

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Apel, Heiko; Vorogushyn, Sergiy; Viet Dung, Nguyen; Karremann, Melanie; Merz, Bruno

RIMurban – Ein generalisiertes Modell zur Abschätzung von Hochwasserrisiken durch Starkregen

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107553>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Apel, Heiko; Vorogushyn, Sergiy; Viet Dung, Nguyen; Karremann, Melanie; Merz, Bruno (2021): RIMurban – Ein generalisiertes Modell zur Abschätzung von Hochwasserrisiken durch Starkregen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 65. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 277-286.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



RIMurban – Ein generalisiertes Modell zur Abschätzung von Hochwasserrisiken durch Starkregen

Heiko Apel
Sergiy Vorogushyn
Nguyen Viet Dung
Melanie Karremann
Bruno Merz

Urbane Sturzfluten, die durch starke konvektive Niederschläge verursacht werden, stellen aufgrund der zunehmenden Intensität und Häufigkeit konvektiver Niederschläge durch die Erwärmung der Atmosphäre eine wachsende Bedrohung für Kommunen weltweit dar. Zur Abschätzung dieser pluvialen Hochwasserrisiken wurde das Modellsystem *RIMurban* entwickelt. *RIMurban* besteht im Kern besteht aus einem vereinfachten rasterbasierten 2D hydraulischen Modell, das die städtische Oberflächenüberschwemmung in hoher räumlicher Auflösung simuliert. Das Modell ist zur massiven Parallelisierung auf GPUs implementiert. Die spezifische städtische Hydrologie wird durch eine kapazitätsbasierte Simulation des Kanalnetzes und der Versickerung auf nicht versiegelten Flächen berücksichtigt. Der räumlich verteilte Niederschlagsinput kann aus lokalen Niederschlagsaufzeichnungen oder aus einer Analyse von Wetterradaraufzeichnungen von Starkniederschlagsereignissen abgeleitet werden. Hierzu wird ein Katalog von Starkregenereignissen in ganz Deutschland zur Verfügung gestellt. *RIMurban* simuliert die Überflutungsdynamik, sowie die Gesamtbelastung des Kanalnetzes. Basierend auf den Überflutungskarten werden die Schäden an privaten Wohngebäuden abgeschätzt. Aufgrund der vergleichsweise einfachen Modellstruktur und des geringen Datenbedarfs kann das Modellsystem auf eine große Anzahl von Gemeinden angewendet und zum Screening für urbane pluviale Hochwasserrisiko eingesetzt werden.

Stichworte: Starkregen, urbane Hochwasser, hydraulische Simulation, Hochwasserrisiko

1 Einleitung

Urbane Sturzfluten, die durch starke konvektive Niederschläge verursacht werden, stellen aufgrund der zunehmenden Intensität und Häufigkeit konvektiver Niederschläge durch die Erwärmung der Atmosphäre eine wachsende Bedrohung für Kommunen weltweit dar. Daher sind Hochwasserrisikomanagementpläne, die an das aktuelle Hochwasserrisiko angepasst sind, aber auch in der Lage sind, zukünftige Risiken zu managen, von großer Bedeutung. Diese Pläne benötigen notwendigerweise modellbasierte pluviale Hochwasserrisikosimulationen, um angemessene und kosteneffektive Hochwasserrisikomanagementstrategien zu planen und umzusetzen. In einer städtischen Umgebung müssen diese Simulationen eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung haben, um straßen- und sogar blockspezifische Managementlösungen umsetzen zu können. Darüber hinaus muss die Wirkung der Kanalisation einbezogen werden, um realistische Überflutungssimulationen zu erreichen, aber auch um die Effektivität des Kanalnetzes und seine Eignung für zukünftige Änderungen der pluvialen Gefährdung zu bewerten. Der Aufbau dieser Modelle erfordert jedoch typischerweise eine große Menge an Eingabedaten, ein hohes Maß an Modellierungsexpertise, einen langen Zeitaufwand für den Aufbau des Modells und für die abschließende Durchführung der Simulationen. Daher können die meisten Gemeinden, insbesondere die kleineren, diese Aufgabe nicht oder nur mit großem Aufwand übernehmen.

Um eine modellbasierte pluviale urbane Hochwassergefährdung und schließlich Risikoabschätzungen für eine große Anzahl von Kommunen bereitzustellen, wurde das Modellsystem RIMurban im Rahmen der Helmholtz Initiative Klimawandelanpassung und -minderung (HI-CAM) der deutschen Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren entwickelt. Das übergeordnete Ziel von RIMurban ist die Erschaffung eines universellen Werkzeugs für die Abschätzung von urbanen Hochwassern durch Starkregen. Das Werkzeug soll einen geringen Datenbedarf aufweisen und möglichst mit freien öffentlichen Datensätzen betrieben werden können. Dadurch sollen eine hohe Übertragbarkeit und ein geringer Arbeitsaufwand erreicht werden. Durch die Übertragbarkeit soll es vielen Kommunen ermöglicht werden, pluviale Hochwasserrisikoabschätzungen als Basis für ein adäquates Hochwasserrisikomanagement.

2 Methode

Der Kern des Systems besteht aus einem vereinfachten rasterbasierten 2D-Hydraulikmodell, das die Überflutungsdynamik in einer städtischen Umgebung in hoher räumlicher Detaillierung (Rasterzellengröße 1 5m) simuliert. Das Modell ist auf großen Grafikprozessoreinheiten (GPUs) implementiert, um eine massive Parallelisierung zu ermöglichen. Die spezifische städtische hydrologische Umgebung wird durch eine kapazitätsbasierte Simulation des Kanalnetzes und der natürlichen Versickerung auf nicht versiegelten Flächen berücksichtigt. Gebäude werden explizit im Geländemodell berücksichtigt, um ein detailliertes und realistisches Strömungsbild innerhalb der städtischen Umgebung zu erhalten. Das Modell berücksichtigt somit die spezifischen stadthydrologischen Eigenschaften, jedoch mit vereinfachten Ansätzen. Aufgrund dieser Vereinfachungen kann der Modellaufbau mit vergleichsweise geringen Datenanforderungen durchgeführt werden, die vollständig oder zumindest weitgehend mit frei verfügbaren Daten gedeckt werden können. Abbildung 1 illustriert die Modellstruktur. Die einzelnen Komponenten und Annahmen werden im Folgenden kurz beschrieben.

2.1 Notwendige Basisdaten

Als Basis benötigt RIMurban ein hochauflösendes Digitales Geländemodell (DGM) mit einer Rasterzellengröße von $\leq 5\text{m}$. Mit einer solchen Auflösung lassen sich die typischen städtischen Strukturen ausreichend realistisch darstellen. Solche DGM sind in den meisten Bundesländern mittlerweile frei verfügbar. Weiterhin wird ein digitaler Datensatz zum Gebäudebestand benötigt, um den Baubestand in den Modellierungen berücksichtigen zu können. Der freie Open Street Maps (OSM) Datensatz ist hierbei für Deutschland von ausreichender Genauigkeit. Weiterhin wird zur Ableitung der hydraulischen Rauigkeiten und der versiegelten/unversiegelten Flächen ein Datensatz zur Landnutzung benötigt. Hierzu stehen mehrere freie Datensätze (OSM, CORINE) zu Verfügung, aber auch viele Landesbehörden oder Kommunen stellen solche Datensätze zur Verfügung. Zuletzt wird noch ein Datensatz, der das oberirdische Einzugsgebiete und das Einzugsgebiet des Kanalnetzes beschreibt, benötigt. Dies ist aber keine zwingende Voraussetzung zur Modellerstellung, sondern dient der genaueren Simulation der Belastung des Abwassersystems.

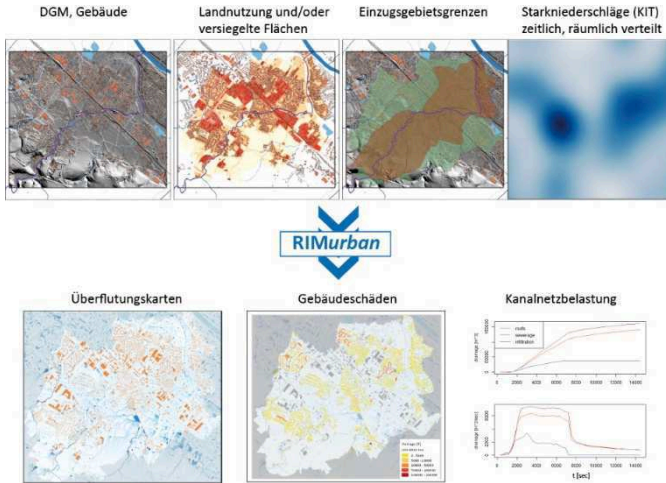


Abbildung 1: Schematische Darstellung der benötigten Eingangsdaten und der Ergebnisse vom RIMurban.

2.2 Hydraulisches Modell

Den Kern von RIMurban bildet ein zweidimensionales hydraulisches Modell, das direkt auf den regulären Rasterdaten die Überflutungsdynamik mittels einer expliziten Differenzennumerik simuliert. Die Numerik basiert auf einer Vereinfachung der Flachwassergleichungen, der sogenannten „local inertial approximation“, bei der der konvektive Beschleunigungsterm der Flachwassergleichungen nicht berücksichtigt wird. Dieser Ansatz wird detailliert in de Almeida and Bates (2013) vorgestellt und diskutiert. Hierbei wird gezeigt, dass die damit erzielten Ergebnisse mit denen der vollständigen Flachwassergleichungen vergleichbar sind, sofern die Strömungsverhältnisse im subkritischen Bereich bleiben. Um Instabilität bei kritischen oder annähernd kritischen Strömungen zu vermeiden wurde in RIMurban der in Almeida et al. (2012) vorgestellte Ansatz der numerischen Diffusion implementiert. Die numerischen Ansätze wurden in FORTRAN90 programmiert und mittels CUDA Fortran auf NVIDIA Tesla Graphikprozessoren (GPU) parallelisiert. Ziel der GPU Implementierung waren möglichst kurze Modellaufzeiten. Als Ergebnis liefert RIMurban Karten der Überflutungstiefen zu vordefinierbaren Zeitpunkten, sowie die maximalen Überflutungstiefen des Ereignisses. Aus der Zeitreihe der Überflutungstiefen können zudem räumlich verteilte Überflutungsdauern abgeleitet werden.

Die Abwassersysteme und deren Wirkung auf die Überflutungsdynamik sind in RIMurban nicht explizit in Form von Kanalnetzen berücksichtigt, sondern werden über einen kapazitiven Ansatz simuliert. Hierbei wird die Kapazität des Abwassersystems in mm/h definiert, und die oberflächlich anstehenden Wassermengen in den Simulationen entsprechend der Kapazität reduziert. Dies geschieht nur auf den versiegelten Flächen. Bei der Entwässerung der Dachflächen der Gebäude wird als Modellvereinfachung eine unbegrenzte Kapazität angenommen. Für die unversiegelten Flächen kann eine Infiltrationskapazität angegeben werden, wodurch die Wassermengen auf den unversiegelten Flächen analog zu den versiegelten reduziert werden. Die reduzierten Wassermengen werden aufsummiert und als Zeitreihe der gesamten Belastung des Abwassersystems unterschieden in versiegelte Flächen und Dachflächen als Modellergebnis zur Verfügung gestellt.

2.3 Niederschlagsereignisse

Der Niederschlagsinput muss räumlich verteilt sein. Er kann aus Extremwertstatistiken über lokale Niederschlagsmessungen und Annahmen über die räumliche Ausdehnung von Regengewittern in Abhängigkeit von der Intensität abgeleitet werden, oder aus einer Analyse von Wetterradaraufzeichnungen von Starkniederschlagsereignissen. Im Rahmen von HI-CAM wird dazu ein Katalog von Starkregenereignissen in ganz Deutschland abgeleitet, der auf RADOLAN Daten der letzten 19 Jahre basiert. Dieser Katalog kann als Input für pluviale Risikosimulationen für einzelne Gemeinden herangezogen werden. Hierbei können zum einen nur solche Ereignisse berücksichtigt werden, die tatsächlich im Beobachtungszeitraum in der Gemeinde auftraten, aber auch alle anderen Ereignisse aus dem Katalog. Hintergrund dieses Vorgehens ist der stochastische Charakter konvektiver Starkregenereignisse, wodurch das Auftreten der Ereignisse weitestgehend zufällig und nicht an lokale Besonderheiten geknüpft ist. Weiterhin wird der Ereigniskatalog die zukünftigen Änderungen der Extremereignisse enthalten. Diese werden auf der Basis von regionalen Klimasimulationen einer $\pm 1,5^\circ\text{C}$, 2°C wärmeren Welt abgeschätzt.

2.4 Schadens- und Risikoabschätzung

Basierend auf den Überflutungskarten werden die Schäden an privaten Wohngebäuden abgeschätzt. Hierzu wird das Schadensmodell von (Rözer et al., 2019) verwendet, das mittels eines „zero inflated bayesian beta regression model“ den relativen Schaden für Wohngebäude aus den Karten

zur Überflutungstiefe und -dauer ableitet. Der monetäre Schaden wird aus den relativen Schäden und einem europaweitem Expositionsdatensatz für Wohngebäude, der auf OBM Gebäuden disaggregiert wurde (Lüdtke et al., 2019), berechnet. Kombiniert man die errechneten Schäden mit den Wahrscheinlichkeiten dieser Ereignisse, kann das Gesamtrisiko in Form von Gebäudeschäden quantifiziert werden. Darüber hinaus erlaubt die simulierte Kanalnetzbelastung eine Abschätzung von Schäden an Klärwerken und möglichen ökologischen Schäden an Flüssen.

3 Testgebiete

In Zusammenarbeit mit der TU Dresden und dem Umweltamt Dresden wurden zwei unterschiedlich große Teilgebiete der Stadt mit RIMurban modelliert: das Lockwitzbachgebiet im Südosten, und Klotzsche im Norden der Stadt. Für beide Gebiete wurden dieselben Datensätze zur Modellerstellung verwendet. Im Folgenden werden die Datenätze und die daraus abgeleiteten Modelle beispielhaft am Lockwitzbachgebiet vorgestellt. Abbildung 2 zeigt das Lockwitzbachgebiet mit dem verwendeten DGM und den Einzugsgebietsgrenzen. Das 5m DGM wurde aus dem 2m DGM des sächsischen Landesvermessungsamtes abgeleitet. Das Lockwitzbachgebiet umfasst eine Fläche von 26 km² (1.037.112 Rasterzellen), das Klotzschegebiet 6.5 km² (259.659 Rasterzellen).

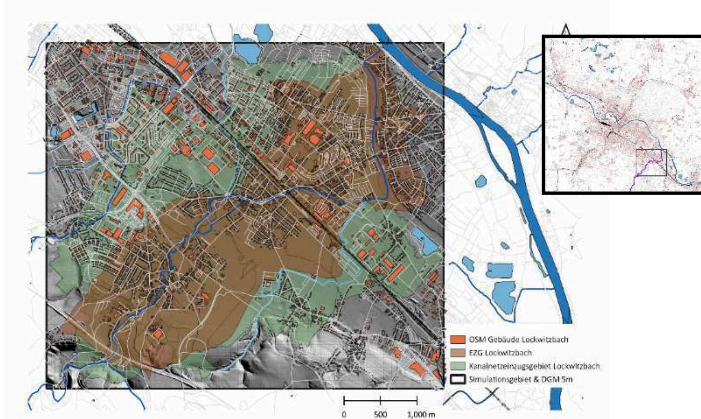


Abbildung 2: Testgebiet Lockwitzbach, Dresden: Simulationsgebiet, DGM und Einzugsgebiete.

Für Dresden stellt das Landesvermessungsamt eine detaillierte Kartierung des Versiegelungsgrades zur Verfügung. Diese Karte wurde im Modell verwendet.

Da eine detaillierte Versiegelungskarte vorlag, wurde die hydraulische Rauigkeit direkt aus der Versiegelung abgeleitet. Hierbei wurde bei einer vollständigen Versiegelung (100%) eine Manning-Rauigkeit von $n = 0.02$ entsprechend Standardwerten für versiegelte Flächen angenommen. Für unversiegelte Flächen (Versiegelung = 0%) wurde eine Rauigkeit von $n = 0.035$ angenommen, was den Standardwerten für größere Flussläufe und Wiesen entspricht. Entsprechend dem Versiegelungsgrad wurden flächig verteilte Rauigkeitswerte berechnet.

3.1 Simulierte Ereignisse

Für beide Testgebiete wurden beobachtete Starkregenereignisse simuliert, um die Plausibilität der Modellergebnisse überprüfen zu können. Die simulierten Ereignisse sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Simulierte Starkregenereignisse in den Testgebieten mit Niederschlagssumme pro Ereignis (aufsummiert auf eine Ereignisdauer von 2h) und der maximalen Intensität (in mm/5min).

	12.08.2002 (RADOLAN)	27.05.2014 (RADOLAN)	20.06.2013 (RADOLAN)	30.08.2020 (Station)
Lockwitzbach	25.3 mm/2h Max 4.1 mm/5min	17.9 mm/2h Max 17.4 mm/5min	---	---
Klotzsche	---	---	25.8 mm/2h Max 5.4 mm/5min	24.2 mm/2h Max 6.1 mm/5min

4 Ergebnisse

Die Simulationen wurden mit einer Kapazität des Abwassersystems von 20 mm/h und einer gesättigten Infiltrationsrate von 10 mm/h durchgeführt. Hierbei ist die Annahme der Kapazität des Abwassersystems eine erste Schätzung, die es noch weiter zu konkretisieren gilt. Die Simulationsergebnisse der Ereignisse wurden in beiden Gebieten mit Einsatzmeldungen der Feuerwehr verglichen. Dies war für das Hochwasser 2002 aufgrund der wesentlich größeren fluvialen Überflutungen allerdings nicht möglich.

Für beide wurden an den gemeldeten Überflutungen Wasserstände simuliert, die zu Überflutungen in Häusern führen können. Beispielhaft ist dies in Abbildung 3 gezeigt. Die Überflutung in der Veilchenstraße wurde vom Model sehr gut modelliert. Die Überflutung in der Bismarckstraße ebenfalls erfasst, allerdings mit geringen Überflutungstiefen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Modell selbst mit den verwendeten öffentlichen Daten und einer Standardparametrisierung plausible Ergebnisse liefert. Eine weitergehende Validierung oder Kalibrierung ist aber aufgrund der fehlenden Beobachtungsdaten nicht möglich.



Abbildung 3: Vergleich der simulierten maximalen Überflutungshöhen am 27.05.2014 im Lockwitzbachgebiet mit gemeldeten Hochwasserschäden.

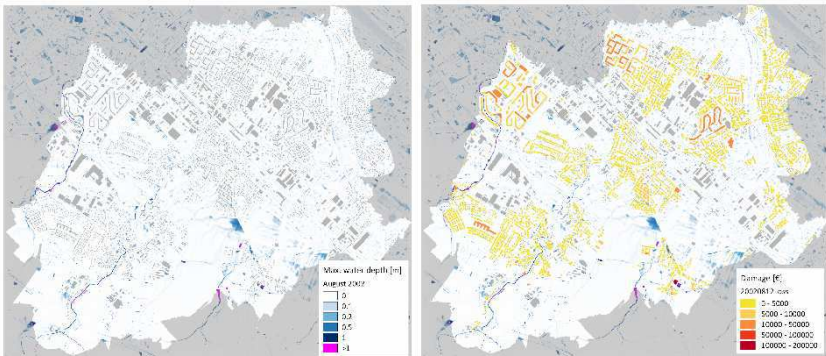


Abbildung 4: Links: Maximale Überflutungstiefen berechnet aus den Maximalniederschlägen im August 2002 unter Annahmen einer Kapazität des Abwassersystems von 20 mm/h und einer Infiltrationskapazität von 10 mm/h. Rechts: Aus den Simulationsergebnissen abgeschätzte Gebäudeschäden.

Abbildung 4 zeigt die maximalen Überflutungstiefen aus den Regenereignis von 2002 (begrenzt auf 2 Stunden der maximalen Niederschläge) und die daraus abgeleiteten Gebäudeschäden. Der Gesamtschaden liegt bei 8.8 Millionen EUR, was bei rund 6000 betroffenen Gebäuden einen mittleren Schaden von 1400 EUR ergibt. Dies ist im Vergleich mit anderen pluvialen Hochwassern und dokumentierten Schäden ebenfalls ein plausibles Ergebnis.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die simulierte Gesamtbelastung des Abwassersystems und die gesamte Infiltration im Testgebiet Lockwitzbach für das Ereignis von 2002. Mit Hilfe dieser Simulationen kann die Gefährdung von Kläranlagen und mögliche ökologische Schäden von Vorflutern abgeschätzt werden.

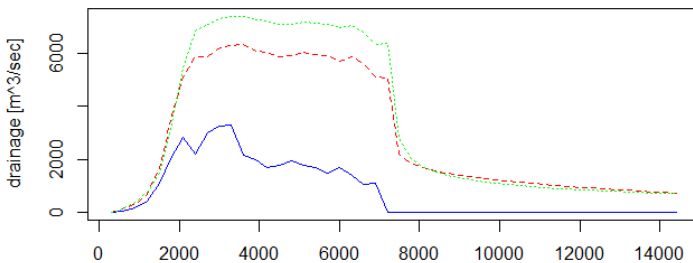


Abbildung 5: Simulierte Belastung des Abwassersystems unterteilt in Entwässerung der versiegelten Flächen (rot) und der Gebäudedächer (blau), sowie der Infiltration (grün) während des Regenereignisses im August 2002.

Die Laufzeit der Simulationen betrug bei dem simulierten Zeitraum von 4 Stunden (7200 sec, 2 Stunden Niederschlagsereignis + 2 Stunden Nachlaufzeit ohne Niederschlag) für Klotzsche ca. 180 sec, für das größere Lockwitzbachgebiet ca. 700 sec.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Testsimulationen von RIMurban lieferte plausible Ergebnisse, sowohl für die Überflutungsdynamik als auch für die Schadensabschätzung. Aufgrund der vergleichsweise einfachen Modellstruktur von RIMurban und des geringen Datenbedarfs kann der Modellaufbau leicht automatisiert und auf eine große Anzahl von Kommunen übertragen werden. Die Simulationsdauern sind für die vorgestellten Testgebiete gering bis sehr gering, insbe-

sondere im Vergleich mit den üblicherweise für diesen Zweck eingesetzten gekoppelten hydrodynamischen Modellen der Oberflächenüberflutungsdynamik und des Abwassersystems. Dadurch können mit RIMurban probabilistische Risikosimulationen durchgeführt werden, was aufgrund der hohen Rechenzeiten mit gekoppelten detaillierten hydrodynamischen Modellen nicht möglich ist. Da die Rechenzeiten mit der Domaingröße annähernd linear skalieren, empfiehlt sich RIMurban insbesondere für kleine und mittlere Kommunen, die noch keine pluviale Hochwasserrisikoanalyse durchgeführt haben und kann dort als Screening-Tool für das urbane pluviale Hochwasserrisiko eingesetzt werden.

6 Literatur

- Almeida, G. A. M. d., Bates, P., Freer, J. E., and Souvignet, M.: Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling, *Water Resources Research*, 48, W05528, doi:10.1029/2011WR011570, 2012.
- de Almeida, G. A. M., and Bates, P.: Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling, *Water Resources Research*, 49, 4833-4844, 10.1002/wrcr.20366, 2013.
- Lüdtke, S., Schröter, K., Steinhausen, M., Weise, L., Figueiredo, R., and Kreibich, H.: A Consistent Approach for Probabilistic Residential Flood Loss Modeling in Europe, *Water Resources Research*, 55, 10616-10635, 10.1029/2019wr026213, 2019.
- Rözer, V., Kreibich, H., Schröter, K., Müller, M., Sairam, N., Doss-Gollin, J., Lall, U., and Merz, B.: Probabilistic Models Significantly Reduce Uncertainty in Hurricane Harvey Pluvial Flood Loss Estimates, *Earth's Future*, 7, 384-394, 10.1029/2018ef001074, 2019.

Autor:

Dr. Heiko Apel

Sektion 4,4 Hydrologie
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Tel.: +49 331 288 1538
E-Mail: heiko.apel@gfz-potsdam.de