

## „CA-ffé in Innsbruck“- Ein schnelles Überflutungsmodell für das Starkregenmanagement in Innsbruck

M. Hauser<sup>\*1</sup>, M. Gholami Korzani<sup>2</sup>, A. Deletic<sup>2</sup> und M. Kleidorfer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Innsbruck, AB Umwelttechnik, Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck, Österreich

<sup>2</sup> Queensland University of Technology, Faculty of Engineering, Brisbane, QLD 4001, Australia

### Kurzfassung:

Überflutungen zufolge Starkregen haben in der Vergangenheit bereits oft zu großen Problemen geführt und werden klimawandelbedingt in Zukunft weiter zunehmen. Der Bedarf an entsprechenden Modellierungen für die Anwendung im Starkregenmanagement ist daher groß. Besonders im urbanen Raum spielt das Kanalsystem dabei auch eine nicht unerhebliche Rolle. Dynamic CA-ffé ist ein Überflutungsmodell, das es ermöglicht eine stadtweite Simulation von Starkregenüberflutungen in vergleichsweise kurzen Rechenzeiten durchzuführen. Dabei koppelt das Modell den 2D-Oberflächenabfluss und das 1D-Kanalsystem und ermöglicht so einen kontinuierlichen Austausch der Abflüsse. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde ein solches Modell für die Stadt Innsbruck (ca. 50 km<sup>2</sup>) aufgesetzt und validiert. Die Ergebnisse zeigen schnelle Simulationszeiten und gute Ergebnisse im Vergleich mit den Einsatzdaten der Feuerwehr. Eine höhere Auflösung der Eingangsdaten verbessert die Qualität der Ergebnisse zusätzlich, wirkt sich aber negativ auf die Rechenzeiten aus. In Zukunft soll das Modell daher weiter verbessert werden, um es direkt im Starkregenmanagement einsetzen zu können.

**Key-Words:** Urbane Überflutung, Überflutungsmodellierung, Starkregen, Kanalsystem, Dynamic CA-ffé

## 1 Einleitung

Starkregenereignisse werden in Zukunft zunehmen (Berndtsson et al., 2019; O'Donnell & Thorne, 2020) und haben in der Vergangenheit bereits mehrfach zu Überschwemmungen geführt. Besonders in städtischen Gebieten resultieren daraus oft großen Schäden. Starkregenüberflutungen haben im Vergleich zu Flusshochwasser kürzere Vorlaufzeiten und sind vorab schwerer örtlich einzugrenzen. Dementsprechend besteht ein großer Bedarf an geeigneten Modellen zur rechtzeitigen Vorhersage solcher pluvialen Überschwemmungen. Häufig wird dabei auf hydrodynamische Mo-

delle zurückgegriffen. Es gibt eine Vielzahl von Varianten und Ansätzen zur hydrodynamischen Modellierung. Grob lassen sich folgende Kategorien unterscheiden: 1D-Kanalnetzmodelle, 1D-Oberflächenmodelle, 2D-Oberflächenmodelle sowie gekoppelte Kanalnetz-Oberflächenmodelle (1D-1D oder 1D-2D) und sogenannte Hybridmodelle (Bulti & Abebe, 2020). Die Wahl des geeigneten Modells hängt von Faktoren wie Berechnungszeit, Vorhersageinteresse, Qualität der Ergebnisse (Teng et al., 2017) und Datenverfügbarkeit ab.

Gekoppelte 1D-2D-Modelle ermöglichen eine genaue Darstellung von Hochwasserereignissen, sind aber sehr ressourcen- und zeitaufwändig. Eine solche Modellierung ist daher insbesondere für sehr viele Simulationsdurchläufe oder den Einsatz während eines Ereignisses ungeeignet. Auch die Zahl der möglichen Szenarien oder Parameterstudien ist durch die langen Rechenzeiten begrenzt. Schnelle Hochwassermodelle versuchen, diesen Nachteil zu überwinden. Das Hauptziel dieser Modelle besteht darin, eine schnelle Simulation zu ermöglichen, die dennoch zuverlässige Ergebnisse liefert. Während detaillierte Modelle in der Regel die Flachwassergleichung lösen (Bates et al., 2010), gibt es bereits mehrere Ansätze, um die Berechnungszeit zu verkürzen. Diese Ansätze verwenden zum Beispiel vereinfachte Flachwassergleichungen, zelluläre Automaten (CA) (Guidolin et al., 2016) oder topografische Vertiefungen zur Berechnung von Überschwemmungen. Auch die Vereinfachung von komplexen Systemen in sogenannten Surrogatmodellen (Razavi et al., 2012) wird vielfach angewendet. Zusätzlich bietet künstliche Intelligenz (KI) aktuell vermehrt Möglichkeiten um beispielsweise durch Machine Learning (ML)-Modelle (Mosavi et al., 2018) traditionelle numerische Modell zu ergänzen oder zu ersetzen. In den meisten Fällen spielt die Kanalisation nur eine untergeordnete oder gar keine Rolle. Gerade bei städtischen Überschwemmungen hat die Kanalisation jedoch oft einen entscheidenden Einfluss auf die Überflutungssituation (Leitão et al., 2009). Aus diesem Grund ist die Kopplung mit dem 1D-Kanalnetzmodell für die Modellierung städtischer Überflutungen besonders wichtig.

Das in dieser Studie verwendete Modell: „Dynamic CA-ffé“ (Gholami Korzani & Deletic, 2023; Jamali et al., 2019) koppelt die Abflüsse der Oberfläche mit jenen des unterirdischen Kanalsystems und ermöglicht so einen Austausch zwischen Oberfläche und Kanalsystem in bestimmten Intervallen. Das Modell ermöglicht die Simulation von Überflutungsflächen auf einer stadtweiten Ebene in vergleichsweise kurzen Berechnungszeiten. Dies ermöglicht eine effiziente und hochauflösende Hochwasservorhersage und eröffnet weitere Möglichkeiten, wie die Simulation einer großen Anzahl von Szenarien in kurzer Zeit oder die Simulation in Echtzeit. Beides ist für das Hochwassermanagement und die Hochwasserprävention von großer Bedeutung. In der folgenden Studie sollen die Verlässlichkeit und Anwendbarkeit des Modells für Innsbruck untersucht werden.

## 2 Modell: Dynamic CA-ffé

Das dynamische CA-ffé-Modell (Gholami Korzani & Deletic, 2023) ist eine Erweiterung des ursprünglichen CA-ffé-Modells (Jamali et al., 2019) und ermöglicht die Interaktion zwischen Oberflächenabfluss und Kanalisationsabfluss. Es kombiniert ein 1D-Kanalnetzmodell in SWMM (Gironás et al., 2010; Rossman, 2015) mit einem CA-Oberflächenmodell. In der Realität führt ein Extremereignis dazu, dass Wasser aus der Kanalisation austritt, an der Oberfläche abläuft und durch einen anderen Schacht wieder eintritt. Um diesen Umstand abzubilden, verwendet das Modell daher eine CA-basierte 2D-Simulation für den stationären Oberflächenabfluss und koppelt diese mit dem dynamischen Abfluss des Kanalsystems. In regelmäßigen Abständen werden Daten zwischen der Oberfläche und dem Kanalnetz ausgetauscht, um eine Interaktion zwischen den beiden Strömen zu gewährleisten. Das Dynamische CA-ffé ermöglicht somit eine ständige Interaktion zwischen Oberfläche und Kanalisation. Dieser Zyklus wird wiederholt, wenn sich das Überflutungsmuster ändert, und in bestimmten Abständen mit SWMM synchronisiert. Der Vorteil dieses Ansatzes ist die schnelle Berechnungszeit und die kontinuierliche Synchronisation zwischen Oberfläche und Kanalnetz. Die Berechnung von Extremereignissen erfolgt innerhalb von Minuten und wenigen Stunden je nach Niederschlagsereignis. Dynamic CA-ffé wurde bisher nur an kleineren Einzugsgebieten in Australien getestet. Die Ausweitung auf eine ganze Stadt (rund 50 km<sup>2</sup>) ist vollkommen neu. Abbildung 1 zeigt eine exemplarische Übersichtskarte der Überflutungssimulation für das gesamte Einzugsgebiet (Innsbruck) unter Verwendung des Dynamic CA-ffé Ansatzes.

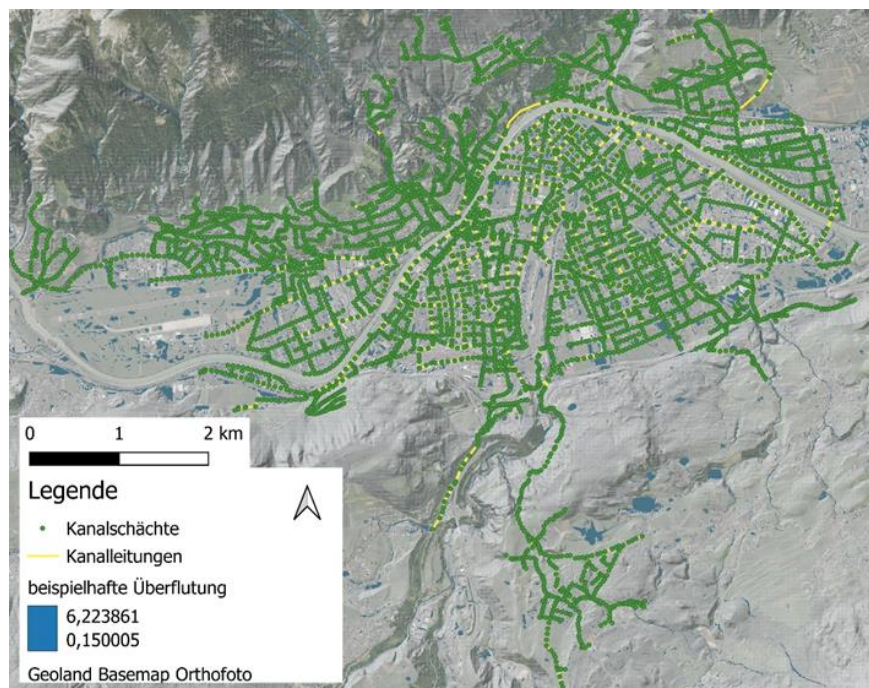


Abbildung 1: Übersichtskarte des Kanalnetzes und Digitalen Geländemodells inkl. einer beispielhaften Überflutungssimulation für Innsbruck in Dynamic CA-ffé.

### 3 Modellerstellung und -auswertungen

Das dynamische CA-ffé Modell (Gholami Korzani & Deletic, 2023) wird nun verwendet, um ein Modell der Stadt Innsbruck zu erstellen und zu testen. Zu diesem Zweck wurde zunächst ein 1D-SWMM-Modell (Gironás et al., 2010; Rossman, 2015) des Abwassersystems erstellt. Auf dieser Grundlage wird das dynamische CA-ffé-Modell aufgebaut. Dazu wird das 1D-SWMM-Modell mit einem Digitalen Geländemodell (DGM) gekoppelt und mit den Niederschlagsdaten der entsprechenden Messstelle beaufschlagt. Anschließend wird das Modell validiert und auf Plausibilität geprüft. Hierbei werden vergangene Ereignisse simuliert und mit Einsatzaufzeichnungen der Feuerwehr aus früheren Ereignissen verglichen. Die Auswertung umfasst sowohl die Trefferquote innerhalb der laut Einsatzdaten aufgezeichneten betroffenen Gebäude (unter Berücksichtigung jener Gebäude, bei denen innerhalb 5 m bzw. 10 m Umkreis Wasserstand >15cm berechnet wurde) als auch den Vergleich der aufgezeichneten Wasserstände laut Einsatzdokumentation im Vergleich zum mittleren berechneten Wasserstand im Umkreis von 5m um das jeweilige Gebäude. In den folgenden Kapiteln wird exemplarisch auf die Validierung anhand des Ereignisses am 19. Mai 2022 eingegangen. Analog dazu wurden auch die Ereignisse vom 17. Juli 2010 und 2. Juli 2016 analysiert.

Die Auswertung umfasst einerseits die Validierung mit Einsatzdokumentationen aus vergangenen Ereignissen und andererseits auch den Vergleich der Rechenzeiten für verschiedene Niederschlagsereignisse sowie den Unterschied in der medianen Wassertiefe, der Rechenzeit und der Trefferquote bei der Verwendung von Digitalen Geländemodellen (DGM) mit unterschiedlichen Rasterauflösungen (1 x 1 m und 5 x 5 m).

Das validierte Modell wird im Weiteren verwendet um sowohl vergangene (2010, 2016, 2022) als auch zukünftige Ereignisse zu berechnen und zu analysieren. Verglichen werden dabei Überflutungstiefe und medianer Wasserstand für die Perioden Vergangenheit (als Referenz), nahe Zukunft (2031-2060) und ferne Zukunft (2071-2100). Aufgrund der kurzen Rechenzeiten können viele verschiedene Klimaszenarien unterschiedlicher Jährlichkeiten und Dauerstufen simuliert werden. Die Eingabedaten für diese Simulationen stammen aus den bias-korrigierten Niederschlagsdaten des konvektionsauflösenden Modells CCLM-CPM (Rybka et al., 2022), das auf dem Szenario RCP8.5 basiert und eine hohe räumliche Auflösung von etwa 3 km sowie eine zeitliche Auflösung von einer Stunde für die Perioden 1971-2000, 2031-2060 und 2071-2100 aufweist. Um den Einfluss des Klimawandels zu quantifizieren, werden „Klimawandelfaktoren“ berechnet, indem extreme Niederschlagswerte auf Basis von Quantilen und Wiederkehrzeiten zwischen zukünftigen und historischen Szenarien verglichen werden. Diese Faktoren werden dann auf den Bemessungsregen (Euler II) angewendet, der aus den ehyd-Tabellen (Weilguni, 2022) berechnet wurde, um verschiedene Überflutungsszenarien für unterschiedliche Niederschlagsdauern und Wiederkehrzeiten zu erzeugen. Als Beispiel werden hier Niederschläge mit einer Wiederkehrzeit von 30 Jahren und einer Dauer von 180 Minuten dargestellt. Die berechneten „Klimawandelfaktoren“ für dieses Szenario betragen 1,222 für die nahe Zukunft (2031-2060) und 1,257 für die ferne Zukunft (2071-2100), was die prognostizierte Intensivierung extremer Niederschlagsereignisse im Rahmen des Szenarios RCP8.5 widerspiegelt.

## 4 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die Rechenzeiten für alle drei Ereignisse und die Validierung exemplarisch für das Ereignis am 19. Mai 2022 dargestellt.

### 4.1 Simulationsdauer

Die Modellierung der Stadt Innsbruck mit dem Modellansatz Dynamic CA-ffé hat gezeigt, dass es möglich ist, ein solches Modell auf Stadtebene aufzusetzen. Die Rechenzeiten (Tabelle 1) zeigen eine deutliche Reduzierung im Vergleich zur realen Niederschlagsdauer bei der Verwendung einer DGM-Auflösung von 5 x 5 m.

Tabelle 1: Simulationszeiten im Vergleich zum jeweiligen Niederschlagsereignis

| Ereignis | Niederschlagsdauer | Niederschlagssumme | Rechenzeiten |
|----------|--------------------|--------------------|--------------|
| 2022     | 4 h                | 30,9 mm            | 1 h 4 min    |
| 2016     | 11 h               | 11,8 mm            | 1 h 30 min   |
| 2010     | 14 h 30 min        | 52,6 mm            | 3 h 14 min   |

### 4.2 Validierung

Die Validierung umfasst neben der Modellvalidierung durch Einsatzdokumentationen der vergangenen Ereignisse auch den Vergleich von unterschiedlichen DGM-Auflösungen (1 m und 5 m Raster) und den Vergleich der Rechenzeiten. In den folgenden Kapiteln wird exemplarisch auf die Validierung anhand des Ereignisses am 19. Mai 2022 eingegangen, die Auswertungen für die Ereignisse im Juli 2010 und Juli 2016 werden nicht dargestellt.

#### 4.2.1 Validierung anhand der Einsatzdokumentationen

Wie in Abbildung 2 ersichtlich wurde die Validierung anhand der Feuerwehr-Einsatzdaten durchgeführt. Diese Daten wurden von der Leitstelle Tirol zur Verfügung gestellt und zeichnen alle relevanten Informationen samt Georeferenz zu jedem Einsatz auf. Für die Validierung wurden die Daten nach Einsätzen im Zusammenhang mit Wasserschäden oder Überflutungen gefiltert.



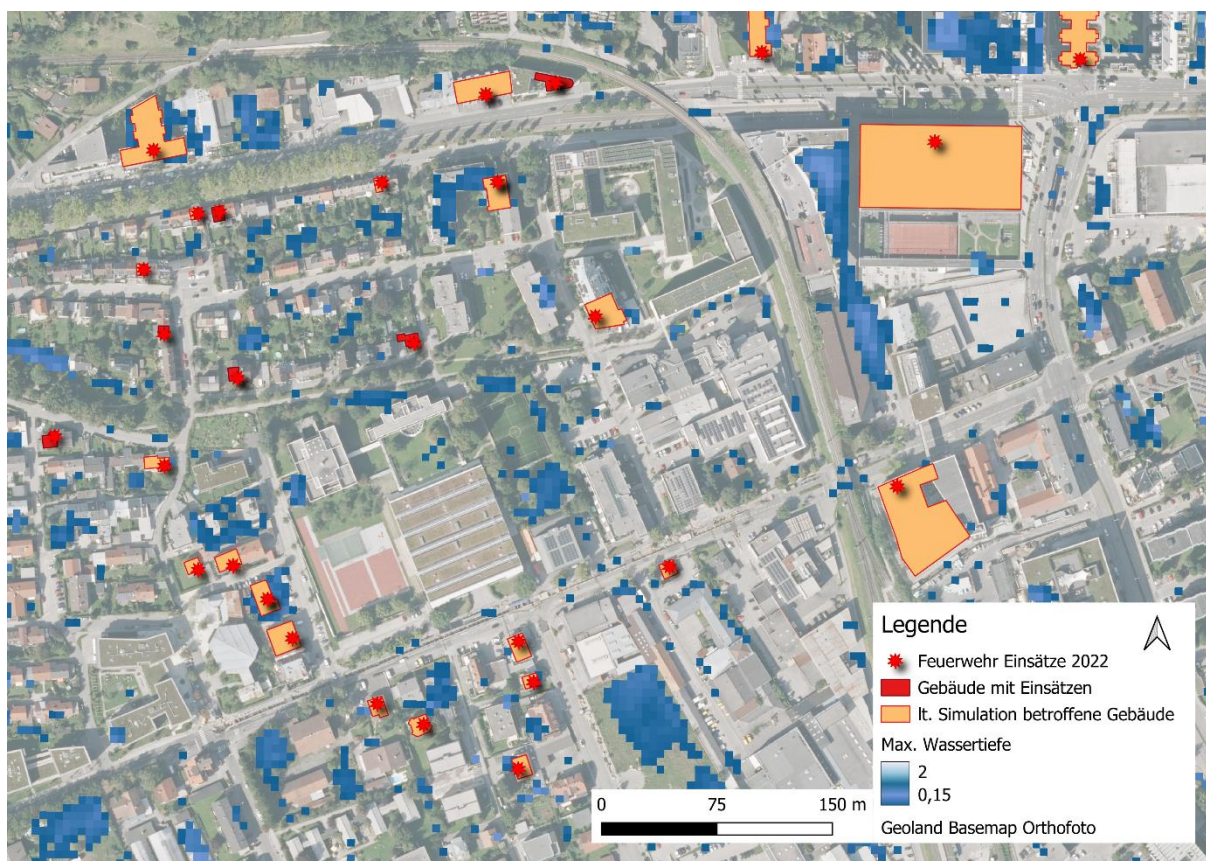


Abbildung 2: Beispiel der Überflutungssimulation 2022 inklusive der laut Feuerwehr-Einsatzdaten und Simulation betroffenen Gebäude.

Diese Daten lassen sowohl Rückschlüsse auf die betroffenen Gebäude als auch auf die Wasserstände in und um diese Gebäude zu. Viele Aufzeichnungen geben Hinweise auf die Wassertiefe, zumindest durch Angabe von „Wasserstand über/unter 50 cm“. Daher wurde in der Validierung folgende Parameter berücksichtigt:

- Trefferquote: Anzahl der Gebäude mit simuliertem Wasserstand über 15 cm im Umkreis von 5 m oder 10 m um die laut Einsatzdaten betroffenen Gebäude (Tabelle 2).

Tabelle 2: Trefferquote der Gebäude mit simulierten Wasserständen > 15 cm im Umkreis von 5 und 10 m.

|                    | Trefferquote (5 m) | Trefferquote (10 m) |
|--------------------|--------------------|---------------------|
| 2022 (DGM 5 x 5 m) | 64,1 %             | 74,4 %              |

- Wasserstände:
  - Vergleich der mittleren Wasserstände (im Umkreis von 5 m um die laut Einsatzdaten betroffenen Gebäude) mit den aufgezeichneten Informationen zu den Wasserständen. Von insgesamt 117 aufgezeichneten Einsätzen wiesen 98 in der Simulation einen höheren mittleren Wasserstand

auf als die Aufzeichnungen der Einsatzdokumentation. 19 hingegen zeigten einen geringeren Wasserstand als die Aufzeichnungen.

- Trefferquote der Gebäude, deren Wasserstände sowohl in Simulation als auch aufgezeichneten Einsatzdaten als „über/unter 50 cm“ angegeben werden. Vielfach geben die Einsatzaufzeichnungen nur Auskünfte über den Wasserstand mit „über/unter 50 cm“. Daher wurde auch ausgewertet in wie vielen Fällen diese Angabe mit dem mittleren umgebenden Wasserstand zusammenpasst. Für das Ereignis im Mai 2022 stimmen alle berechneten Wasserstände mit den Angaben „über/unter 50 cm“ zusammen.

#### 4.2.2 Auswertung unterschiedlicher DGM-Auflösungen

Die Verwendung eines 1x1m Rasters verbessert die Qualität der Ergebnisse, erfordert aber deutlich höhere Simulationszeiten. Die Trefferquote innerhalb der aufgezeichneten Feuerwehr-Einsatzdaten verbessert sich zunehmend im Vergleich zwischen dem mittleren umgebenden simulierten Wasserstand (im Umkreis von 5 m oder 10 m) und den aufgezeichneten Wasserständen bei Verwendung des 1 x 1 m-Rasters. Die medianen Wassertiefen wiederum zeigen relativ ähnliche Ergebnisse für beide Auflösungen. Allerdings erhöht sich die Berechnungsdauer des 1 x 1 m-Rasters um ein Vielfaches im Vergleich zum 5 x 5 m-Raster. In Tabelle 3 werden exemplarisch wieder nur die Auswertungen für das Ereignis 2022 dargestellt.

Tabelle 3: Vergleich zwischen 1 x 1 m und 5 x 5 m DGM-Auflösung.

| DGM Auflösung | Rechenzeit  | Median Wassertiefe (m) | Trefferquote (5 m) (%) | Trefferquote (10 m) (%) |
|---------------|-------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 5 x 5 m       | 1 h 4 min   | 0,0401                 | 64,1                   | 74,4                    |
| 1 x 1 m       | 12 h 29 min | 0,0423                 | 83,8                   | 91,5                    |

#### 4.3 Klimaszenarien

Die Auswertung der Klimaszenarien wird hier exemplarisch anhand des Euler-II-Regens für eine Jährlichkeit von 30 Jahren und eine Dauer von 180min verdeutlicht. Die Zukunftsperioden wurden dabei mit den Faktoren 1,222 (nahe Zukunft) und 1,257 (ferne Zukunft) beaufschlagt. Die Ergebnisse (Tabelle 4) zeigen ein erhöhtes Überflutungsvolumen sowie auch einen höheren Median der Wassertiefe für beide zukünftige Szenarien im Vergleich zur Vergangenheit.

Tabelle 4: Vergleich der Überflutungstiefen und median Wassertiefen für die Gegenwart, nahe und ferne Zukunft.

|                           | Überflutungsvolumen (m <sup>3</sup> ) | Median Wassertiefe (m) |
|---------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Vergangenheit (Referenz)  | 298 450                               | 0,0486                 |
| Nahe Zukunft (2031-2060)  | 318 706                               | 0,0512                 |
| Ferne Zukunft (2071-2100) | 321 673                               | 0,0516                 |

## 5 Schlussfolgerung und Ausblick

Das Modell ermöglicht eine stadtweite Simulation des Überflutungsgeschehens innerhalb kurzer Berechnungszeiten (zumindest bei Verwendung einer 5 x 5m DGM-Auflösung). Die Ergebnisse zeigen eine gute Deckung mit den Einsatzaufzeichnungen, auch wenn in der Trefferquote nicht 100 % der aufgezeichneten Feuerwehreinsätze getroffen werden. Dies kann unter anderem auch daran liegen, dass derzeit nur ein Regenschreiber im Modell verwendet wird und es daher zu Abweichungen mit dem realen Niederschlagsverhalten kommt. Die Einbindung mehrerer Regenschreiber würde die Qualität der Ergebnisse vermutlich stark verbessern. Es muss auch bedacht werden, dass bei einem solchen Ansatz nur jene Gebäude als betroffen gekennzeichnet sind, an denen auch Feuerwehreinsätze stattfanden. Es ist aber durchaus der Fall, dass es auch Gebäude gibt, die betroffen waren, aber nicht gemeldet wurden bzw. oder bei denen ein Handeln der Feuerwehr nicht erforderlich war. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass eine Verbesserung in der Simulation auch auftritt, wenn eine höhere DGM-Auflösung (1 x 1 m statt 5 x 5 m) gewählt wird. Dies wiederum wirkt sich allerdings negativ auf die Berechnungsdauer aus. Die Simulationen für zukünftige Szenarien unter Klimawandelbedingungen zeigen einen klaren Trend: sowohl Überflutungstiefe als auch -volumen nehmen in Zukunft weiter zu.

Im Weiteren soll das Modell nun weiter angepasst und verbessert werden. Dazu sollen beispielsweise mehrere Regenschreiber integriert werden und die Berechnungsdauer weiter verbessert werden, um auch die 1 x 1 m DGM-Auflösung anwendbar zu machen. Idealerweise kann das Modell in Zukunft dann auch für Echtzeitprognosen verwendet werden und liefert so wichtige Erkenntnisse kurz vor und während des Ereignisses. Die Ergebnisse stellen damit nicht nur einen wichtigen Fortschritt in der Hochwassermodellierung dar, sondern haben auch praktische Anwendungen in der städtischen Hochwasserprävention und dem Starkregenmanagement, sowie als Hilfestellung für Einsatzkräfte wie die Feuerwehr.



## 6 Danksagung

Die Autoren danken den Innsbrucker Kommunalbetrieben (IKB) für die Bereitstellung der erforderlichen Daten des Kanalnetzes von Innsbruck und Antonia Herzog für die Erstellung des 1D-SWMM-Modells. Diese Arbeit wird gefördert durch das Early Stage Funding „FFMFF – Fast flood modelling for firefighters“ von November 2023 bis Oktober 2024 und ist Teil des Projekts BlueGreenCities (Projektnummer KR21KB0K00001), das vom österreichischen Klima- und Energiefonds von Oktober 2022 bis September 2025 gefördert wird. Die hier vorgestellten Berechnungsergebnisse wurden mit Hilfe der LEO HPC-Infrastruktur der Universität Innsbruck generiert.

## 7 Literatur

- Bates, P. D., Horritt, M. S. & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387 (1), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>.
- Berndtsson, R., Becker, P., Persson, A., Aspegren, H., Haghighatafshar, S., Jönsson, K. et al. (2019). Drivers of changing urban flood risk: A framework for action. *Journal of Environmental Management*, 240, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.094>.
- Bulti, D. T. & Abebe, B. G. (2020). A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6 (3), 1293–1302. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00803-z>.
- Gholami Korzani, M. & Deletic, A. (2023). Dynamic CA-ffé: a hybrid 1D/2D fast flood evaluation model for urban floods. Gehalten auf der Hydrology and Water Resources Symposium, Sydney.
- Gironás, J., Roesner, L., Rossman, L. & Davis, J. (2010). A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM). *Environmental Modelling & Software*, 25, 813–814. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.11.009>.
- Guidolin, M., Chen, A. S., Ghimire, B., Keedwell, E. C., Djordjević, S. & Savić, D. A. (2016). A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis. *Environmental Modelling & Software*, 84, 378–394. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.008>.
- Jamali, B., Bach, P. M., Cunningham, L. & Deletic, A. (2019). A Cellular Automata Fast Flood Evaluation (CA-ffé) Model. *Water Resources Research*, 55 (6), 4936–4953. <https://doi.org/10.1029/2018WR023679>.
- Leitão, J. P., Boonya-aroonnet, S., Prodanović, D. & Maksimović, Č. (2009). The influence of digital elevation model resolution on overland flow networks for modelling urban pluvial flooding. *Water Science and Technology*, 60 (12), 3137–3149. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.754>.

- Mosavi, A., Ozturk, P. & Chau, K. (2018). Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review. *Water*, 10 (11), 1536. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/w10111536>.
- O'Donnell, E. & Thorne, C. (2020). Drivers of future urban flood risk. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378, <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0216>.
- Razavi, S., Tolson, B. & Burn, D. (2012). Review of surrogate modeling in water resources. *Water Resources Research*, 48, 7401. <https://doi.org/10.1029/2011WR011527>.
- Rossman, L. A. (2015). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1; Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-05/040, 2004. *Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-05/040, 2004*. Verfügbar unter: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100ERK4.txt> (Letzter Zugriff am 15.09.2024).
- Rybka, H., Haller, M., Brien, S., Brauch, J., Früh, B., Junghänel, T. et al. (2022). Convection-permitting climate simulations with COSMO-CLM for Germany: Analysis of present and future daily and sub-daily extreme precipitation. *Meteorologische Zeitschrift*, 32. <https://doi.org/10.1127/metz/2022/1147>.
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D. & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>.
- Weilguni, V. (2022). eHYD – Fachkarte: Bemessungsniederschlag 2020, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, [https://ehyd.gv.at/assets/eHYD/pdf/Bemessungsniederschlag\\_2020.pdf](https://ehyd.gv.at/assets/eHYD/pdf/Bemessungsniederschlag_2020.pdf) (Letzter Zugriff am 15.09.2024).

**Korrespondenz an:**

Name: Martina Hauser  
Adresse: Universität Innsbruck, AB Umwelttechnik  
Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck  
Tel: +43 512 507 62103  
E-Mail: [Martina.Hauser@uibk.ac.at](mailto:Martina.Hauser@uibk.ac.at)