

Die Zukunft des urbanen Entwässerungsmanagements: Auswirkungen von Klimawandel- und Stadtentwicklungsszenarien

M. Hauser^{*1}, J. Kelvin² & M. Kleidorfer¹

¹ Universität Innsbruck Arbeitsbereich Umwelttechnik, Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck, Österreich

² hydro & meteo GmbH, Breite Straße 6-8, 23552 Lübeck, Deutschland

Kurzfassung: Aufgrund des Klimawandels stellen zukünftig häufigere und intensivere Starkregenereignisse die urbanen Entwässerungssysteme vor große Herausforderungen, was oft zu einer Überlastung, erhöhten Mischwasser-Entlastungsraten und teils großen Überflutungen führt. Bei städtischen Überflutungen haben Entwässerungssysteme einen entscheidenden Einfluss auf die Überflutungssituation. Diese Studie analysiert diese Herausforderungen durch den Vergleich von drei komplementären Modellansätzen (konzeptionell, 1D-hydrodynamisch, gekoppelt 1D/2D) am Fallbeispiel Innsbruck. Untersucht werden Stadtentwicklungsszenarien wie Versiegelung und Flächenentkoppelungsmaßnahmen (z.B. durch dezentrale Anlagen und blau-grüne Infrastrukturen) sowie die zukünftigen Anforderungen an urbane Entwässerungssysteme unter Berücksichtigung des Klimawandels. Die Ergebnisse zeigen einen zukünftigen Anstieg an Mischwasserentlastungen, Überstauvolumen und Anzahl der überstauenden Schächte, sowie an Überflutungsfläche. Die Entkoppelung von Flächen hingegen führt zu einer Reduktion derselben Parameter. Die Studie liefert somit eine quantitative, modellbasierte Evidenz für den dringenden Bedarf an Anpassungsstrategien für urbane Entwässerungssysteme und demonstriert das Potenzial von Entkoppelungsmaßnahmen als effektive Anpassungsstrategie der Entwässerungssysteme an die (untersuchten) zukünftigen Szenarien.

Key-Words: Mischwasserentlastung, Überflutung, Überstau, Klimawandel, Stadtentwicklung, Modellierung

1 Einleitung

Aufgrund des Klimawandels wird erwartet, dass Starkregenereignisse in Zukunft häufiger und intensiver auftreten (Berndtsson et al. 2019; O'Donnell/Thorne 2020). Diese klimawandelbedingte Veränderung in den Niederschlagsmustern führt auch zu neuen Herausforderungen für städtische Entwässerungssysteme (Zhou 2014). Einerseits resultieren häufigere bzw. stärkere Starkregenereignisse in einer erhöhten

Beanspruchung an das Kanalnetz, was zu überasteten Systemen führen kann, welche andererseits, besonders in städtischen Gebieten, oft zu Überflutungen mit erheblichen Schadensfolgen führen können. Gerade bei städtischen Überschwemmungen haben die Entwässerungssysteme daher oft einen entscheidenden Einfluss auf die Überflutungssituation (Leitão et al. 2009). Stadtentwicklungen, die zu erhöhten angeschlossenen Flächen führen, wie z.B. bei Urbanisierung oder Versiegelung von Flächen, verstärken die Belastung auf die urbane Entwässerung zusätzlich. Als Gegenmaßnahme haben sich Strategien wie die Entkoppelung von angeschlossenen, versiegelten Flächen oder der Einsatz von blau-grünen Infrastrukturen bereits erfolgreich bewährt (Rauch et al. 2017; Torgersen et al. 2014; Zhang et al. 2017). Die dezentrale Behandlung von Niederschlagswasser reduziert den Druck auf das Kanalsystem. Der Einsatz von blau-grünen Infrastrukturen bietet zusätzlich auch multiple Benefits, wie beispielsweise Kühleffekte, verbessertes Stadtklima, Biodiversität oder ästhetische Aspekte (Quaranta et al. 2022).

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss von zukünftigen Niederschlagsmustern und die Auswirkungen von Flächenreduktion (beispielsweise durch dezentrale Anlagen oder blau-grüne Infrastrukturen) bzw. Flächenzunahme (z.B. durch Versiegelung), sowohl auf das Entwässerungssystem als auch mittels oberflächlicher Überflutungsbewertung betrachtet. Anhand drei unterschiedlicher Modellansätze (konzeptionelle, 1D hydrodynamische und gekoppelte 1D/2D Modellierung) werden folgende Parameter analysiert: Anzahl der Mischwasserentlastungen, Entlastungsvolumen, Überstauvolumen, Anzahl der überstauenden Schächte und die überflutete Fläche an der Oberfläche.

2 Methodik

2.1 Modelle

Um die vielschichtigen Auswirkungen von Klima- und Stadtentwicklungswandel umfassend zu bewerten, wurde ein komplementärer Multi-Modell-Ansatz für die Fallstudie Innsbruck gewählt. Dieser Ansatz kombiniert die Stärken eines konzeptionellen Langzeitmodells, eines detaillierten hydrodynamischen 1D-Netzmodells und eines gekoppelten 1D/2D-Überflutungsmodells. Jedes Modell beleuchtet spezifische Systemgrößen (Mischwasserentlastung, Überstau, Überflutung) und ermöglicht so eine ganzheitliche Analyse, die mit einem einzelnen Modell nicht möglich wäre. Für die Untersuchungen werden drei verschiedene Modelle der Stadt Innsbruck verwendet:

- **Konzeptionelles Modell:** KAREN (Rauch/Kinzel 2007)
- **1D hydrodynamisches Modell:** SWMM (StormWater Management Model) (Rossman 2015; James et al. 2012)
- **Gekoppeltes 1D/2D Modell:** Dynamic CA-ffé (Gholami Korzani/Deletic 2023) - Ein schnelles 2D Überflutungsmodell auf zellulärer-Automaten-Basis gekoppelt mit einem 1D SWMM Kanalnetzmodell

Tabelle 1 zeigt die unterschiedlichen Modelle und deren Anwendung.

Tabelle 1: Modelle und deren Anwendung in Bezug auf Zielgröße, Modellart, analysierte Parameter und zeitliche Skala.

	Konzeptionelles Modell	1D hydrodynamisches Modell	Gekoppeltes 1D/2D Modell
Zielgröße	Mischwasser-entlastungen	Überstau	Überflutung
Modellbez.	KAREN	SWMM	Dyn. CA-ffé
Analysierte Parameter	› Entlastungsvolumen › Anzahl der Entlastungen	› Überstauvolumen › Anzahl der überstauenden Schächte	› Überflutungsflächen an der Oberfläche
Zeitliche Skala	Langzeitevaluierung (30 Jahre Perioden)	Ereignisbasiert (Bemessungsregen)	Ereignisbasiert (Bemessungsregen)

KAREN ist ein konzeptionelles Modell der Firma HydroIT (Rauch/Kinzel 2007) zur Kanalnetzmodellierung von Mischsystemen. Es ermöglicht die schnelle Simulation von Mischwasserentlastungen auf Einzugsgebietsebene. Die Simulation fokussiert sich auf Langzeitberechnungen (min. 10 Jahre) und dauert meist nur wenige Sekunden.

Das Stormwater Management Model (EPA SWMM) (James et al. 2012; Rossman 2015) ist ein hydrodynamisches 1D-Modell zur Simulation des Abfluss- und Überstauverhaltens im Kanalnetz. Es ist wesentlich detaillierter und damit auch rechenintensiver als ein konzeptionelles Modell, ermöglicht dadurch aber die detaillierte Betrachtung einzelner Haltungen oder Knoten. Die Simulation erfolgt hier eventbasiert bzw. über Bemessungsniederschlag.

Dynamic Ca-ffé wurde ursprünglich von (Jamali et al. 2019) entwickelt und von (Gholami Korzani/Deletic 2023) und dem Arbeitsbereich Umwelttechnik an der Universität Innsbruck weiterentwickelt. Die Simulation koppelt ein 1D-Kanalnetzmodell (SWMM) mit einer Oberflächensimulation auf zellulärer Automaten Basis. Die Ergebnisse der Simulation fokussieren sich auf die Überflutungsfläche und -tiefe an der Oberfläche, sowie die Kanalnetzsimulation. Im hier verwendeten Ansatz wird der Niederschlag über die im SWMM-Modell angeschlossenen Flächen generiert und das überstauende Volumen an den Knoten auf der Oberfläche verteilt. Die Oberfläche selbst wird über ein digitales Geländemodell mit der Auflösung 1x1m dargestellt. Die Simulation erfolgt auch hier eventbasiert bzw. über Bemessungsniederschlag.

2.2 Szenarien

Die drei genannten Modelle werden verwendet, um unterschiedliche Klimawandel- und Stadtentwicklungsszenarien auszuwerten.

2.2.1 Klimawandelszenarien

Die Klimawandelszenarien umfassen die Perioden: 1971-2000 (Vergangenheit), 2031-2060 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft). Die zugrunde liegenden Daten haben eine zeitliche Auflösung von einer Stunde sowie eine räumliche Auflösung von 3x3 km und basieren auf dem RCP 8.5-Szenario. Die Daten stammen aus einem konvektionsauflösenden Klimamodell (Rybka et al. 2022), welches zusätzlich mittels einer 20-jährigen Niederschlagsdatenreihe (Messstation Innsbruck Flughafen 2000-2019) Bias-korrigiert wurde. Für die Simulationen im konzeptionellen Modell (KAREN) werden die vollen 30 Jahres-Serien in stündlicher Auflösung verwendet. Die beiden anderen Modelltypen (SWMM Modell und Dynamic CA-ffe Modell) hingegen verwenden einzelne Bemessungsregen für die Simulation. Die Bemessungsregen wurden anhand der ehyd-Bemessungstabellen (<https://ehyd.gv.at/>) definiert und mit eigens ausgewerteten Klimawandelfaktoren skaliert. Analysiert werden die Jährlichkeiten 1, 2, 5, 10, 30, 50, 75 und 100 mit der Dauerstufe 180 min.

2.2.2 Stadtentwicklungsszenarien

Die Untersuchungen der Stadtentwicklungsszenarien befasst sich mit der Zunahme und Reduktion der an das Entwässerungssystem angeschlossenen Flächen. Dabei werden die angeschlossenen, undurchlässigen Flächen pauschal um 10, 20 und 30% erhöht bzw. reduziert. Im konzeptionellen Modell (KAREN) bezieht sich dieser Prozentsatz jeweils auf die gesamte undurchlässige Fläche pro Einzugsgebiet und in den beiden anderen Modellen (SWMM und Dynamic Ca-ffé Modell) auf alle versiegelten Dach- und Straßenflächen. Zusätzlich werden die Auswirkungen einer fiktiven Implementierung von blau-grünen Infrastrukturen analysiert, indem im SWMM Modell einerseits nur Straßenflächen und andererseits nur Dachflächen um dieselben Prozentsätze verringert werden. Diese differenzierte Betrachtung von Dach- und Straßenflächen dient dazu, vereinfacht das unterschiedliche Potenzial dieser Flächenkategorien für Entkoppelungsmaßnahmen zu analysieren.

3 Ergebnisse

Aufbauend auf den beiden Szenarioanalysen werden, je nach verwendetem Modell, die betreffenden Parameter analysiert und interpretiert.

3.1.1 Klimawandelszenarien

Konzeptionelles Modell

Die Analyse mittels KAREN Modell wird in (Hauser et al. 2025) ausführlicher beschrieben und zeigt einen deutlichen Anstieg in der mittleren Anzahl der Mischwasserentlastungen und im mittleren Entlastungsvolumen von 275,3 mm/a (1971-2000) auf 319,7 mm/a (2031-2060) und weiter auf 359,5 mm/a (2071-2100). Beide Parameter sind gemittelte Durchschnittswerte über die gesamten 30 Jahre.

1D hydrodynamisches Modell

Im SWMM zeigt sich ebenfalls ein deutlicher Anstieg in den zukünftigen Perioden (im Vergleich zur Vergangenheit). Hier wurden die Bemessungsereignisse analysiert. Abbildung 1 zeigt die Anzahl der überstauenden Schächte für die 3 Zeiträume und die unterschiedlichen Jährlichkeiten. Mit Anstieg der Jährlichkeiten steigt das Überstauvolumen (hier nicht dargestellt) und die Anzahl der überstauenden Schächte.

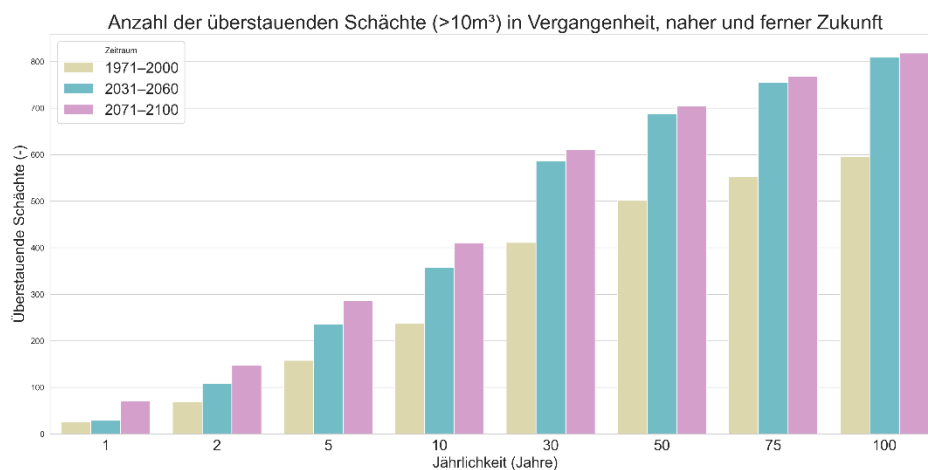


Abbildung 1: Anzahl der überstauenden Schächte im SWMM Modell für die drei Perioden für die Jährlichkeiten 1, 2, 5, 10, 30, 50, 75 und 100 bei Dauerstufe 180 min.

Gekoppeltes 1D/2D Modell

Im Dynamic CA-ffé Modell zeigt sich derselbe Trend (Abbildung 2): die Überflutungsfläche an der Oberfläche nimmt in Zukunft und mit ansteigender Jährlichkeit zu. Zusätzlich zeigt sich ein größerer Einfluss bei höheren Jährlichkeiten und ein deutlicher Sprung zwischen Vergangenheit und den beiden Zukunftsperioden.

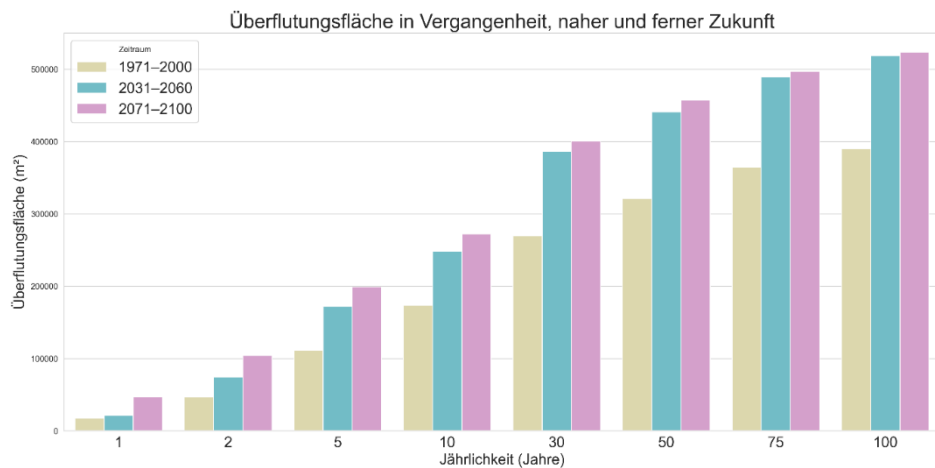


Abbildung 2: Überflutete Fläche im Dynamic Ca-ffé Modell für die drei Perioden für die Jährlichkeiten 1, 2, 5, 10, 30, 50, 75 und 100 bei Dauerstufe 180 min.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Überflutungsflächen in Dynamic Ca-ffé bei Jährlichkeit 50 und Dauerstufe 180 min. Auf Stadtgebietsebene lassen sich die geringfügigen Abweichungen zwischen der nahen und fernen Zukunft nur schwer erkennen. Im Vergleich zwischen Vergangenheit und den beiden Zukunftsszenarien lassen sich deutlichere Unterschiede erkennen. Im Detailausschnitt werden diese Unterschiede noch klarer. Auch in den Überflutungstiefen (siehe Legende) wird eine Erhöhung des maximalen Wasserstands in den Zukunftsperioden ersichtlich.

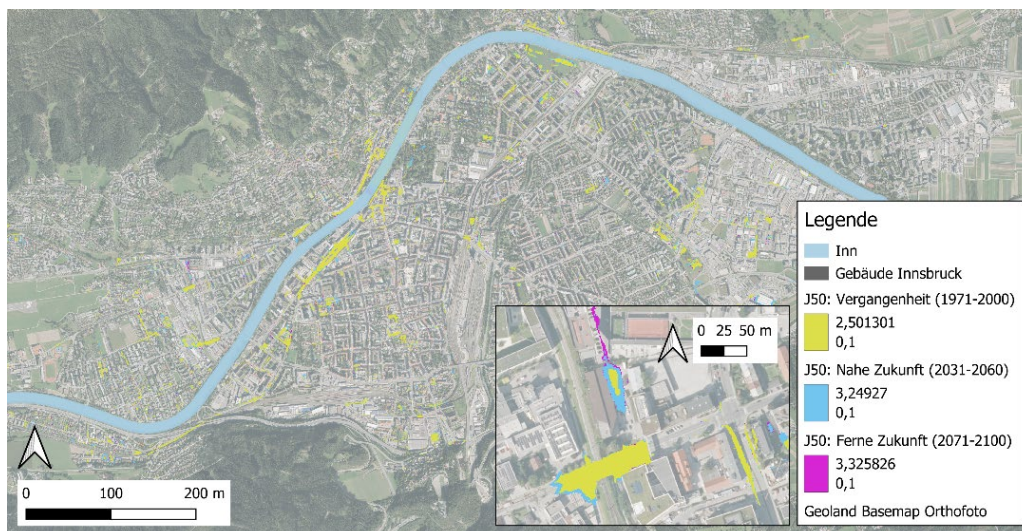


Abbildung 3: Grafische Darstellung der überfluteten Fläche (Wassertiefe > 0,1m) im Dynamic Ca-ffé Modell für die drei Perioden für die Jährlichkeit 50 bei Dauerstufe 180 min.

Modellvergleich

Im Vergleich der unterschiedlichen Modelle und der Veränderung der Analyseparameter (Abbildung 4) in Bezug zur Referenzperiode 1971-2000 wird

ersichtlich, dass die Parameter je nach Jährlichkeit unterschiedlich stark reagieren. Bei beiden Jährlichkeiten (J5 und J50) verändert sich das Überstauvolumen in der 1D hydrodynamischen Modellierung (SWMM) und die Überflutungsfläche in der gekoppelten 1D/2D Modellierung (Dyn. Ca-ffé) am stärksten, wohingegen das Entlastungsvolumen in der konzeptionellen Modellierung (KAREN) die geringste Veränderung zur Ausgangsperiode zeigt.

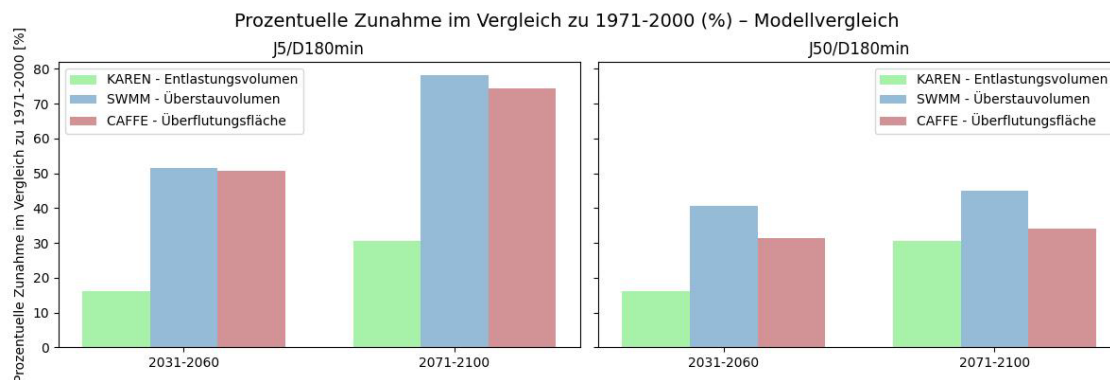


Abbildung 4: Vergleich der prozentuellen Zunahme der analysierten Parameter in den drei Modellen im Vergleich zur Vergangenheit für die Jährlichkeit 50 bei Dauerstufe 180 min.

3.1.2 Stadtentwicklungsszenarien

Konzeptionelles Modell

In Anbetracht der Städteentwicklung zeigt sich laut Hauser et al. (2025) für die Mischwasserentlastungen eine deutliche Zunahme mit der Zunahme an angeschlossenen Flächen und im Umkehrschluss eine Abnahme der Entlastungen durch Entkoppelungsmaßnahmen. Dieser Trend zeigt sich auch in den zukünftigen Perioden und wird durch den Klimawandel noch verstärkt. Demnach müsste man in der nahen Zukunft (2031-2060) rund 16,2% und in der fernen Zukunft (2071-2100) rund 27,1% entkoppeln, um das ursprüngliche Entlastungsvolumen der Vergangenheit (1971-2000) zu erreichen. (Hauser et al. 2025)

1D hydrodynamisches Modell

Die Auswertung des Überstauvolumens auf Basis der Bemessungsregen (Jährlichkeit 1, 2, 5, 10, 30, 50, 75 und 100 mit Dauerstufe 180 min) für die drei Perioden (Vergangenheit, nahe und ferne Zukunft) zeigt ebenfalls einen deutlichen Anstieg des Überstauvolumens und der überstauenden Schächte in der Zukunft und mit steigender Entkoppelung. Es wird deutlich, dass die Entkoppelung von Dachflächen eine signifikant stärkere Reduktion des Überstauvolumens bewirkt als die von Straßenflächen. Beispielsweise reduziert eine 30%ige Entkoppelung der Dachflächen in der Periode 1971-2000 das Überstauvolumen um ca. 22 %, während die Entkoppelung von Straßenflächen nur eine Reduktion von ca. 14 % erreicht. Dies liegt daran, dass im Modell mehr Dach- als Straßenflächen vorhanden sind. Für die

Fallstudie Innsbruck bedeutet dies, dass die gezielte Entkoppelung von Dachflächen und deren Umwandlung in blau-grüne Infrastrukturen das größere Potenzial zur Reduzierung des Überstauvolumens im Kanalnetz bietet.

Flächenzunahme durch Versiegelung, wirkt sich gegenteilig zur Entkoppelung aus. Eine Zunahme von 10, 20 und 30% zeigt deutliche Erhöhungen im Überstauvolumen und in der Anzahl der überstauenden Knoten ($>10 \text{ m}^3$).

Gekoppeltes 1D/2D Modell

In der Untersuchung der Überflutungsflächen zeigen sich deutliche Verbesserungen durch die Abkoppelungsszenarien. Je mehr versiegelte Fläche abgekoppelt wird umso mehr reduziert sich die Überflutungsfläche. Gegenteilig dazu zeigt sich eine Zunahme der Überflutungsfläche bei einem erhöhten Versiegelungsgrad.

Modellvergleich

Um den Einfluss der Reduktion der angeschlossenen versiegelten Flächen in den unterschiedlichen Modellansätzen zu untersuchen wurde analysiert wie sich eine Reduktion der Flächen auf die unterschiedlichen Parameter der Modellarten im Vergleich zur Ausgangssituation ohne Entkoppelung in den jeweiligen Klimaperioden auswirkt. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für eine 30-prozentige Entkoppelung und die Bemessungsregen mit Jährlichkeit 5 und 50 (Dauerstufe 180min). Hier wird klar, dass sich für beide Jährlichkeiten die größten Veränderungen in der Überflutungsfläche (in der Simulation mit der gekoppelten 1D/2D Modellierung in Dynamic CA-ffé) zeigen. Auch die Entlastungsvolumina aus der konzeptionellen Modellierung (KAREN) ändern sich deutlich. Die Veränderungen des Überstauvolumens aus der 1D hydrodynamischen Modellierung (SWMM) fallen vergleichsweise gering aus, liegen aber trotzdem zwischen 12,9 und 18,7%.

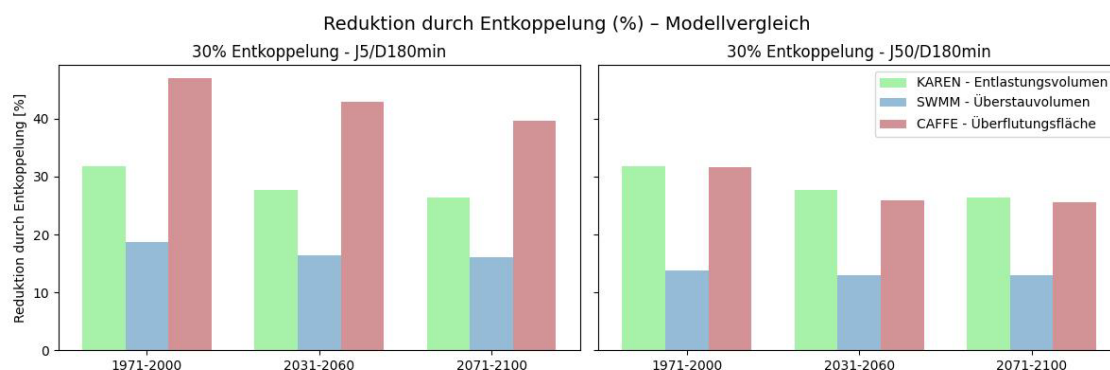


Abbildung 5: Auswirkungen der 30-prozentigen Entkoppelung in den drei Modellansätzen. Unterschied von Mischwasserentlastungsvolumen, Überstauvolumen und Überflutungsfläche, für die Vergangenheit, nahe und ferne Zukunft für die Jährlichkeit 50 bei Dauerstufe 180 min.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchung der zukünftigen Auswirkungen von Klimawandel- und Stadtentwicklungsszenarien auf urbane Entwässerungssysteme zeigt eindeutige Trends in allen drei Modellen. Das konzeptionelle Modell (KAREN) zeigt steigende Mischwasserentlastungen, sowohl in Anzahl als auch im Volumen in der Zukunft. Das 1D hydrodynamische Modell (SWMM) simuliert ebenfalls steigende Überstauvolumen und eine zunehmende Anzahl an überstauenden Schächten für die nahe und ferne Zukunft und auch die gekoppelte 1D/2D Modellierung (Dynamic Ca-ffé) verzeichnet steigende Überflutungsflächen in den Perioden 2031-2060 und 2071-2100. Es hat sich gezeigt, dass die Reduktion der angeschlossenen, versiegelten Flächen auch zu einer Verbesserung in Bezug auf Entlastungen, Überstau und Überflutung führt. Gegenteilig dazu wirkt sich eine Zunahme dieser Flächen (z.B. durch Versiegelung) nachteilig aus und erhöht die betrachteten Parameter in allen 3 Modellen. Weiters wurde ersichtlich, dass für die betrachtete Fallstudie Innsbruck eine Reduktion der Dachflächen zu geringfügig größeren Verbesserungen führt als die der Straßenflächen, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass es im Modell mehr Dachflächen gibt, die abgekoppelt werden könnten. In Realität wurden allerdings bereits viele Dachflächen entkoppelt, welche im Modell noch ins Netz einleiten, wodurch in Realität eine Abkoppelung der Straßenflächen ebenso als sinnvoll erachtet wird. Im Vergleich der drei Modelle zeigt die prozentuelle Veränderung, dass in der nahen und fernen Zukunft die Überstauvolumen und die Überflutungsflächen am stärksten auf die veränderten Niederschlagsmuster reagieren. Ebenso zeigen die Mischwasserentlastungen eine Zunahme in der Zukunft, wenngleich geringer als die beiden anderen Parameter. In Bezug auf die Entkoppelungsszenarien verzeichnet die Überflutungsfläche die größten Veränderungen, wobei auch hier die Entlastungsvolumina und Überstauvolumina mit der Reduktion der angeschlossenen Flächen abnehmen.

Zusammenfassend belegt die Studie, dass in den zukünftigen Perioden sowohl durch Klimawandel als auch Flächenzunahme deutliche Herausforderungen auf urbane Entwässerungssysteme zukommen. Sie untermauert somit die Notwendigkeit eines dringenden Bedarfs an adequaten Anpassungsstrategien. Die Entkoppelung von angeschlossenen, versiegelten Flächen, beispielsweise durch Entkoppelung vom Kanalnetz oder blau-grüne Infrastrukturen, erweist sich als effektive Anpassungsstrategie mit einer positiven Wirkung auf alle betrachteten Parameter und sollte daher priorisiert werden.

Trotz des robusten Multi-Modell-Ansatzes unterliegt diese Studie Limitationen. Die Stadtentwicklungsszenarien basieren auf pauschalen prozentualen Änderungen, während reale Entwicklungen räumlich heterogener sind. Zukünftige Forschung sollte daher räumlich explizite Stadtentwicklungsmodelle integrieren. Des Weiteren wurde nur das RCP 8.5-Szenario betrachtet; eine Analyse weiterer Szenarien könnte die Bandbreite möglicher Zukünfte besser abbilden. Eine ökonomische Analyse könnte

zudem die Grundlage für eine kosten-effektive Priorisierung der hier untersuchten Anpassungsmaßnahmen schaffen.

5 Danksagung

Die Autoren danken den Innsbrucker Kommunalbetrieben (IKB) für die Bereitstellung der erforderlichen Daten des Kanalnetzes von Innsbruck. Diese Arbeit wird gefördert durch die IKB Forschungsförderung (Projekt: futuremode(I)- Conceptional and hydrodynamic modelling of the sewer system of Innsbruck under future climate change conditions) von Jänner 2024 bis August 2025 und ist Teil des Projekts BlueGreenCities (Projektnummer KR21KB0K00001), das vom österreichischen Klima- und Energiefonds von Oktober 2022 bis September 2025 gefördert wird.

6 Literatur

- 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. In: Journal of Environmental Management, 2019, 240, S. 47–56.
- 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.
- Hauser, M., Back, Y., Rauch, W., Kleidorfer, M. (2025): Assessing combined sewer overflow performance under climate projections and urban development with respect to the European Urban Wastewater Treatment Directive and Austrian regulations, In: Journal of Hydrology, UNDER REVIEW, 2025.
- Jamali, B., Bach, P. M., Cunningham, L., Deletic, A. (2019): A Cellular Automata Fast Flood Evaluation (CA-ffé) Model. In: Water Resources Research, 2019, 55 (6), S. 4936–4953.
- James, R., Finney, K., Perera, N., James, B., Peyron, N. (2012): SWMM5/PCSWMM Integrated 1D-2D Modeling, 2012.
- 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. In: Water Science and Technology, 2009, 60 (12), S. 3137–3149.
- O'Donnell, E., Thorne, C. (2020): Drivers of future urban flood risk. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2020, 378, S. 2019.0216.
- Quaranta, E., Fuchs, S., Liefting, H. J., Schellart, A., Pistocchi, A. (2022): Costs and benefits of combined sewer overflow management strategies at the European scale. In: Journal of Environmental Management, 2022, 318, S. 115629.

- Rauch, W., Kinzel, H. (2007): KAREN - User Manual. hydro-IT, GmbH, Innsbruck [2007], <http://www.hydro-it.com/produkte/karen/> [18.01.2024].
- Rauch, W., Urich, C., Bach, P. M., Rogers, B. C., de Haan, F. J., Brown, R. R. et al. (2017): Modelling transitions in urban water systems. In: Water Research, 2017, 126(1), S. 501–514.
- Rossman, L. A. (2015): Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1 [2015], <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P100ERK4.txt>.
- Rybka, H., Haller, M., Brienens, 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. In: Meteorologische Zeitschrift, 2022, 32.
- Torgersen, G., Bjerkholt, J., Lindholm, O. (2014): Addressing Flooding and SuDS when Improving Drainage and Sewerage Systems—A Comparative Study of Selected Scandinavian Cities. In: Water, 2014, 6, S. 839–857.
- Zhang, D., Gersberg, R. M., Ng, W. J., Tan, S. K. (2017): Conventional and decentralized urban stormwater management: A comparison through case studies of Singapore and Berlin, Germany. In: Urban Water Journal, 2017, 14 (2), S. 113–124.
- Zhou, Q. (2014): A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. In: Water, 2014, 6 (4), S. 976–992.

Korrespondenz an:

Martina Hauser
Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck, Österreich
Telefon: +43 512 507 62103
E-Mail: martina.hauser@uibk.ac.at