

# Unsicherheiten und Probleme bei numerischen Hochwassersimulationen im urbanen Raum

*Leon Frederik De Vos, Dominik Kolesch und Nils R ther*

## Zusammenfassung

Die Problematik von häufiger auftretenden und intensiveren Starkregenereignissen erfordert die Konzipierung neuer Lösungsansätze. Innerhalb dieser Neuausrichtung ist die numerische Simulation eine wichtige Stütze für die Quantifizierung, Mitigation und Vorwarnung der resultierenden Hochwasserereignisse. Konzepte klassischer 2D-hydraulischer Modelle, die für fluviale Hochwassersimulation verwendet werden, können jedoch nicht direkt übernommen werden. Ein Grund hierfür ist, dass bei durch Starkregen im urbanen Raum verursachten Hochwasserereignissen andere Prozesse als bei fluvialem Hochwasser im Vordergrund stehen. So kann beispielsweise eine Trennung der Prozesse der Hydrologie, der Hydraulik an der Oberfläche und der Hydraulik im Kanalnetz nicht mehr strikt definiert werden. In diesem Beitrag werden jene maßgebenden Prozesse aufgezeigt und kritisch diskutiert. Anhand dessen werden die daraus resultierenden hohen Datenanforderungen für ein detailliertes numerisches Hochwassermodell im urbanen Raum erläutert. Abschließend wird die Kalibrierung und Validierung numerischer Hochwassermodelle im urbanen Raum diskutiert.

## 1 Motivation

Neben den klassischen fluvialen Hochwasserproblematiken kommt es in Mitteleuropa vermehrt zu pluvialen Hochwasserereignissen infolge von lokalen extremen Starkniederschlägen. Zum einen ist dies bedingt durch eine vom Klimawandel verursachte Zunahme der Niederschlagsmenge insgesamt (Seneviratne et al., 2021). Zum anderen gibt es Trendindizien aus Klimamodellen, dass die Anzahl der Tage pro Jahr mit einer hohen Niederschlagsintensität (z.B. >10 mm) in einigen Regionen wächst (DWD, 2020). Die höhere Konzentration des Jahresniederschlags auf weniger und stärkere Ereignisse verschärft die Gefahr von Starkregen zusätzlich, da trockener Boden Wasser initial schlechter aufnehmen kann und mehr Oberflächenabfluss entsteht.

Pluviale Hochwasserereignisse sind durch verschiedene Charakteristika von fluvialen Hochwasserereignissen abzugrenzen. Abgeleitet von dem lateinischen Wort für Regen „pluvia“ ist somit die Niederschlagsmenge selbst ausschlaggebend für das Hochwasserereignis. Anders als beim fluvialen Hochwasserereignis an gr o eren Fließgewässern drückt sich dies in einer geringen Vorwarnzeit von wenigen Stunden bis wenigen Minuten aus, da das Hochwasser am Ort des Starkniederschlages selbst auftritt (Bronstert et al., 2017).

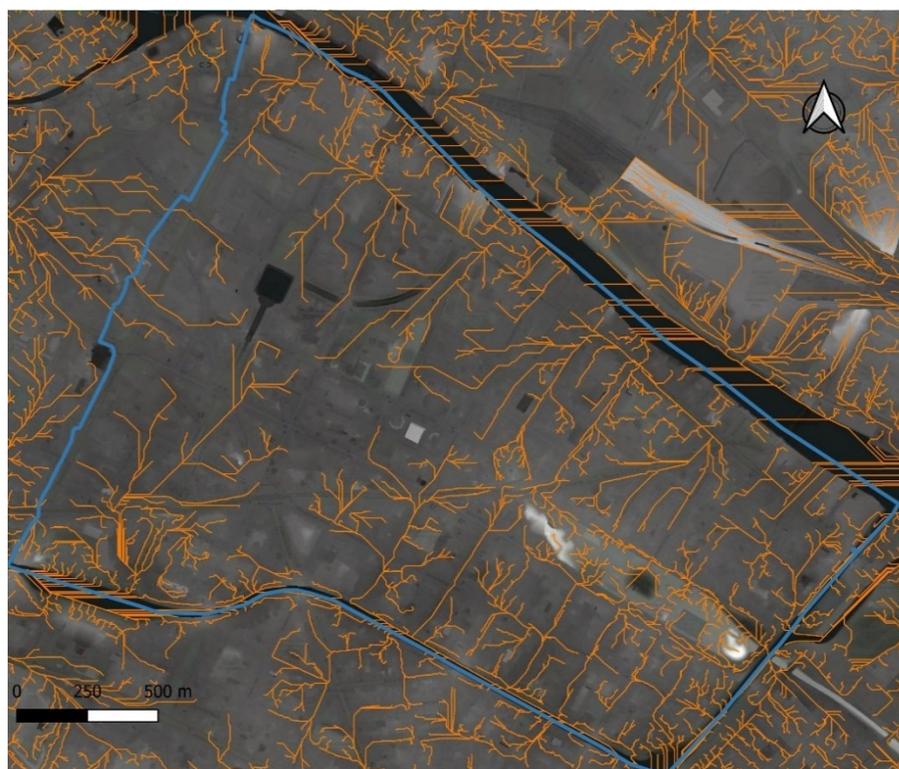
In topographisch steilem Gelände kann bei Starkregen eine Sturzflut entstehen, die mit ihren hohen Fließgeschwindigkeiten extreme Personen- und Sachschäden verursacht (BmIH, 2022). Jedoch haben pluviale Hochwasserereignisse auch in topographisch flachem urbanem Gelände ein ernstzunehmendes Schadenspotenzial, da die Niederschlagsmengen nicht abfließen können und alleine durch die urbane Entw sserungsinfrastruktur abgeleitet werden müssen (Kolesch et al., 2022).

Ein wichtiges Handwerk zur Beschreibung und Einschätzung der Auswirkung von Starkniederschlägen ist die hydraulische Modellierung. Experimentelle, physikalische Modellierung ist prinzipiell möglich, die Abbildung eines großflächigen urbanen Modellgebietes wird jedoch aufgrund

von Skalierungseffekten und der komplexen Interaktion einzelner Teilprozesse zusätzlich erschwert (Rubinato et al., 2020). Deswegen wird verstärkt die numerische hydraulische Modellierung angewendet, wobei auch hier weiterhin offene Fragestellungen bleiben und für aussagekräftige Ergebnisse zu pragmatischen Ansätzen gegriffen werden muss (Achleitner et al. 2020, LUBW, 2020).

In diesem Beitrag sollen anhand der Entwicklung eines numerischen hydraulischen Hochwassermodells in einem Teilgebiet der Stadt Berlin die kritischen Prozesse der Hochwasserdynamik erklärt und die daraus entstehenden Anforderungen an die Eingangsdaten diskutiert werden. Hierfür wird zunächst kurz die Hydrologie und das Kanalnetz in der Stadt beleuchtet und anschließend die Hydraulik detailliert betrachtet.

Das untersuchte Modellgebiet befindet sich zum Großteil im Berliner Stadtbezirk Friedrichshain-Kreuzberg und umfasst eine Fläche von ca. 4,2 km<sup>2</sup>. Im Nordosten ist das Gebiet von der Spree begrenzt, im Süden vom Landwehrkanal. Im Südosten werden die Spree und der Landwehrkanal von einer Schleuse getrennt. Im Nordwesten läuft die Modellgrenze durch ein Siedlungsgebiet (siehe Abb. 1). Das Modellgebiet hat eine sehr flache Topographie mit einer Ausprägung von ca. 30-45 müNN. Das Gelände fällt von der Modellmitte zu den Modellrändern hin ab, was durch die dargestellten Fließpfade verdeutlicht wird.



**Abb. 1** Berliner Modellgebiet mit Darstellung des DGMs und der abgeleiteten Fließpfade

## 2 Modellaufbau und Eingangsdaten

### 2.1 Stadtentwässerung und Kanalnetz

Die anfallenden Niederschlagsmengen sollen in urbanen Gebieten prinzipiell von Entwässerungssystemen aufgenommen und somit Überschwemmungen vermieden werden. Die Entwässerungssysteme sind abhängig von der Flächennutzung auf verschiedene Jährlichkeiten zu di-

mensionieren, wobei für Neuplanungen von Entwässerungssystemen in Stadtzentren oder Industrie- und Gewerbegebiete empfohlen wird, dass ein Niederschlagsereignis mit einer Jährlichkeit von 30 Jahren nicht zu einer Überflutung des Gebiets führt (DWA, 2016). Folglich sollte die Stadtentwässerung aufgrund der großen Aufnahmekapazität auch bei der hydraulischen Modellerstellung berücksichtigt werden. Detaillierte Ansätze gehen hier einer direkten Kopplung des Kanalnetzmodells mit dem hydraulischen Oberflächenmodell nach. Dies erfordert jedoch einen sehr hohen Zeitaufwand in der Modellerstellung für die Kopplung selbst und wird nur durch wenige kommerzielle Software ermöglicht (z.B. MIKE FLOOD, InfoWorks ICM). Ein vereinfachter Ansatz ist eine sequentielle Kopplung, in der zunächst das Oberflächenmodell und das Kanalnetzmodell separat simuliert werden und als jeweilige Eingangsdaten des anderen Modells für einen zweiten Simulationslauf dienen (Monschein & Gamerith, 2021).

Ein pragmatischer Ansatz zur Einbeziehung der Stadtentwässerung ist die Repräsentation als Volumenabschlag. Hierfür wird zunächst das Gesamtvolumen des Kanalnetzes berechnet. Nun wird angenommen, dass zu Beginn des Niederschlagsereignisses das Regenwasser direkt in das Kanalnetz aufgenommen wird, bis die Kapazität erreicht ist. Abb. 2 zeigt den resultierenden Hyetographen für ein Referenzereignis in Berlin. Für dieses Ereignis kann das Kanalnetz das Niederschlagsvolumen der ersten 30 Minuten aufnehmen, sodass der an der Oberfläche verbleibende gefallene Niederschlag nach Volumenabschlag in dieser Zeitspanne 0mm ist. Bis ca. 40 Minuten kann das Kanalnetz noch einen Anteil des gefallenen Niederschlags aufnehmen, danach ist das Kanalnetz vollständig gefüllt und somit wird kein weiterer Niederschlag mehr aufgenommen.

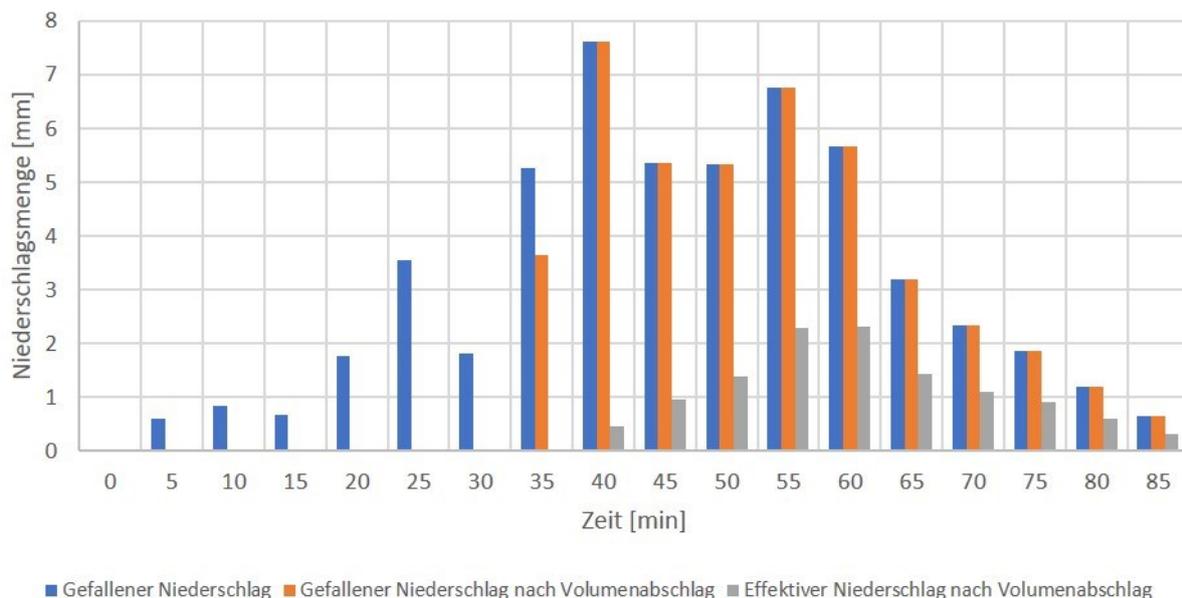
Dieser Ansatz verliert jedoch an Genauigkeit, je langsamer das Niederschlagsereignis an Intensität gewinnt, da dann das Regenwasser aus einem Entwässerungssystem auf andere Vorfluter oder Fließgewässer innerhalb der Stadtentwässerung umverteilt werden kann. Zudem wird ein Teil des Regenwassers dieses Einzugsgebiets mit Pumpen zu Klärwerken außerhalb der Stadt transportiert. Auch der lokale Überstau des Kanalnetzes kann mit diesem Ansatz nicht repräsentiert werden.

## 2.2 Hydrologie

Die Hydrologie kann in einem topographisch flachen Modellgebiet nur schwer von der Hydraulik getrennt betrachtet werden, da der Niederschlag sich in einem pluvialen Hochwasser nicht zwingend im Fließgewässer sammelt, sondern auch fernab von Gewässerkörpern in Straßen oder topographischen Senken akkumuliert. Ein separates hydrologisches Modell müsste folglich an sehr vielen punktuellen Schnittstellen zum hydraulischen Modell gekoppelt werden. Deswegen bietet es sich an, den hydrologischen Prozess direkt in das hydraulische Modell mitaufzunehmen.

Aufgrund der einfachen Implementierung ist das sogenannte Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Verfahren bereits in verschiedenen hydraulischen Programmen enthalten (z.B. HEC-RAS, TELEMAC, HydroAS), um den Niederschlags-Abfluss-Prozess der Hydrologie zu repräsentieren. Das SCS-CN-Verfahren hat den großen Vorteil, dass sich aus der Landnutzung und der Bodenart die maßgebenden CN-Werte ableiten lassen (USDA, 1972, Broich, 2019). Hierbei beschreibt ein CN-Wert von 1 eine sehr große Infiltrationskapazität mit geringem resultierendem Oberflächenabfluss und ein CN-Wert von 100 eine vollständig versiegelte Oberfläche oder ein Gewässer selbst, sodass der gesamte Niederschlag zu effektivem Abfluss wird. Somit haben die CN-Werte einen maßgeblichen Einfluss auf den effektiven Niederschlag und die Modellergebnisse reagieren stark sensitiv auf die gewählten CN-Werte. Der zweite entschei-

dende Parameter für das SCS-CN-Verfahren ist die Bodenvorfeuchte, die aus der Niederschlagsintensität im Zeitraum vor dem zu modellierenden Starkregenereignis abgeleitet wird (Broich, 2022). In Abb.2 ist neben dem gefallenem Niederschlag und dem Niederschlag nach Volumenabschlag für das Referenzereignis in Berlin beispielhaft der effektive Niederschlag an einer Position mit dem CN-Wert von 81 dargestellt. Zu Beginn wird der Niederschlag vollständig in der Kanalisation bzw. im Boden gespeichert. Wenn der Boden „vorgesättigt“ ist, wird ein Teil des gefallenem Niederschlags zu Oberflächenabfluss.



**Abb. 2** Vergleich des gefallenem Niederschlags (blau) und mit dem gefallenem Niederschlag mit Volumenabschlag (rot) und dem effektiven Niederschlag inklusive Volumenabschlag nach dem SCS-CN-Verfahren (grau) für ein Referenzereignis.

### 2.3 Hydraulik

Sobald der Niederschlag nach dem Abschlag durch die Stadtentwässerung und dem hydrologischen Modell in einen effektiven Oberflächenabfluss konvertiert wurde, beginnen die Prozesse des hydraulischen Modells selbst.

Fließgewässer stellen eine stabile und zugleich leicht zu definierende Randbedingung für die Modellierung. Die Definition von Randbedingungen durch besiedeltes Gebiet ist dagegen mit höheren Unsicherheiten verbunden, da hier keine Messwerte vorliegen.

Auch die Infrastruktur des Stadtgebietes muss im Modell angemessen repräsentiert werden. Generell werden Gebäude wie bei fluvialen Hochwassersimulationen als undurchströmbare angenommen und somit als Löcher im Berechnungsnetz modelliert (LfU, 2018). Andere Ansätze wie z.B. das Modellieren der Gebäude als tatsächliche Erhebungen, poröse Körper oder Senken verursachen einen drastischen Mehraufwand in der Modellerstellung und -handhabung (Vojinovic et al., 2012).

Eine besondere Schwierigkeit stellen Zufahrten und Zugänge zu Innenhöfen dar. Diese sind meist weder auf Geodatenätzen zu Gebäudeumrissen gekennzeichnet, noch auf Satellitenbildern erkennbar. Oftmals können diese also nur durch eine Ortsbesichtigung identifiziert werden

und müssen dann in das Modell eingearbeitet werden. Hierbei muss beachtet werden, dass Zugänge zu Innenhöfen sehr klein sein können und deshalb kleine Elemente im numerischen Modell für eine präzise Repräsentation notwendig sind. Diese Zugänge können jedoch auch entscheidend dafür sein, ob ein Innenhof im Modell korrekt überflutet wird oder keine Verbindung zu den Straßen besteht. Hierdurch können sich Fließpfade maßgeblich verändern.

Abschließend sind die Rauheitsbereiche zu definieren. Auch diese lassen sich aus der Landnutzung aus Leitfäden ableiten (LfU, 2018; LUBW, 2020). Jedoch geben verschiedene Quellen eine große Bandbreite an Rauheitswerten für die gleiche Landnutzungs-kategorie (Huber, 2021). Die Landnutzungsdaten können zudem für eine korrekte Abbildung der inhomogenen Oberflächenbeschaffenheit einer Stadt zu grob aufgelöst sein. Gerade bei großen Straßen mit Mittelstreifen, Grünstreifen und Bürgersteigen kann es zu einer ungenauen Klassifizierung der Landnutzung kommen.

Zusätzlich gilt zu beachten, dass das klassische Strickler-Rauheitsmodell bei geringen Wassertiefen die Rauheit unterschätzt und dadurch das Verhalten eines Dünnschicht-Abflusses (sheet flow) nicht korrekt wiedergibt. Hierfür kann das Rauheitsmodell für geringe Wassertiefen angepasst werden (LUBW, 2020; Broich 2019).

Insgesamt sollte die Modellauflösung relativ fein sein. Da viele Datensätze bis zu einer Auflösung von 1 x 1 m verfügbar sind, kann dies als Grenzwert für die Auflösung des hydraulischen Modells verwendet werden. Hierbei können die entstehenden Modelle jedoch sehr rechenintensiv werden, sodass es sich bewährt, die Modelle so detailliert wie nötig, aber auch so grob möglich zu erstellen. Auf freien Flächen kann die Elementgröße beispielsweise vergrößert werden (Achleitner, 2020).

### **3 Kalibrierung und Plausibilisierung**

Eine Kalibrierung des Modells kann auf verschiedene Arten erfolgen, sofern Daten abgelaufener Ereignisse vorhanden und von ausreichender Qualität sind. Falls das Modellgebiet einen eindeutig festgesetzten Auslauf hat, so kann an diesem, wie bei der fluvialen Hochwassermodellierung, die simulierte mit der gemessenen Abflussganglinie verglichen werden. Die Volumenfülle der Abflussganglinie kann vor allem durch den CN-Wert oder das Einstellen anderer Parameter des hydrologischen Modells angepasst werden. Die Scheitelspitze sowie das zeitliche Verschieben der Abflussganglinie kann neben dem CN-Wert auch durch die Rauheitswerte angeglichen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Abweichung von den physikalisch begründbaren Parameterkorridoren auf Fehler an anderer Stelle im Modell hinweisen kann.

Des Weiteren ist eine Kalibrierung anhand von zeitabhängigen Wasserspiegelverläufen an ausgewählten Punkten im Modellgebiet möglich (Neumann et al., 2021). Auch der Vergleich der Überflutungsfläche mithilfe von Satellitendaten (Di Baldassarre et al., 2009) oder das kollektive Auswerten von Erfahrungsberichten Betroffener kann zur Kalibrierung herangezogen werden (Rohmat et al., 2022).

In vielen Modellgebieten ist jedoch entweder keine ausreichend genaue Datenerhebung zu einem abgelaufenen Ereignis vorhanden oder es sind noch keine relevanten pluvialen Hochwasser aufgetreten. In diesem Fall können die pluvialen Hochwassermodelle nur plausibilisiert werden.

Bei einer Plausibilisierung kann zunächst überprüft werden, ob die simulierten Ergebnisse stabil und schlüssig sind. Dies bedeutet, dass z.B. keine großen Sprünge im zeitlichen und räumlichen

Verlauf von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten in der numerischen Lösung auftreten. Des Weiteren können die simulierten Überflutungsflächen an lokale Experten oder Anwohner übergeben werden, die die Ergebnisse bewerten können (Achleitner, 2020).

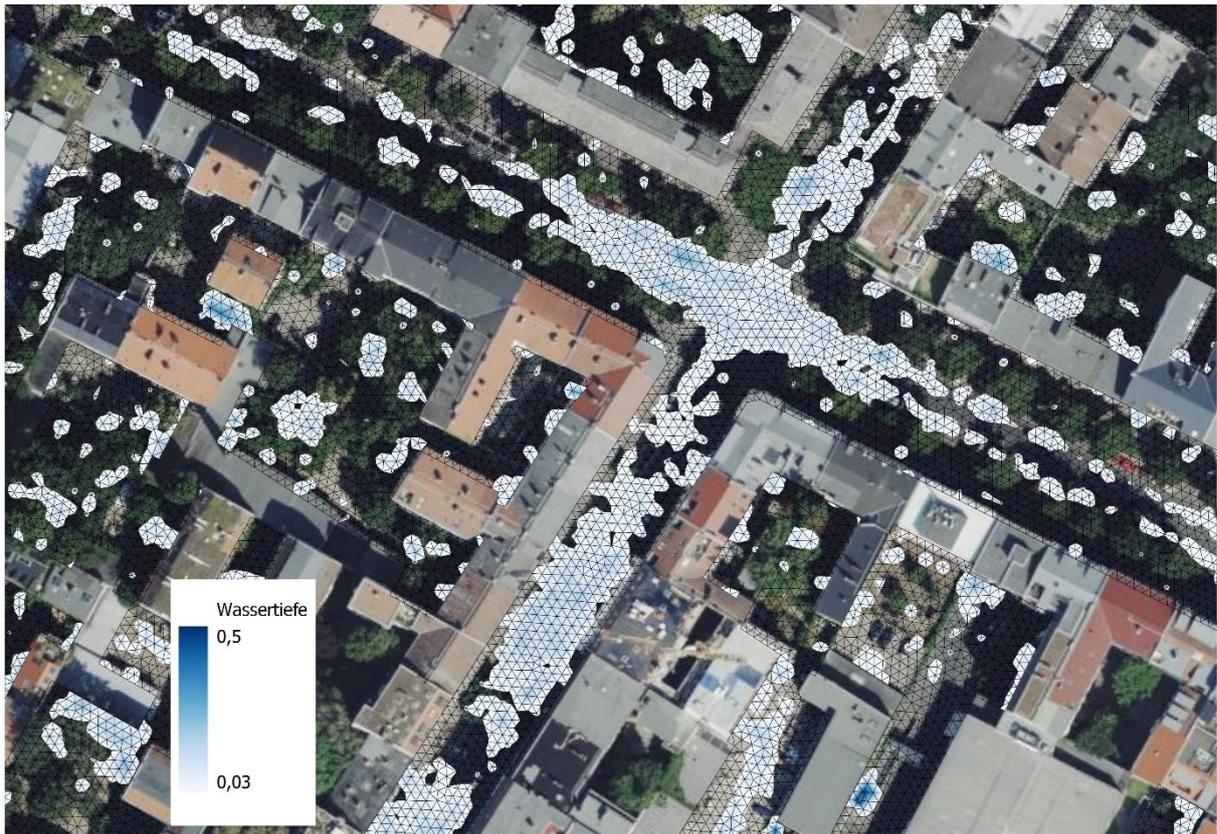
#### **4 Anwendung und Ergebnisse**

Das resultierende Berechnungsnetz des pluvialen Hochwassermodells für das Berliner Beispiel hat ca. 1,5 Millionen Dreiecks-Elemente mit einer Elementkantenlänge von 60 cm bis 3,7 m. Die numerische Simulation erfolgt mit dem open-source Programm TELEMAC, welches eine hohe Parallelisierung ermöglicht und dadurch die Rechenzeit stark verringert (EDF, 2022).

Das Modellgebiet in Berlin ist zu einem großen Teil von der Spree und dem Landwehrkanal umgeben (siehe Abb. 1). Da diese auch bei extremen Starkniederschlägen keinen Rückstau ins besiedelte Gebiet verursachen oder selbst die Ufer überfluten, können sie als Randbedingungen mit konstantem Wasserstand angenommen werden. Die Randbedingung durch das besiedelte Gebiet ist durch eine geschlossene Wand modelliert. Dies verursacht in der Nähe dieser Randbedingung erhöhte Wassertiefen, da das Wasser nicht über diesen Rand abfließen kann. Hier sollen noch verschiedene Randbedingungen untersucht und getestet werden. Die Gebäudeumrisse wurden als Löcher in das Berechnungsnetz integriert, die Zufahrten und Zugänge zu Innenhöfen werden jedoch noch nicht berücksichtigt.

Die Rauheitswerte wurden aus den öffentlich zugänglichen Landnutzungsdaten aus dem Geportal Berlin mithilfe des Leitfadens des LUBW hergeleitet (LUBW, 2020). Die Landnutzungsdaten sind nicht präzise genug, um hoch aufgelöste Rauheitsbereiche abzubilden. Aufgrund der flachen Topographie haben jedoch Sensitivitätsuntersuchungen gezeigt, dass die Rauheit im Vergleich zu den hydrologischen Parametern deutlich weniger sensitiv ist. Deswegen wurde vorerst darauf verzichtet, die Rauheitsbereiche manuell zu verfeinern. Das Strickler-Rauheitsmodell wurde eigenständig für geringe Wassertiefen (<10 cm) in TELEMAC angepasst (LUBW, 2020).

Abb. 3 zeigt exemplarisch die maximale Wassertiefe des pluvialen Hochwassermodells für das Referenzereignis aus Abb. 2 an einer Kreuzung im Modellgebiet. Das Referenzereignis hat eine Niederschlagshöhe von 39 mm in 150 Minuten und entspricht einem abgelaufenen Ereignis aus einem anderen Stadtbezirk Berlins aus dem Jahr 2019. Das Kanalnetz wird per Volumenabschlag berücksichtigt, was ca. 7 mm Niederschlagshöhe entspricht. Mit dem SCS-CN-Verfahren ergibt sich beispielsweise an einer Position mit dem CN-Wert von 81 eine effektive Niederschlagshöhe von 14 mm (siehe Abb. 2). Dies verursacht nur geringe Wassertiefen im Modell, sodass nicht die gesamte Straße überflutet wird und das Wasser sich teilweise nur in kleinen Senken oder Pfützen sammelt (siehe Abb. 3). Für eine präzisere Darstellung von geringen Wassertiefen müsste das Modell weiter verfeinert und detaillierte Infrastruktur wie beispielsweise Bordsteinkanten aufgenommen werden.



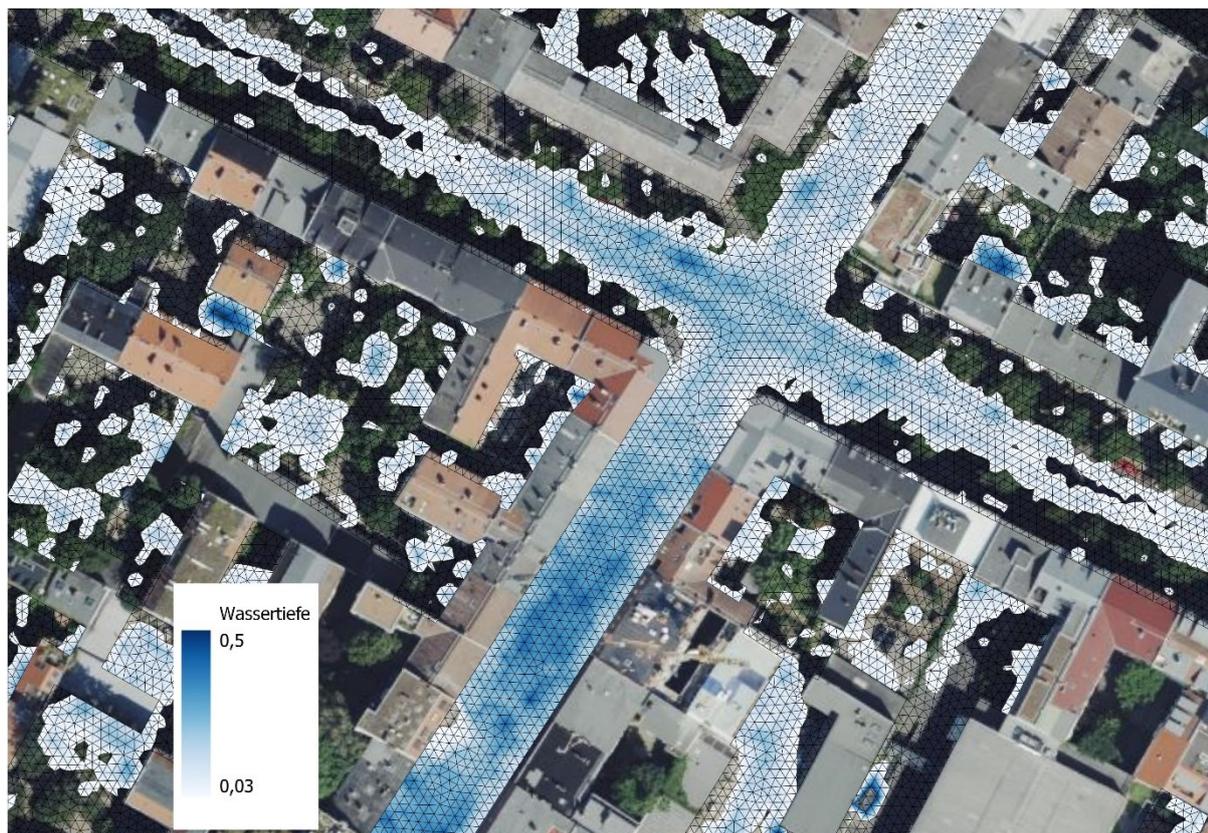
**Abb. 3** Maximale Wassertiefe an einer Kreuzung im Modellgebiet für das Referenzereignis.

Zusätzlich wird ein 100-jährliches Niederschlagsereignis (HN100) mit einer Niederschlagshöhe von 56 mm in 60 Minuten simuliert. Das Niederschlagsereignis basiert auf dem KOSTRA-Datensatz und wird als Blockregen angenommen. Das Kanalnetz wird wie beim Referenzereignis mit einem Volumenabschlag von entsprechend 7 mm berücksichtigt. An einer Position mit dem CN-Wert 81 ist der effektive Niederschlag 30 mm. Abb. 4 zeigt die modellierte maximale Wassertiefe an der gleichen Kreuzung im Modellgebiet. Im Vergleich zum Referenzereignis sind Fließwege entlang der Straßen zu erkennen und einzelne Bereiche des Bürgersteigs bereits vollständig überflutet.

Das vorgestellte Modell läuft numerisch stabil und ist gemessen an den berücksichtigten Prozessen plausibel. Es kann deswegen dafür verwendet werden, verschiedene Einflussfaktoren auf den Ablauf von Starkregenereignissen zu bewerten. Für eine genauere Darstellung der Starkregenproblematik im Modellgebiet sollen im nächsten Schritt die Zugänge und Zufahrten zu den Innenhöfen im Modell abgebildet werden. Anschließend soll eine detailliertere Repräsentation des Kanalnetzes erfolgen.

## 5 Fazit

Die Modellierung von pluvialen Hochwasserereignissen ist sehr komplex, da sie viele verschiedene Prozesse der Stadtentwässerung, Hydrologie und Hydraulik vereinen muss. Ein robustes Modell kann nur mit großer Sorgfalt erstellt werden und ist stark abhängig von der räumlichen Auflösung und Qualität der Eingangsdaten. Auch mit sehr guten Eingangsdaten verbleibt eine Unsicherheit bei der korrekten Einstellung der hydrologischen Parameter. Bei topographisch steilen Einzugsgebieten ist weiterhin die Rauheit ein wichtiger Parameter. Dies verlangt eine genaue Überprüfung der Modellergebnisse auf Plausibilität sofern eine Kalibrierung nicht möglich ist.



**Abb. 4** Maximale Wassertiefe an einer Kreuzung im Modellgebiet für ein HN100.

## Danksagung

Das vorgestellte Hochwassermodell wird als Teil des Forschungsprojektes „Inno\_M AUS“ der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierten Fördermaßnahme „WaX – Wasser-Extremereignisse“ erstellt und verwendet (BmBF, 2020).

## Literatur

- Achleitner, S., Huber, A., Lumassegger, S., Kohl, B., Spira, Y., Weingraber, F. (2020). Pilotstudie Oberösterreich. Modellierung von Starkregen-Oberflächenabfluss/Hangwasser. Leitfaden. Bundesministerium des Innern und für Heimat (2022). Bericht zur Hochwasserkatastrophe 2021: Katastrophenhilfe, Wiederaufbau und Evaluierungsprozesse.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BmBF). (2020). Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Thema „Wasser-Extremereignisse“ im Bundesprogramm „Wasser-Forschung und Wasser-Innovationen für Nachhaltigkeit – Wasser:N“. Bundesanzeiger, 29.01.2020 B5.
- Broich, K., Pflugbeil, T., Disse, M., Nguyen, H. (2019). Using TELEMAC-2D for Hydrodynamic Modeling of Rainfall-Runoff. In: XXVIIIth TELEMAC-MASCARET User Conference, 18th to 19th October 2022, Paris-Saclay.
- Broich, K., Obermaier, T., Alcamo, L., Disse, M. (2022). TELEMAC as a hydrodynamic rainfall-runoff model: New extension using the Green-Ampt-infiltration. In: XXVth TELEMAC-MASCARET User Conference, 15th to 17th October 2019, Toulouse

- Bronstert, A., Bormann, H., Bürger, G., Haberlandt, U., Hattermann, F., Heistermann, M., Huang, S., Kolokotronis, V., Kunzewic, Z., Menzel, L., Meon, G., Merz, B., Meuser, A., Paton, E.N., Petrow, T. (2017). Hochwasser und Sturzfluten an Flüssen in Deutschland. In: Klimawandel in Deutschland.
- DWA (2016). DWA-Regelwerk. Merkblatt DWA-M 119. Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen.
- DWD (2020). Nationaler Klimareport. 4. Korrigierte Auflage, Deutscher Wetterdienst.
- EDF (2022). TELEMAC-2D. User Manual. Version v8p4.
- Huber, A., Lumassegger, S., Kohl, B., Spira, Y., Weingraber, F., Achleitner, S. (2021). Modellierung pluvialer Sturzfluten – Anforderungen und Sensitivitäten der 2D-hydraulischen Modellierung. *Österr Wasser- und Abfallw* 2021. 73:116-133.
- Kolesch, D., Neumann, J., Scheid, C., Engel, T., Rentschler, C., Langer, M., Führ, A., Reinhardt, M., Radomski, S., Sauter, D. (2022). SENSARE – Sensorbasierte Stadtgebietsanalyse für Starkregengefährdungen zur Warnung und Resilienzverbesserung der Verkehrsinfrastruktur.
- LUBW (2020). Anhänge 1 a,b,c: zum Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg.
- Landesamt für Umwelt Bayern (2018). Handbuch hydraulische Modellierung. Vorgehensweise und Standards für die 2-D-hydraulische Modellierung von Fließgewässern in Bayern.
- Monschein, M., Gamerith, V. (2021). Gekoppelte 1D-2D hydraulische Modellierung urbaner Sturzfluten – RAINMAN-Pilotstudie Graz Eggenberg. *Österr Wasser- und Abfallw* 2021. 73:104-115.
- Neuman, J., Scheid, C., Dittmer, U., Kolesch, D. (2021). Validierung eines Starkregenüberflutungsmodells anhand von Beobachtungsdaten. *Aqua Urbanica* 2021, Innsbruck.
- Rohmat, F., Sa'adi, Z., Stamataki, I., Kuntoro, A., Farid, M., Suwarman, R. (2022). Flood modeling and baseline study in urban and high population environment: A case study of Majalaya, Indonesia. *Urban Climate*. 46.
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Rubinato, M., Lashford, C., Goerke, M. (2020). Advances in experimental modelling of urban flooding. In: *Water-Wise Cities and Sustainable Water Systems: Concepts, Technologies, and Applications*.
- U.S. Department of Agriculture (1972). National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 10: Estimation of direct runoff from storm rainfall.
- Vojinovic, Z., Seyoum, S., Salum, M., Price, R., Fikri, A., Abebe, Y. (2012). Modelling floods in urban areas and representation of buildings with a method based on adjusted conveyance and storage characteristics. *Journal of Hydroinformatics*. 15.4.

## **Anschrift der Verfasser**

M.Sc. Leon Frederik De Vos  
Lehrstuhl für Hydraulic Engineering, TU München  
Arcisstraße 21, D-80333 München  
frederik.de-vos@tum.de

M.Sc. Dominik Kolesch  
Berliner Wasserbetriebe, AöR  
Neue Jüdenstraße 1, 10179 Berlin  
dominik.kolesch@bwb.de

Prof. Dr. Nils Rüther  
Lehrstuhl für Hydraulic Engineering, TU München  
Arcisstraße 21, D-80333 München  
nils.ruether@tum.de