließen.
- 2) Einbindung zusätzlicher Daten, z. B. aus Flusspeilungen (Bathymetrie) oder dem 3D-Laserscanning sowie von Dritten gemessenen Pegelständen.
- 3) Ermittlung möglicher Schäden und deren Darstellung im Stadtmodell.
- 4) Visualisierung und Aufbereitung der Berechnungsergebnisse nach Vorgaben des Umweltamtes der Stadt Dresden. Hierbei wurde insbesondere das Ziel verfolgt, der Bevölkerung eine Einschätzung über die Gefährlichkeit von Hochwasser zu vermitteln.

Diese Funktionen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### **3.2.2 Berücksichtigung operativer Hochwasserschutzmaßnahmen im Modell**

Die Vernetzung und Berücksichtigung temporärer Hochwasserschutzmaßnahmen wurden an einem Modell des Gebäudes des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden untersucht. Dazu wurden um das Universitätsgebäude virtuell eine Bounding-Box gelegt (Abbildung 8) und Hochwasserschutzwände eingebracht, Die schnelle und qualitativ gute Einbindung solcher Bauwerke stellt, aufgrund der schmalen Elemente, eine besondere Herausforderung im Zuge der Erstellung des Berechnungsnetzes dar. Eine (fast) vollständig automatisierte Umsetzung dieses Arbeitsschrittes ist ein weiteres Teilergebnis, das im Rahmen des Projektes erzielt wurde. Somit konnte ein wichtiger Beitrag für eine adaptive Netzerstellung für einen operativen Anwendungsfall während eines HW-Ereignisses geschaffen werden. Das Ergebnis einer HN-Simulation mit diesem Modell zeigt Abbildung 9, wobei als obere Randbedingung ein Zufluss und als untere Randbedingung ein Energieliniengefälle vorgegeben wurden.

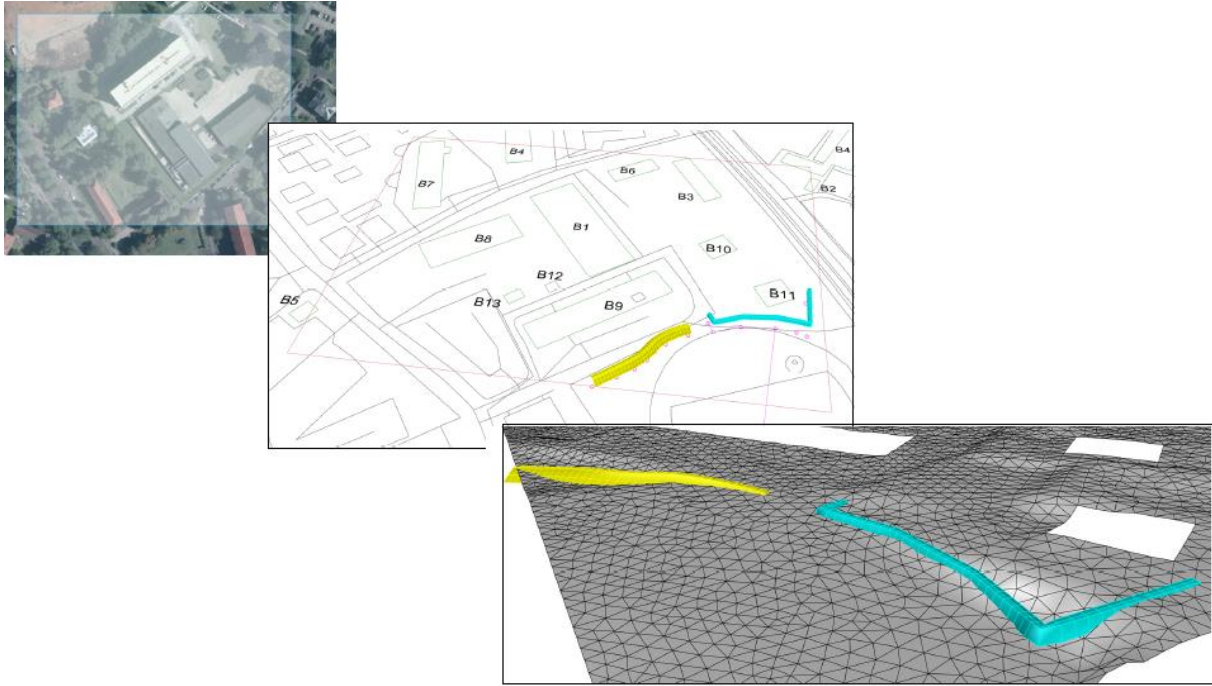


Abbildung 8: Modellhafte Einbindung operativer HWS-Maßnahmen in ein 2D-HN-Berechnungsnetz (automatisiert), gelb: Damm, blau: temporäre HWS-Mauer

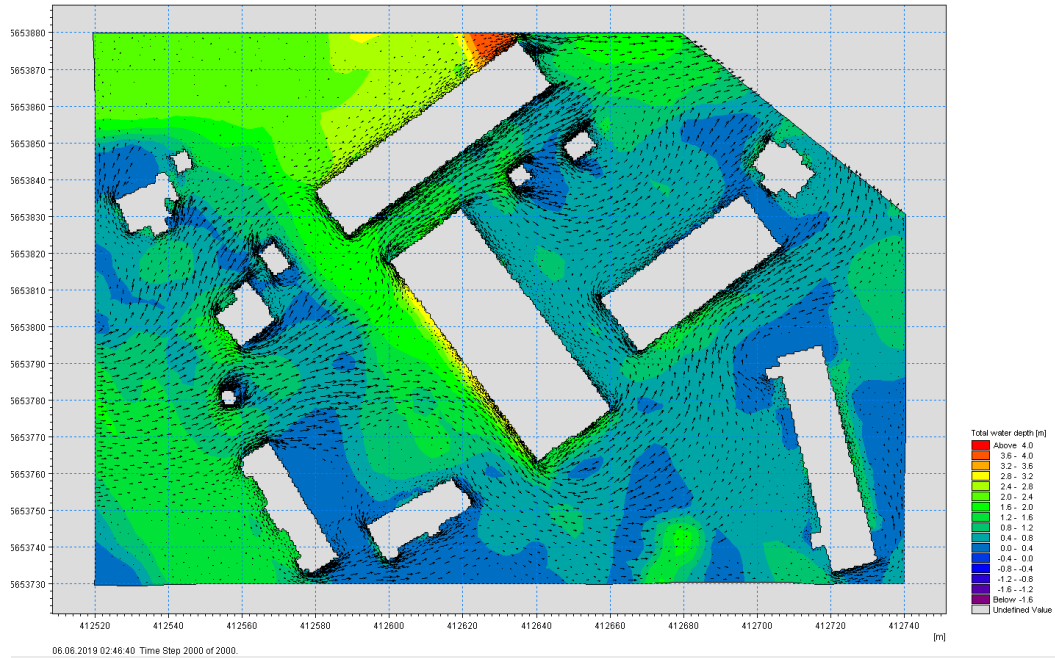


Abbildung 9: 2D-HN-Simulation mit dem Software-Paket MIKE-21, Darstellung der Wassertiefen mit den zugehörigen Vektoren der Fließgeschwindigkeiten

### 3.2.3 Einbindung zusätzlicher Daten

Bevor ein 3D-Stadtmodell als Basis für HN-Simulationen genutzt werden kann, muss es digital bereinigt, z. B. durch Entfernung von Löchern, und mit dem digitalen Geländemodell (DGM) verschnitten werden. Letzteres beschreibt jedoch nur die Landoberfläche, während für die Hochwassersimulation auch die Bathymetrie von Gewässern, wie im Fall Dresdens der Elbe, von Interesse ist. Daher wurden Prozesse entwickelt, um die bathymetrischen Daten der Elbe, die bei Befahrungen als Sonarpeildaten mit einer Auflösung von einem Meter gewonnen wurden, mit dem DGM zu verschneiden (Abbildung 10). Neuere, zu diesem Zweck gewonnene Peildaten zeigt Abbildung 11. Mit Daten vom Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden wurde die Bathymetrie der Elbe über das gesamte Stadtgebiet Dresdens im Stadtmodell berücksichtigt.



Abbildung 10: Elbe und Augustusbrücke ohne (links) und mit Bathymetrie (rechts)

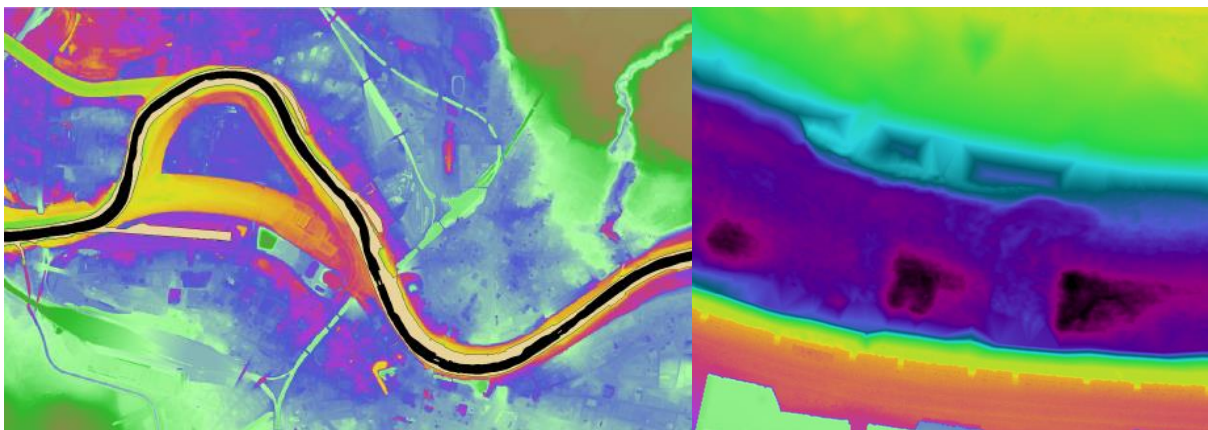


Abbildung 11: Peildaten der Elbe (2018/19) zur Einbindung in das 3D-Stadtmodell (links als schwarzes Band dargestellt, rechts im Detail)

Als weiterer einzubindender Datensatz wurden über den Webservice [pegelonline.wsv.de](http://pegelonline.wsv.de), einem gewässerkundlichen Informationssystem der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Daten von Pegelsensoren



der Hauptgewässer integriert. Die Pegelstände werden im Stadtmodell als kleine Info-Fenster angezeigt (Abbildung 12).

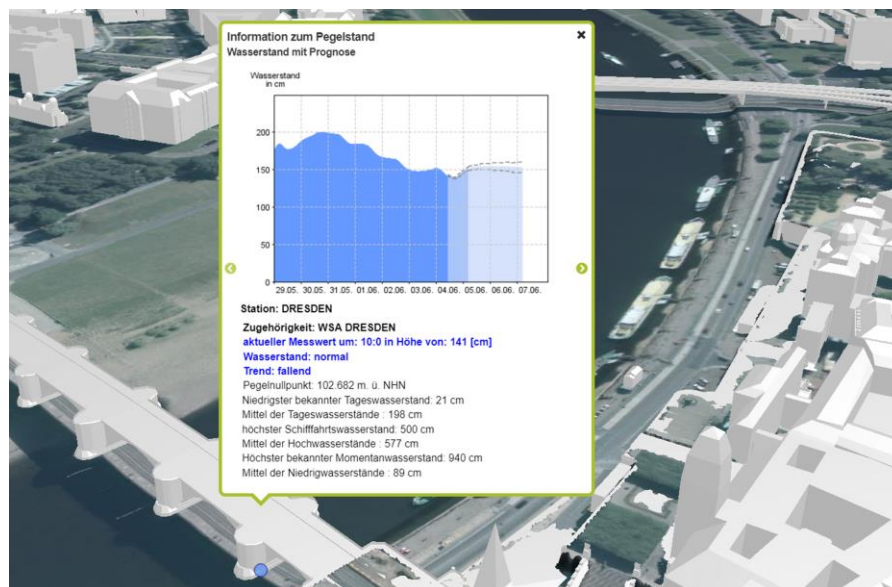


Abbildung 12: Live-Pegelstand an der Augustusbrücke samt Prognose als Info-Fenster in der Anwendung

### 3.2.4 Visualisierung und Aufbereitung der Berechnungsergebnisse

Von der VCS GmbH wurde die Stadtmodellplattform erweitert, damit

- Simulationsergebnisse im online-Portal visualisiert werden können,
- eine intuitive Bedienung möglich wird,
- die Plattform als Datendrehscheibe für verschiedene Anwendungen genutzt werden kann.

Im Vergleich zu reinen Geodatendiensten erfordern Simulationsanwendungen andere Datenverarbeitungsprozesse, die parallel zu Visualisierungs- bzw. Kartenanwendungen implementiert werden. Allerdings erfolgt die Datenhaltung des 3D-Stadtmodells (Gebäude, Brücken, Gelände) zentral in einer einzigen Datenbank (Abbildung 13). 2D-Raster- und Vektordaten können über typische Geo-Webdienste (OGC WCS, WFS) bezogen werden. Im Projekt wurde dieser Datenaustausch verbessert. Simulationsergebnisse können jetzt unkompliziert aus dem Webportal heruntergeladen werden.

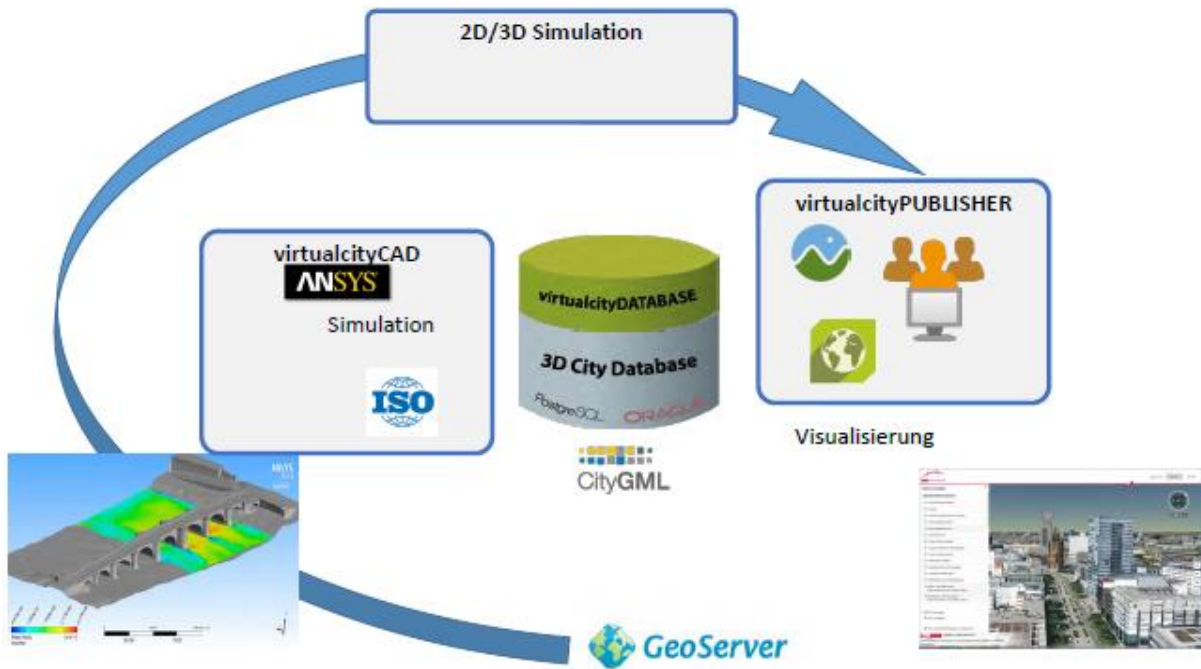


Abbildung 13: Integration der Simulation in die Geodateninfrastruktur (GDI)

Im Katastrophenfall muss die Modellgenerierung bzw. -anpassung schnell von statten gehen. Deshalb hat VCS eine Daten-Pipeline entwickelt, um die Rohdaten, die im Fall der Bathymetrie als Rasterdatensätze und im Fall der Landnutzung als Vektordatensätze vorliegen, in ein streamingfähiges Format zu transformieren. Dabei wird ein Web Coverage Service im OGC-Standard verwendet, der das Extrahieren von Ausschnitten in beliebiger Auflösung erlaubt. Beinhaltet sind auch Konvertierungen in sog. 3D-Tiles (Kacheln), die man für die Visualisierung in Karten benötigt. Viele verschiedene Datenkategorien, darunter auch Bruchkanten oder Böschungen, die alle mit Attributen versehen sein können, fließen im Modell zusammen. Für die Erstellung von STL-Dreiecksmodellen wurde eine Server-Komponente entwickelt (on-demand-Triangulierung von Teilrastern). Für die Modellvorbereitung soll das STL-Format genutzt werden, das gegenüber CAD-Daten einen deutlich geringeren Daten-Overhead benötigt. Außerdem wurde das online-Portal dahingehend erweitert, dass das zu simulierende Gebiet ausgewählt und temporäre Elemente, wie z. B. Deiche, durch Zeichnung eingebracht werden können. Somit kann aus der Stadtmodellplattform ein Datenpaket für die 2D-HN-Simulation erstellt werden (Abbildung 14).



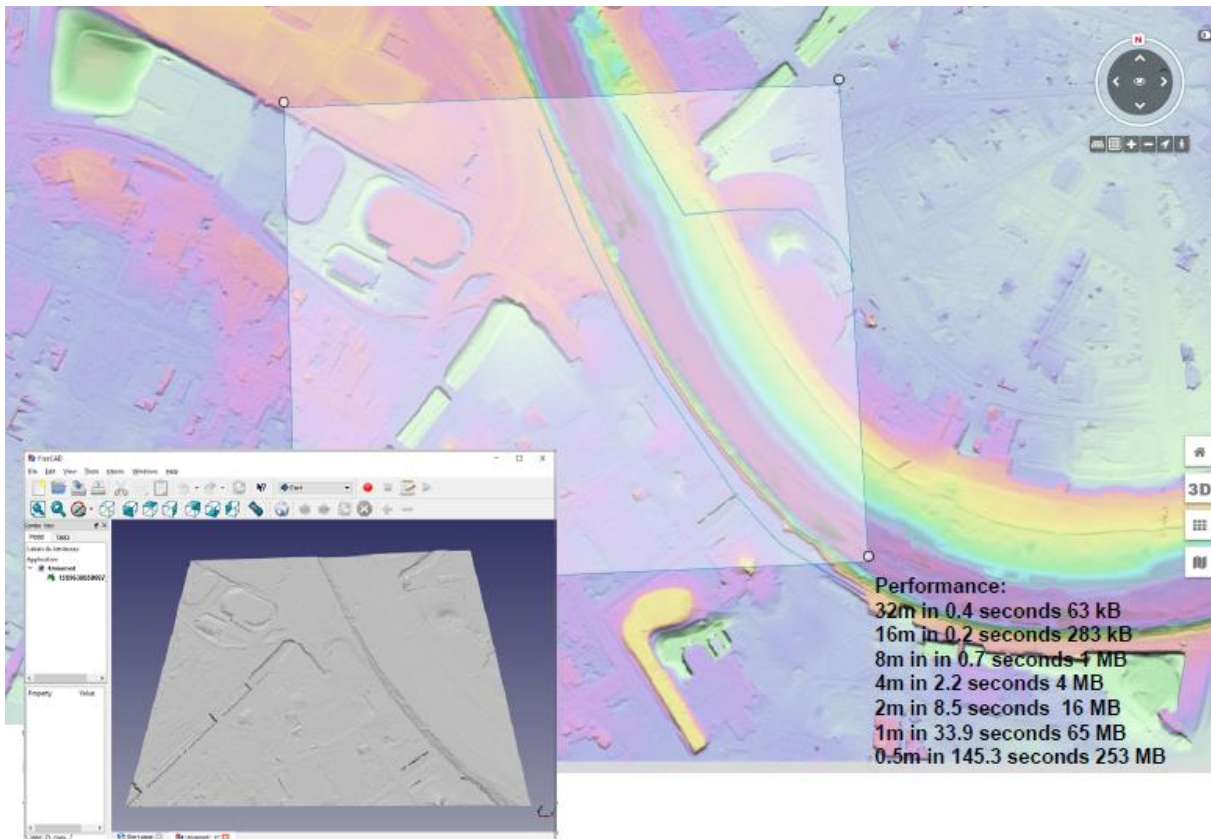


Abbildung 14: Aufbereitung eines Geländemodells mit Geodaten zur Vorbereitung einer HN-Simulation (je nach gewählter Ausdehnung sowie der technischen Ausstattung variieren die Modellladezeiten und die Dateigrößen erheblich.)

Für die Ergebnisdarstellung von 2D-Simulationen wurde die Streaming-Pipeline um höhenkodierte Rasterdaten erweitert. Für die Wasserspiegellage wird ein Streamingfähiger 3D-Datensatz erstellt. Damit ist mit der Stadtmodellplattform ein sehr leistungsfähiges Werkzeug für die Visualisierung entstanden, das gegenüber alten DGM-Lösungen eine schnelle Aufbereitung der Daten in wenigen Minuten erlaubt. Darstellbar sind z. B. die Wasserspiegellage, die Wassertiefe als Overlay oder die Fließgeschwindigkeit (auch in vektorieller Form). Die Ergebnis-Daten können über die Ebenensteuerung sehr schnell zum 3D-Stadtmodell hinzugeladen werden (Abbildung 15).

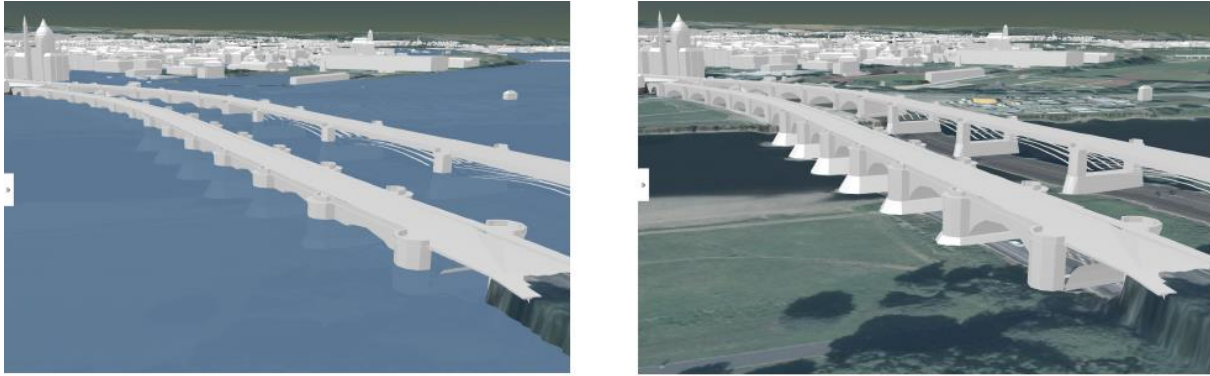


Abbildung 15: Simulationsergebnisse dargestellt als leicht transparente 3D-Wasserspiegellage.

Weitere Ergebnisdarstellungen aus verschiedenen Szenarien zeigen Abbildung 16 bis Abbildung 17. Zunächst werden Ergebnisse von 2D-HN-Simulationen von Dresden mit verschiedenen Pegelständen visualisiert. Hierbei war die nutzerorientierte Darstellung der Wasseroberfläche von besonderem Interesse (sowohl für Fachleute als auch für Nicht-Fachleute).

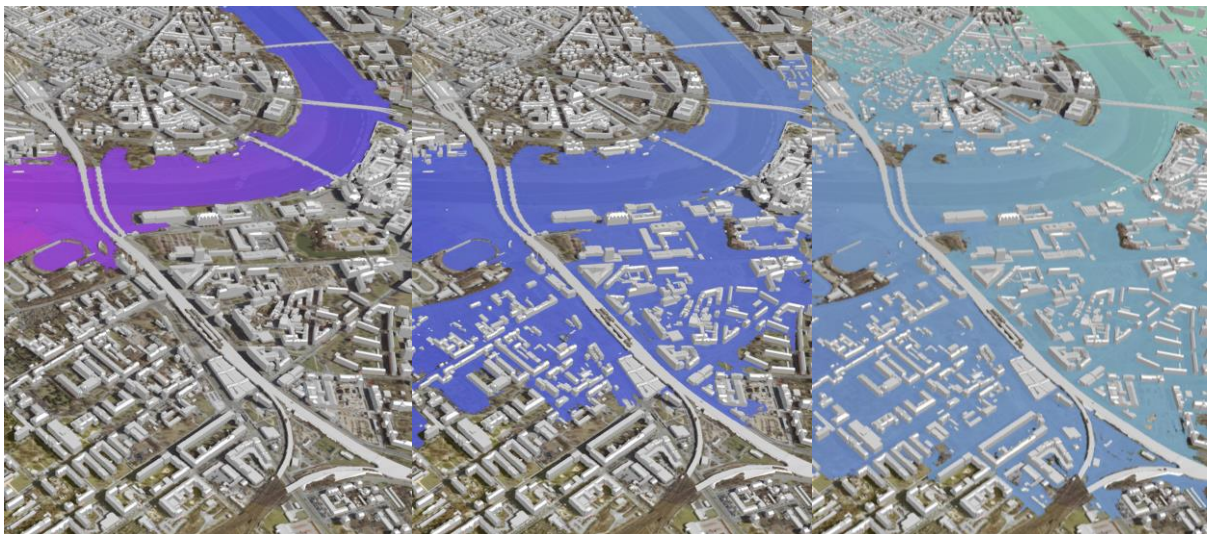


Abbildung 16: Darstellung der Wasserspiegellage aus 2D Simulation verschiedener Szenarien.

Abbildung 17 zeigt Einfärbungen nach verschiedenen Kriterien, wie z. B. Fließgeschwindigkeit oder Wassertiefe, um genauere Einblicke in das Gefährdungspotenzial an einzelnen Gebäuden zu bekommen.



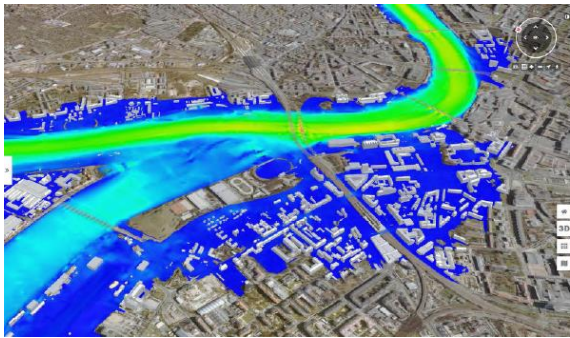
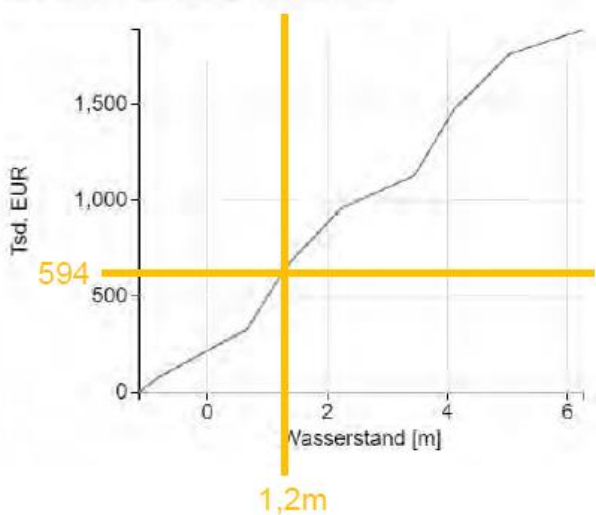


Abbildung 17: Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten von Ergebnissen aus der 2D-Simulation: Fließgeschwindigkeit (links), Wassertiefe (rechts) bei einem außergewöhnliches HW.

### 3.2.5 Ermittlung möglicher Schäden und deren Darstellung im Stadtmodell

Zur Ermittlung von Hochwasserschäden wurden Gebäudeschadensfunktionen integriert, die durch das Leibnitz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR), Dresden zur Verfügung gestellt wurden. Der Schaden wird in Abhängigkeit von der Gebäudegrundfläche sowie der lokalen Wassertiefe kalkuliert (Abbildung 18). Aus der Art der Gebäudenutzung oder durch eine genauere Attribuierung des Gebäudes kann die Anzahl der Personen, die sich im Gebäude befinden, abgeschätzt werden, was evtl. für Evakuierungsmaßnahmen von Bedeutung ist.

#### Gebäudeschadensfunktion



#### Simulationsergebnisse

**maxs3grddt : 1.2**      **Wassertiefe**  
 maxs3grdv : 0.02  
 ALK\_Area : 1053.45458929  
 gmild : bldg\_DESNALK0q80046xi

#### Gebäudeschaden

**Schaden : 594 Tsd. EUR**

Abbildung 18: Gebäudeschadensfunktionen  
(Der Schaden steigt mit der Wassertiefe um das Gebäude.)

Mit den Gebäudeschadensfunktionen gelingt somit eine schnelle Abschätzung der Schäden durch Hochwasser oder Starkregenereignisse für ein ganzes Gebiet

(Abbildung 19). Es können Gebäudetypenkataloge, z. B. für Mehrfamilienhäuser aus der Gründerzeit, für Lagerhallen oder für freistehende Einfamilienhäuser erstellt werden. Die Kategorisierung aller Gebäude in Gebäudetypen wurde parallel zum Forschungsvorhaben durch das Umweltamt Dresden vorangetrieben. Dieses durch Ortsbegehungen basierende Vorgehen erlaubt eine genauere Schadensabschätzung, ohne dass exakte Informationen über Objekt- oder Versicherungswerte vorliegen, sodass eventuelle Konflikte mit Datennutzungsrechten gemindert werden können.

Als erweiterte Funktionen wurden, wie eben vorangestellt, Abschätzungen der Anzahl betroffener Personen ergänzt, wobei Art der Gebäudenutzung, Grundfläche, Anzahl der Stockwerke, Annahme einer Personendichte sowie eine zeitabhängige Funktion für Arbeitszeiten, Wochenenden oder Tag und Nacht berücksichtigt werden. Die Einbindung von Gebäudeschadensfunktionen wird als ein weiteres wichtiges Projektergebnis erachtet, da sie in Verbindung mit dem Stadtmodell ein Alleinstellungsmerkmal zu bisher üblichen Anwendungen darstellen.

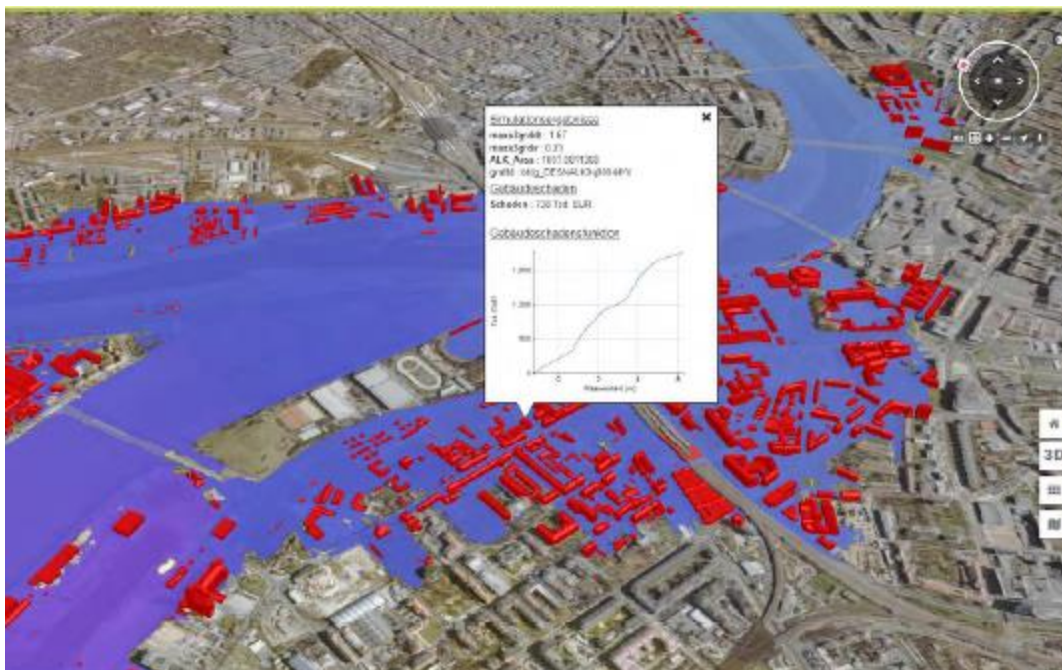


Abbildung 19. Schadensabschätzung für ein ausgewähltes Gebiet und objektspezifische Ausweisung des baulichen Schadens

### 3.2.6 Realitätsnahe und zweckorientierte Visualisierung der zentralen Simulationsergebnisse

Um das Risikobewusstsein in der Bevölkerung zu Hochwasserereignissen zu steigern und ein bessere Basis zur Information von Entscheidungsträgern zu schaffen, wurde mit dem Projekt eine realitätsnahe und zweckorientierte Visualisierung der zentralen Simulationsergebnisse (Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, spezifische Abflüsse) in der browserbasierten Stadtmodellplattform umgesetzt.

Die klassische farbkodierte Kartenvisualisierung stellt aktuell den Standard zur Darstellung von Ergebnisgrößen dar. Je nach Zielgruppe, die von Wissenschaftlern, Ingenieuren über Domänenexperten bis hin zum Bürger mit verschiedenen Vorkenntnissen reicht, stellt sich die Frage, wie die Daten verständlicher und nutzerangepasst präsentiert werden können und wie es – gerade im Hochwasserrisikomanagement – gelingt, das Risikobewusstsein längerfristig zu erhalten bzw. zu reaktivieren.

Eine gute Eignung für alle Zielgruppen besitzt die photorealistische Darstellung. Sie nutzt ein in jedem Menschen vorhandenes mentales Bild, das jeder beim Gedanken an Wasser vor Augen hat, und erreicht damit ein hohes mediales Wirkungspotenzial. Voraussetzung ist eine realitätsnahe und performante Visualisierung, die in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen erstellt werden kann (Abbildung 20).

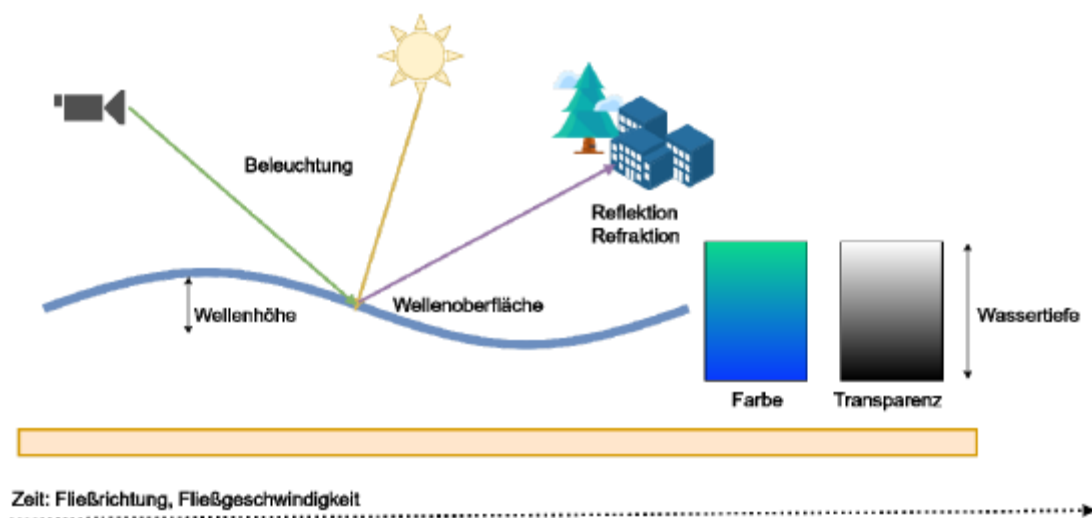


Abbildung 20: Grundlagen der Wasserdarstellung

Zur photorealistischen Darstellung der Wasseroberfläche wurde bei den Projektpartnern umfangreiches Knowhow aufgebaut. Verschiedene Attribute, wie Fließgeschwindigkeit und -richtung, Wassertiefe usw. beeinflussen die optische Erscheinung. Das IWD hat diese Komponenten georeferenziert und die Wasserdarstellung parametrisiert, um das 3D-Rendering in Echtzeit beeinflussen zu können. Die Änderung dieser Parameter, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind, wird über eine eigene Benutzeroberfläche ermöglicht. So lässt sich eine künstlerische Überzeichnung der Wellenhöhe oder der Fließgeschwindigkeit erreichen. Außerdem wurden perspektivisch korrekte Reflexionen des Sonnenstandes und eines wolkenbedeckten Himmels hinzugefügt. Eine korrekte Georeferenzierung ist notwendig, um z. B. den Bezug zur Wassertiefe herzustellen. Dabei trat das Problem der Erdkrümmung auf, da die Daten in kartographischer Projektion vorliegen. Als Lösung wurde eine Koordinatentransformation für die korrekte Georeferenzierung sowie eine weitere Transformation zur korrekten Ausrichtung der Fließvektoren eingeführt.



Attribut	Einfluss
Position	Position, Koordinaten für Grafiken
Oberfläche (Normale)	Beleuchtung, Reflektion, Refraktion
Fließgeschwindigkeit	Beleuchtung, Verzerrung
Fließrichtung	Beleuchtung, Verzerrung
Wassertiefe	Farbe, Transparenz
Wellenhöhe	Schaumbildung, verschiebt Oberflächennormale

Tabelle 1: Parametrisierung der Wasserdarstellung

Die Berechnungsergebnisse der Hochwassersimulation können jetzt in die Stadtmodellplattform von VCS zurückgeführt und photorealistisch als Wasserstand mit Wellen und Reflexionen visualisiert werden (Abbildung 21). Auch animierte Filmsequenzen oder „virtuelle Rundflüge“ sind möglich, um die Strömung und davon ausgehende Gefahren noch besser zu vermitteln.



Abbildung 21: Photorealistische Wasserdarstellung durch Rendering der Wellenbewegungen.

Außerdem wurden die folgenden Visualisierungsmöglichkeiten innerhalb des 3D-Stadtmodells realisiert:

- Modellierung und Anzeige des „Umstürz“-Grenzwertes (engl. „Toppling“) mit der Aussage, ab welchem Gewicht und welcher Körpergröße eine Person noch sicher im Wasser stehen kann oder schon weggetrieben wird (Abbildung 22).
- Einfügen von Schnittebenen unterschiedlicher Höhe in 3D-Ergebnisdaten, um z. B. Wasserstandshöhen oder Fließrichtungen und –geschwindigkeiten abzufragen (Abbildung 23)
- Wechsel zwischen den Ebenen via Slider
- Interaktion und Manipulation der Visualisierung („was wäre, wenn...“), z. B. um Fließgeschwindigkeiten zu verändern
- Berechnung von beliebigen Bahnlinien als Trajektorien einzelner Wasserpartikel oder im Wasser schwimmender Elemente

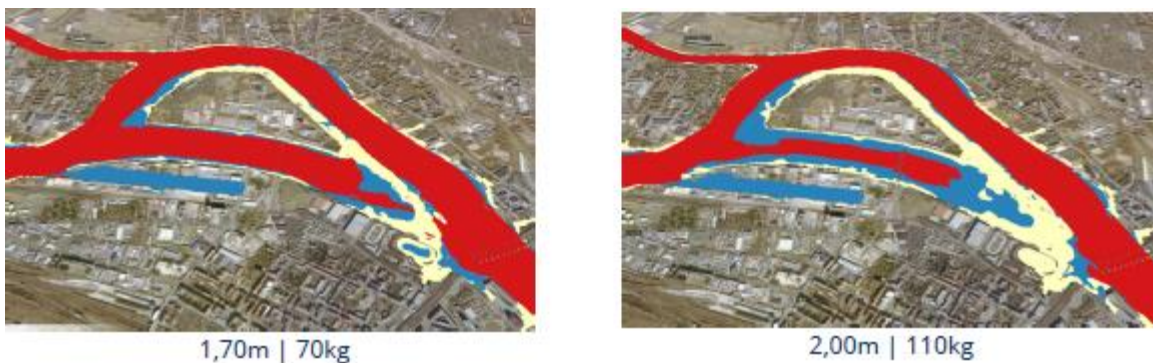


Abbildung 22: Visualisierung in Form von Gefahrenkarten (hier modelliert nach dem „Umstürz“-Grenzwert) für Personen, die einer Strömung ausgesetzt sind

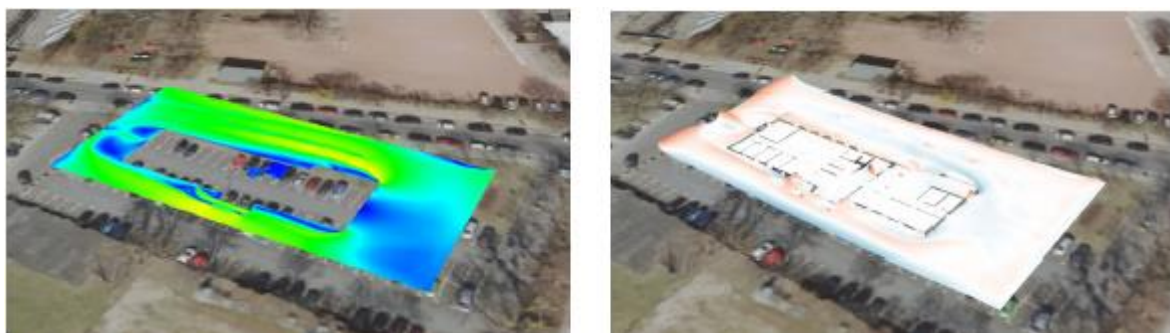


Abbildung 23: Visualisierung einer 3D-HN-Strömungssimulation an und in einem Gebäude in Form von Schnittebenen

Als moderne Art der Visualisierung, auch für größere Benutzergruppen, sollte eine Augmented Reality (AR) Anwendung realisiert werden (Abbildung 24), deren Abschluss zum Ende der Projektlaufzeit noch aussteht. Sie beruht auf der Grundidee, die 3D-Visualisierung an den tatsächlichen Standort zu knüpfen. So kann vor Ort eine AR-Version des 3D-Wassermodells über die Kamera eines Smartphones an den jeweiligen Standort projiziert werden. Der Nutzer kann sich im Raum drehen und den Wasserstand bzw. das Strömungsverhalten betrachten, z. B. an einer Stelle, wo in

einer Stadt frühere Hochwasserstände markiert sind. Dies vermittelt einen besonders direkten Bezug zu den Gefahren von Hochwasser (Abbildung 25). Als Herausforderungen musste der genaue Standort des Nutzers bestimmt werden, um den korrekten Kartenabschnitt zu laden, sowie die natürliche Bewegung im virtuell angereicherten Raum abgebildet werden. Dies gelang durch ein Auslesen der GPS-Daten des Endgerätes und einem Tracking vorher positionierter Marker an ausgewählten Stellen.



Abbildung 24: Realisierung einer Augmented-Reality-Anwendung zur Sichtbarmachung von Pegelständen aus ausgewählten Standpunkten



Abbildung 25: Beispielhafte Darstellung der angestrebten Augmented-Reality-Anwendung



### 3.3 Diskussion der Ergebnisse

Im Projekt ist ein durchgängiger Prozess (inkl. notwendiger Werkzeuge und Verfahren) als Prototyp für die detaillierte Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum entstanden. Auf Basis einer Internet-basierten Stadtmodellplattform (Web-Portal), auf die der Endanwender über einen Browser zugreifen kann, werden dynamische Vorgänge von Hochwasserereignissen an komplexen dreidimensionalen Modellen abgebildet. Alle zur Verfügung gestellten und aufbereiteten Daten wurden in der Stadtmodellplattform zusammengeführt und für die Definition von Hochwasserszenarien im Stadtgebiet von Dresden bereitgestellt. Ausgewählte Stadtbereiche können für die Simulation exportiert werden. Die einzelnen Dienste können als Widgets oder Plugins zugeschaltet werden. Die folgenden Funktionalitäten sind enthalten:

- Durchgängiger Workflow für detaillierte Hochwasserrisikoanalysen, der die Funktionalität aus großräumigen 2D-HN-Analysen mit detaillierten 3D-HN-Analysen abgegrenzter Objekte auf Basis der Stadtmodellplattform zur Abbildung dynamischer Vorgänge an komplexen dreidimensionalen Stadtmodellen kombiniert
- Mögliche Berücksichtigung operativer Hochwasserschutzmaßnahmen im Modell. Hiermit können z. B. temporär errichtete Barrieren im Rahmen des operativen Hochwasserschutzes berücksichtigt werden.
- Einbindung zusätzlicher Daten, z. B. aus Flusspeilungen (Bathymetrie) oder dem 3D-Laserscanning sowie von Dritten gemessenen Pegelständen
- Ermittlung möglicher Hochwasserschäden und deren Darstellung in Stadtmodellen. Für ein Hochwasserszenario können somit für einzelne Gebäude und/oder für einen ganzen Stadtteil Schadensprognosen erstellt werden.
- Nutzerspezifische Visualisierung und Aufbereitung der Berechnungsergebnisse. Hierbei wurde insbesondere das Ziel verfolgt, der Bevölkerung Hochwassergefahren zu vermitteln und das Risikobewusstsein zu steigern bzw. zu reaktivieren.

Das Ergebnis war nur durch ein interdisziplinär arbeitendes Team zu erreichen mit den Schwerpunkten 3D-Stadtmodell, hydrodynamische-numerische Simulation und Rendering. Im Ergebnis der zweiten Projektphase kann das 3D-Stadtmodell an städtische Informationsverarbeitungssysteme angekoppelt werden. Nachdem bei den Landesvermessungsämtern bereits die 3D-Grunddaten vorliegen, müssten die Städte und Kommunen nun den Einstieg in die Anwendung finden.

Die Projektergebnisse wurden mit Vertretern der Stadt Dresden sowie weiteren Fachleuten (s. Protokoll FBKT) diskutiert. Dort sieht man diesen Einstieg als überfällig, da die Landesbetriebe häufig noch traditionelle Karten, teilweise in Papierform, nutzen. Ein leichter Einstieg könnte zunächst in Bezug auf einzelne Infrastrukturobjekte sinnvoll sein. Das Umweltamt sieht für die Stadt Dresden mit ihren knapp 600.000 Einwohnern, ihren komplexeren Problemlagen und vielfältigen Strukturen, die sich z. B. im Vorhandensein von etwa 100 verschiedenen Ämtern äußert, viele Ansatzpunkte, die jetzt aufzugreifen wären:

- Bessere Information der Bürger über Hochwassergefahren und Pegelstände. Vorgaben des Freistaates Sachsen, wie z. B. Risikokarten, könnten in der

Stadtmodellplattform umgesetzt werden. Ansprechpartner wären hierzu das Vermessungsamt Dresden sowie die Landestalsperrenverwaltung Sachsen.

- Die Nutzung von Augmented Reality würde Dresden auf dem Weg zur Smart City voranbringen (Initiative „Smart City Dresden – So leben wir morgen“). An ausgezeichneten Punkten könnten für mobile Endgeräte Informationen zu Verkehr, Umwelt und Hochwasser angeboten werden.
- Nutzung der Plattform zur Automatisierung und Vernetzung verwandter städtischer Daten und Prozesse. Beispielhaft genannt werden können Wasserhaushaltsfragen oder die bioklimatische Erwärmung. Für Letzteres hat Dresden bereits Testgebiete ausgewiesen.
- Wechselwirkung zwischen 2D- und 3D-Darstellung. Im Einzelnen wäre zu ergründen und ggf. mit Nachbargemeinden abzustimmen, in welchen Bereichen 3D-Modelle eingeführt werden könnten. Die Notwendigkeit wird zunächst im Bereich von Bauwerksschadensanalysen oder der Ermittlung lokaler Belastungen für Bauwerke gesehen.

Die Landestalsperrenverwaltung Sachsen muss die Hochwasserschutzkonzepte (gemäß der EU-Vorgaben) fortlaufend aktualisieren. Die im Projekt erzielten Ergebnisse können dies maßgeblich erleichtern und weiter automatisieren.

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

#### **3.4.1 Ökologische Bewertung**

Mit der webbasierten Stadtmodellplattform und den verschiedenen Analyseverfahren, insbesondere mit der entwickelten Kopplung zwischen 2D- und 3D-Analysen und der Ergebnisvisualisierung in der Stadtmodellplattform, können für hochwassergefährdete Städte wie Dresden 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 orientierten 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 entwickelten 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 singulär oder gekoppelt wirkender Hochwasserschutzanlagen als Grundlage für Nutzen-Kosten-Analysen
- Untersuchung zur langfristigen Gewährleistung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Fließgewässern (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 in das 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 im Projekt entwickelten Werkzeugen und den dadurch verbesserten Möglichkeiten

beim Umgang mit Hochwasserereignissen wird 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 in akzeptabler Rechenzeit realitätsnahe und für die Einsatzplanung nutzbare Ergebnisse liefern können.

Die Möglichkeit zur Integration von Schadensfunktionen (Gebäude, Personen, Infrastruktur) wird als ein wichtiges Projektergebnis erachtet, da sie in Verbindung mit dem Stadtmodell ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber der bisherigen Praxis darstellen.

Darüber hinaus ist speziell auch die anwenderfreundliche Aufbereitung und Visualisierung der Simulationsergebnisse mit Blick auf den praktischen Mehrwert der Forschungsergebnisse sehr wichtig. Hierzu ist eine mit der photorealistischen Darstellung sehr realitätsnahe und zweckorientierte Visualisierung der zentralen Simulationsergebnisse (Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, spezifische Abflüsse) in der browserbasierten Stadtmodellplattform entstanden. Als moderne Art der Visualisierung, auch für größere Benutzergruppen, wurde damit begonnen eine Augmented Reality (AR) Anwendung zu realisieren, um z. B. früherer Hochwasserstände an ausgewählten Stellen realistisch wiederzugeben. Damit kann das Risikobewusstsein der Bevölkerung besser erhalten und gesteigert werden.

### **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 ist.

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

Im Projekt erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit der Stadt Dresden, die Stadt- und Daten zum Hochwasserschutz Elbe bereitgestellt hat. Seit dem Jahr 2002 ist die Stadt Dresden in der Liste der von Hochwasser betroffenen Städte weit nach vorne gerückt. Neue, zukunftsfähige Konzepte müssen entworfen werden und der Hochwasserschutz ist der Bevölkerung besser zu kommunizieren. Die bessere

Vermittlung Hochwasser-relevanter Informationen an die Bevölkerung war auch explizit ein Wunsch des Umweltamtes Dresden für das vorliegende Projekt. Da 3D-Stadtmodelle auch in anderen Bereichen zum Einsatz kommen, ergänzt die Hochwasseranalyse das Instrumentarium der Stadt Dresden zur Stadtplanung in idealer Weise.

Gemäß einer Auflage der DBU wurden zwei Forschungsbegleitkretreffen durchgeführt, das erste zum Ist-Stand zum Vorhabenbeginn und das zweite zur Präsentation der Projektergebnisse.

Das erste Treffen fand am 24.08.18 an der TU Dresden statt. Außer den Projektpartnern waren Vertreter vom Umweltamt Dresden, von der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen und des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft (LHW) Sachsen-Anhalt anwesend. Somit konnte auch ein Repräsentant des Landes Sachsen-Anhalt über den Projektfortschritt informiert werden, nachdem sich die Stadt Magdeburg, die im Antrag als assoziierter Partner genannt war, zurückgezogen hatte.

Das zweite Treffen fand am 06.06.19 ebenfalls an der TU Dresden statt. Zu den bereits genannten Institutionen waren zusätzlich Vertreter des Landesamtes für Umwelt des Freistaates Sachsen, des Geodatenamtes des Stadt Dresden sowie des Leibniz-Institutes für Ökologische Raumentwicklung, Dresden, zugegen. Letzteres beschäftigt sich mit Umweltrisiken und Stadtentwicklung und hat für das Projekt verschiedene Modelle zur Berechnung von Hochwasserschäden beigesteuert.

Ein weiteres Treffen mit Vertretern der Stadt Dresden fand am 12.08.19 statt.

Die virtualcitySYSTEMS GmbH wird die weitere Verbreitung der Vorhabensergebnisse vorantreiben. Zu den Unternehmenstätigkeiten von VCS gehört die automatische Erstellung von 3D-Stadtmodellen aus Fernerkundungsdaten, das Aufsetzen von Managementsystemen für die Verwaltung von digitalen Stadtmodellen, die Bereitstellung von online-Systemen für den Browser-basierten Zugriff auf 3D-GIS, die Entwicklung von Prozessketten und Schnittstellen für unternehmens- oder behördeninterne Aufgabenstellungen sowie Beratungstätigkeiten im Zusammenhang mit 3D-Stadtmodellen.

Von besonderem Vorteil in der Nutzung von Stadtmodellen ist die Erschließung neuer Anwendungen, wie z.B. der Hochwassersimulation. Das Ziel der VCS GmbH ist daher eine integrierte Stadtmodellplattform, die alle Daten aus dem städtischen Umfeld vereinigt, um sie verschiedenen Anwendungen zur Verfügung stellen zu können. Neben dem Stadtmarketing für Industrie und Tourismus zählen dazu die Stadtplanung und urbane Analysen bis hin zu urbanen Simulationen. Neue Entwicklungen betreffen Untergrundmodelle von Städten mit Versorgungsleitungen, Bohrpfählen, U-Bahnen usw. sowie die Integration von Sensoren aller Art. Es gehört zur Strategie der VCS GmbH und ihrer Partner, diese Anwendungen voranzubringen und sie weiteren Städten und Gemeinden zur Verfügung zu stellen.

## 4 Fazit

Mit dem Projekt konnte eine hinreichend genaue und effiziente Berechnung sowie Abbildung des Fließverhaltens von Gewässern bei Hochwasserereignissen in komplexen urbanen Gebieten erreicht werden. Der durchgängige Workflow für die HN-Simulation und insbesondere die detaillierten Auswertemöglichkeiten der 3D-Simulation ermöglichen verbesserte Hochwasserrisikoanalysen im urbanen Raum.

Für die angestrebten Analyseverfahren wurden Prozessketten erarbeitet und Strategien zur Automatisierung realisiert. 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. Eine wichtige Rolle für die Automatisierbarkeit spielt die Qualität der verschiedenen vorhandenen Datenquellen. Wenn gut gepflegte Stadtdaten in hoher Qualität vorliegen, ist eine weitgehende Automatisierung und damit eine Modellerstellung, Analyse und Auswertung fast „auf Knopfdruck“ möglich. Weisen aber Modellbestandteile eine nicht ausreichende Qualität auf, so muss das Modell manuell nachgebessert 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.

Das Projekt ist auch in Zusammenhang mit dem Vorprojekt (Aktenzeichen 32125-23) zu sehen. Im Vorprojekt 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 worden. Neben der Entwicklung der benötigten Schnittstellen standen die Entwicklung (2D-HN-Modell) und die zweckmäßige Anpassung (3D-HN-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 wies dieses Modell bereits eine deutlich höhere Komplexität auf als die sonst üblichen 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.

Diese Vorentwicklungen und Ergebnisse sollten im aktuellen Projekt optimiert bzw. finalisiert, weiter miteinander verbunden und bestmöglich automatisiert werden, damit ein praxistauglicher Prototyp entsteht, wie er für das Gesamtvorhaben angestrebt wurde. Im aktuellen Vorhaben konnten wichtige zusätzliche Ergebnisse erreicht werden:

- 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 konnte eine kombinierte und detaillierte Analysefunktionalität realisiert werden. Hierzu zählt u. a. die Entwicklung der Schnittstelle zwischen 2D- und 3D-HN-Simulation auf Basis der Stadtmodellplattform und die bestmögliche Automatisierung aller Prozesse.

- Das Verfahren wurde anhand von komplexeren Realszenarien aus vorhandenen Daten der Stadt Dresden getestet und validiert. Die repräsentativen Szenarien wurden in enger Kooperation mit dem städtischen Partner untersucht und lieferten daher einen direkten Mehrwert für die Aufgaben der Stadtplanung im Sinne eines modernen Hochwasserrisikomanagements. Sie befördern zudem die Demonstration und Verbreitung der Projektergebnisse.
- Die zentralen Simulationsergebnisse (temporäre Hochwasserschutzmaßnahmen, Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, spezifische Abflüsse, Gebäudeschadensfunktionen) wurden in der webbasierten Stadtmodellplattform realitätsnah und zweckorientiert visualisiert. Besonders hervorzuheben ist die Schärfung des Risikobewusstseins durch fotorealistische Darstellungen zur Verdeutlichung von Hochwassergefahren. Der Betroffenheitsgrad von kritischen Infrastrukturen (z. B. Krankenhäuser, Versorgungswerke, usw.) kann zur anschaulichen Information von Bürgern und Entscheidungsträgern differenziert ausgewiesen werden. Zusätzlich erfolgt eine Verlinkung mit sensorerfassten Realdaten (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.

## Veröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen sind aus dem Forschungsprojekt heraus entstanden:

Heyer, T., Hammoudi, H.; Muvdi, R.T.; Trometer, S.; Schilling, A.; Stamm, J. (2018): Flood simulation and risk analysis based on semantic 3d city models coupled with hydronumeric models (FloRiCiMo). 5th IAHR Europe Congress. Trento, Italy.

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, S. 1-9

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“

## Vorträge

Dr.-Ing. Torsten Heyer: FloRiCiMo - Flood Risk Analysis using Semantic 3D-City Models (Autoren: T. Heyer, R. Zimmermann, L. Backhaus), Workshop des EU-Forschungsprojekts „EU-CIRCLE“, Dresden, 08/2018

Dr.-Ing. Torsten Heyer: FloRiCiMo - Innovative flood risk analysis based on 3D city models (Autoren: T. Heyer, R. Zimmermann, L. Backhaus), 36. CADFEM ANSYS Simulation Conference 2018 – Forum Digital Cities, Leipzig, 10/2018

Dr. Torsten Heyer: Flood Simulation and Risk Analysis based on semantic 3D City Models coupled with Hydronumeric Models - FloRiCiMo, 2016 Sino-German Symposium on Novel Materials and Techniques for Emerging Pollutants Immobilization from Aqueous Media, Shanghai (China), 24.01.2016 - 29.01.2016

Dr. Torsten Heyer: Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum auf der Basis von gekoppelten hydrodynamisch-numerischen Modellen und 3D-Stadtmodellen - FloRiCiMo“ (Autoren: T. Heyer, H. Hammoudi, R. Tatis Muvdi, S. Trometer, A. Schilling), 39. Dresdner Wasserbaukolloquium – Gewässerentwicklung und Hochwasserrisikomanagement, Dresden, 03.03.2016 - 04.03.2016

Dr.-Ing. Torsten Heyer: Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum auf der Basis von gekoppelten hydrodynamisch-numerischen Modellen und 3D-Stadtmodellen - FloRiCiMo (Autoren: T. Heyer, H. Hammoudi, R. Tatis Muvdi, S. Trometer, A. Schilling), Baumesse Chemnitz, Chemnitz, 02/2017

Dr.-Ing. Torsten Heyer: Flood simulation and risk analysis based on semantic 3D city models coupled with hydronumeric models (FLORICIMO) (Autoren: T. Heyer, H.



Hammoudi, R. Tatis Muvdi, St. Trometer, A. Schilling, J. Stamm), 5th IAHR Europe Congress, Trento (Italien), 12.06.2018 - 14.06.2018

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm: Flood simulation and risk analysis based on semantic 3D city models coupled with hydronumeric models (FLORICIMO) (Autoren: T. Heyer, H. Hammoudi, R. Tatis Muvdi, St. Trometer, A. Schilling, J. Stamm), 37th IAHR World Congress, Kuala Lumpur (Malaysia), 14.08.2017 - 18.08.2017

Dr.-Ing. Torsten Heyer: Hochwasserrisikoanalyse im urbanen Raum auf der Basis von gekoppelten hydrodynamisch-numerischen Modellen und 3D-Stadtmodellen - FloRiCiMo (Autoren: T. Heyer, H. Hammoudi, R. Tatis Muvdi, S. Trometer, A. Schilling), HAUS Messe Dresden 2017, Dresden, 03/2017

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm: Perspectives of Flood Simulation based on Semantic Virtual City Models (FloRiCiMo) using possible synergies to the Deltares Circle project (Autoren: T. Heyer, J. Stamm), Workshop anlässlich eines Besuchs einer niederländischen Delegation in Mitteldeutschland (Sachsen, Sachsen-Anhalt), Dresden, 02/2017