

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	BlueGreenCities
Langtitel:	Blue-Green Infrastructure for Improving Resilience to Floods and Droughts in Alpine Cities
Zitiervorschlag:	
Programm inkl. Jahr:	ACRP 14 th Call for Proposals 2021
Dauer:	01.10.2022 bis 30.09.2025
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Manfred Kleidorfer
Kontaktperson Name:	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Manfred Kleidorfer
Kontaktperson Adresse:	Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Umwelttechnik, Technikerstrasse 13, 6020 Innsbruck
Kontaktperson Telefon:	+43 512 507 62134
Kontaktperson E-Mail:	manfred.kleidorfer@uibk.ac.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Universität Innsbruck, Institut für Ökologie hydro & meteo GmbH
Schlagwörter:	
Projektgesamtkosten:	468 892.29 €
Fördersumme:	299.357,00 €
Klimafonds-Nr:	KR21KB0K00001
Erstellt am:	17.12.2025

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Das Projekt "BlueGreenCities" untersucht die Auswirkungen einer unsicheren Wasserverfügbarkeit und die daraus resultierenden Konsequenzen für Anpassungsmaßnahmen, wie z.B. blau-grüne Infrastruktur (BGI), um die Resilienz unserer Städte unter zukünftigen Klimawandelszenarien zu verbessern. Die Stadt Innsbruck dient als Fallstudie und repräsentiert typische urbane Räume im alpinen Umfeld.

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Erwärmungstrend für Innsbruck, verbunden mit intensiveren Niederschlagsereignissen und längeren Trockenperioden. Während der potenziell kühlende Gesamteffekt von BGI auf die stadtweite Temperatur begrenzt ist, können lokal signifikante Effekte auftreten. An heißen Sommertagen senken gut bewässerte begrünte Flächen den UTCI um bis zu 2,5 °C, beschattete Bereiche sogar um bis zu 13,5 °C, häufig bis zur vollständigen Aufhebung von Hitzebelastung. Dies unterstreicht, dass BGI mit hoher Evapotranspiration, ausreichender Wasserversorgung und wirksamer Beschattung am effektivsten zur Verbesserung des thermischen Komforts und zur Stärkung der urbanen Hitzestressresilienz beitragen.

Für das Überflutungsmanagement zeigte sich, dass die Entkopplung versiegelter Flächen durch gezielt platzierte BGI Maßnahmen zu einer deutlichen Reduktion von Mischwasserüberläufen, des Überstauvolumens und der Überflutungsfläche führt. Die Wirksamkeit variiert jedoch stark räumlich, abhängig von Kanalnetzcharakteristika und dem Anteil angeschlossener versiegelter Flächen. Daher wird eine lokal differenzierte statt einer flächendeckend einheitlichen Entkopplungsstrategie empfohlen. Hinsichtlich der Trockenstressresilienz wiesen BGI, die den Abfluss von versiegelten Flächen aufnehmen, nur geringe Trockenstressanzeichen auf. Dagegen waren isolierte, nicht bewässerte Grünflächen, insbesondere Rasen- und Baumstandorte, deutlich anfälliger für Wasserknappheit. Die Substratwahl erwies sich als entscheidend: sandbasierte Böden eignen sich besonders für Überflutungsschutz und Infiltration, während lehmhaltige Substrate Vegetation während langanhaltender Trockenperioden besser unterstützen.

Ein wissenschaftlicher Beirat begleitete das Projekt mit jährlichen Sitzungen und förderte den Austausch zwischen Forschung, Behörden und weiteren Stakeholdern. Dieser Wissenstransfer erhöhte maßgeblich die Qualität und Praxisrelevanz der Ergebnisse.

Insgesamt bestätigt das Projekt, dass strategisch gestaltete und hydrologisch vernetzte BGI-Netzwerke, ausgestattet mit geeigneter Beschattung und passenden Substraten, die Klimaresilienz alpiner Städte erheblich verbessern können.

Die Projektergebnisse bilden eine fundierte Grundlage für weiterführende Forschung und die praktische Umsetzung adaptiver Wassermanagement- und BGI-Planungsansätze in alpinen und anderen europäischen Städten. Die Projektgruppe wird die entwickelten Datensätze und Modelle weiter verfeinern, um die Integration von Klima-, Hydrologie- und Stadtplanungsmodellen zu stärken. Damit sollen Städte künftig noch gezielter befähigt werden, multifunktionale BGI-Netzwerke zu entwickeln, die Hitze-, Überflutungs- und Trockenprobleme unter sich wandelnden Klimabedingungen gleichzeitig adressieren.

2 Executive Summary

Cities face increasing challenges from climate change, including more frequent extreme rainfall events, longer dry periods, and rising temperatures as well as extreme heat events. To enhance resilience of urban infrastructure during these events, urban water management must be rethought to both handle water surplus during storms and ensure sufficient water availability for evapotranspiration-driven cooling during drought events. A well-integrated approach can link periods of water deficit and surplus, mitigate ecological degradation, and reduce health risks associated with heat and flooding.

The project “Blue-Green Infrastructure for Improving Resilience to Floods and Droughts in Alpine Cities – BlueGreenCities” addresses these challenges by investigating the role of Blue-Green Infrastructure (BGI) as an adaptation strategy to increase the resilience of urban systems under future climate conditions. The city of Innsbruck in the Austrian Alps serves as the main case study, representing typical alpine urban environments.

The project pursued six core objectives:

1. To assess the consequences of global warming on land–atmosphere interactions and their feedbacks on urban systems and adaptation measures.
2. To analyse the ecological and hydraulic responses of BGI to current and projected climate changes.
3. To quantify the water retention capacity and vegetation water demand of selected adaptation measures.
4. To evaluate the impacts of varying water availability on retention performance, water consumption, and evaporative cooling.
5. To identify suitable vegetation types and design recommendations for BGI under changing rainfall event return periods.
6. To optimise and combine adaptation measures for smart, sustainable water management capable of balancing water surplus and deficit while minimising the impacts of extreme events.

A comprehensive methodological framework was developed, combining regional climate simulations, 1D/2D hydraulic and hydrological modelling, and a GIS-based micro- and bioclimatic model supported by on-site measurements. The project was structured into five work packages, covering climate data analysis, monitoring and parameterisation, hydrological and heat stress modelling as well as integrated assessment of BGI strategies.

The results demonstrate a clear warming trend for Innsbruck, accompanied by projections of more intense precipitation events and extended dry periods. Simulations revealed that while the potential overall cooling effect of BGI to reduce urban heat stress on average urban temperatures is limited on a citywide scale, local effects can be substantial. During hot summer days, well-irrigated areas reduced the Universal Thermal Climate Index (UTCI) by up to 2.5 °C, and shaded areas by up to 13.5 °C, often eliminating heat stress entirely. These findings underline that combining BGI with high evapotranspiration rates, sufficient water supply and vegetation which provides shading vegetation provides is the most effective strategy to improve thermal comfort and urban resilience to heat stress.

For flood management, the results indicated that decoupling impervious surfaces through targeted BGI placement significantly reduces combined sewer overflows (CSOs), sewer surcharge, and flooded

areas. However, the effects vary greatly depending on local conditions, such as the characteristics of the drainage network and the amount of connected impervious surfaces. Therefore, rather than uniform decoupling over the city, a decoupling strategy based on the local conditions and modelling results is recommended.

Regarding drought resilience, BGI managing runoff from impervious areas showed minimal drought stress, while isolated not irrigated urban green areas such as lawn and tree areas were more prone to water scarcity. Substrate choice proved critical: sand-based soils are optimal for flood mitigation and infiltration, whereas loam-based substrates are better suited to support vegetation during prolonged dry periods.

The project also established a scientific advisory board that met after each project year, facilitating valuable exchanges between researchers, city authorities, and stakeholders. This process of mutual knowledge transfer significantly enhanced the quality and applicability of the project results.

Overall, the study confirms that strategically designed and hydrologically connected BGI networks, when providing effective shading and containing appropriate substrates, can substantially improve the climate resilience of alpine cities.

The outcomes of the project form a solid foundation for further research and practical implementation of adaptive water management and BGI planning in alpine and other European cities. Building on these results, the project team will continue to refine and validate the developed datasets and modelling tools. These activities will strengthen the integration of climate, hydrological, and urban planning models, ultimately supporting cities in designing multifunctional BGI networks that simultaneously address heat, flood, and drought challenges under changing climate conditions.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Städte sehen sich infolge des Klimawandels zunehmend mit extremen Niederschlagsereignissen, längeren Trockenphasen sowie steigenden Temperaturen und Hitzeextremen konfrontiert. Eine resilientere städtische Wasserinfrastruktur erfordert daher neue Konzepte, die sowohl Niederschlagsüberschüsse während Starkregenereignissen bewältigen als auch eine ausreichende Wasserversorgung für die Verdunstungskühlung in Trockenperioden sicherstellen. Ein integrierter Ansatz kann Defizit- und Überschussphasen miteinander verknüpfen, ökologische Degradationsprozesse begrenzen und gesundheitliche Risiken durch Hitze und Überflutung reduzieren.

Das Projekt „Blue-Green Infrastructure for Improving Resilience to Floods and Droughts in Alpine Cities – BlueGreenCities“ untersucht die Rolle blau-grüner Infrastruktur (BGI) als Anpassungsstrategie zur Erhöhung der Klimaresilienz urbaner Systeme unter zukünftigen klimatischen Bedingungen.

Das Projekt verfolgte sechs zentrale Ziele:

1. Bewertung der Auswirkungen globaler Erwärmung auf Land–Atmosphäre-Interaktionen sowie deren Rückkopplungen auf urbane Systeme und Anpassungsmaßnahmen.
2. Analyse der ökologischen und hydraulischen Reaktionen von BGI auf aktuelle und künftige Klimaveränderungen.

3. Quantifizierung der Wasserrückhaltekapazität und des Wasserbedarfs der Vegetation ausgewählter Anpassungsmaßnahmen.
4. Untersuchung der Effekte variierender Wasserverfügbarkeit auf Retentionsleistung, Wasserverbrauch und Verdunstungskühlung.
5. Identifikation geeigneter Vegetationstypen und Gestaltungsempfehlungen für BGI vor dem Hintergrund veränderter Wiederkehrzeiten von Niederschlagsereignissen.
6. Optimierung und Kombination von Maßnahmen für ein intelligentes, nachhaltiges Wassermanagement, das Wasserüberschuss und -defizit ausgleicht und die Auswirkungen extremer Ereignisse minimiert.

Zur Bearbeitung dieser Ziele wurde ein umfassender Modellierungsansatz entwickelt, bestehend aus regionalen Klimasimulationen, 1D/2D-hydraulischen und hydrologischen Modellen sowie einem GIS-basierten mikro- und bioklimatischen Modell, ergänzt durch Vor-Ort-Messungen. Die Projektstruktur umfasste fünf Arbeitspakete zu Klimadatenanalyse, Monitoring und Parametrisierung, hydrologischer und thermischer Modellierung sowie integrierter Bewertung von BGI-Strategien.

4 Projektinhalt und Ergebnisse

Mit acht Forschungsfragen (FF1 bis FF8) wurden innerhalb der Arbeitspakete AP 2, 3, 4 und 5 sechs Zielsetzungen (wie in Abschnitt 3 beschrieben - Ziele 1 bis 6) untersucht. Anhand derer wurden die Folgen der globalen Erwärmung auf Städte sowie auf Anpassungsmaßnahmen (BGI - blau-grüne Infrastruktur) und deren Potenzial zur Optimierung des Wassermanagements und zur Minderung von Überflutungs-, Trocken- und Hitzerisiken analysiert.

Zielsetzung 1

Ableitung der Folgen der globalen Erwärmung auf die Wechselwirkungen zwischen Land und Atmosphäre und der daraus resultierenden Rückkopplungen für städtische Systeme und aktuelle Anpassungsmaßnahmen wie blau-grüne Infrastrukturen.

Die Auswirkungen der globalen Erwärmung auf Land-Atmosphäre-Interaktionen und die daraus resultierenden Rückkopplungen auf urbane Systeme wurden in zwei komplementären Studien untersucht.

Die erste Publikation (Role of Surface Energy Fluxes in Urban Overheating Under Buoyancy-Driven Atmospheric Conditions, veröffentlicht in JGR-Atmospheres) analysiert, wie durch Urbanisierung veränderte Eigenschaften der Landoberfläche die Energie- und Wasserströme beeinflussen und dadurch die urbane Überhitzung verstärken. Eine Methode wird vorgestellt, mit der die oberflächeninduzierten Erwärmungs- und Kühlungseffekte verschiedener Oberflächengestaltungsmöglichkeiten (wie BGI) quantifiziert werden können, um die Planung von Anpassungsmaßnahmen zu unterstützen.

Die zweite Publikation (Current Interventions Are Inadequate to Maintain Cities' Resilience During Concurrent Drought and Excessive Heat, veröffentlicht in Earth's Future) untersucht, wie durch den Klimawandel verstärkte Dürren und Hitzeextreme die Verdunstungskühlung beeinträchtigen und die thermische Belastung in Städten verstärken. Sie zeigt auf, dass derzeitige Anpassungsmaßnahmen

unzureichend sind, sofern kein integriertes Wassermanagement und keine kontinuierliche Bewässerung urbaner Grünflächen gewährleistet werden.

Gemeinsam verdeutlichen diese Studien die entscheidenden Rückkopplungen zwischen urbanen Landoberflächen, atmosphärischen Prozessen und Wasserverfügbarkeit unter den Bedingungen der globalen Erwärmung und liefern eine wissenschaftliche Grundlage zur Verbesserung der Resilienz urbaner Systeme.

FF1: In welchem Ausmaß verändern sich Extremereignisse (Niederschlag und Hitze) in Innsbruck und Umgebung?

Zur Bewertung künftiger Änderungen von Hitze und Starkregen wurden konvektionsauflösende Klimasimulationen (CPS) mit einer Auflösung von etwa 3 km genutzt, die kurze, heftige Regenereignisse in komplexem alpinem Gelände besser erfassen können als größere regionale Klimamodelle (Fosser et al., 2024; Rybka et al., 2022). Die Auswertung basiert auf der CPS-DWD-MIROC5-CCLM5-0-16 Simulation für die Perioden historisch (1971-2000), nahe Zukunft (2031-2060) und ferne Zukunft (2071-2100) unter RCP8.5 (Haller et al., 2022). Für den Abgleich mit Messdaten der Station Flughafen Innsbruck (Geosphere Austria, 2024a, 2024b) wurde der Evaluationslauf HoKliSim-De (2000–2019) herangezogen (Brien et al., 2022). Zur Einordnung der Bandbreite möglicher Entwicklungen wurde außerdem ein Ensemble von fünf CPS-Simulationen aus CORDEX-FPSCONV ausgewertet (Coppola et al., 2020).

Abbildung 1 zeigt den Vergleich von Modell und Beobachtung vor und nach Bias-Korrektur für Temperatur (Tmax, Tmin) und stündlichen Niederschlag an der Station Flughafen Innsbruck. Für die Temperatur sind Streudiagramme dargestellt, in denen die beobachteten Tageswerte den modellierten Tageswerten gegenübergestellt werden: oben die tägliche Maximaltemperatur (Tmax), unten die tägliche Minimaltemperatur (Tmin). In beiden Fällen ist eine 1:1-Linie eingezeichnet; Punkte auf dieser Linie entsprechen einer perfekten Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung. Die Abbildung zeigt jeweils eine Darstellung vor der Korrektur und eine nach der Korrektur, sodass die Veränderung der Punktwolken relativ zur 1:1-Linie direkt sichtbar ist.

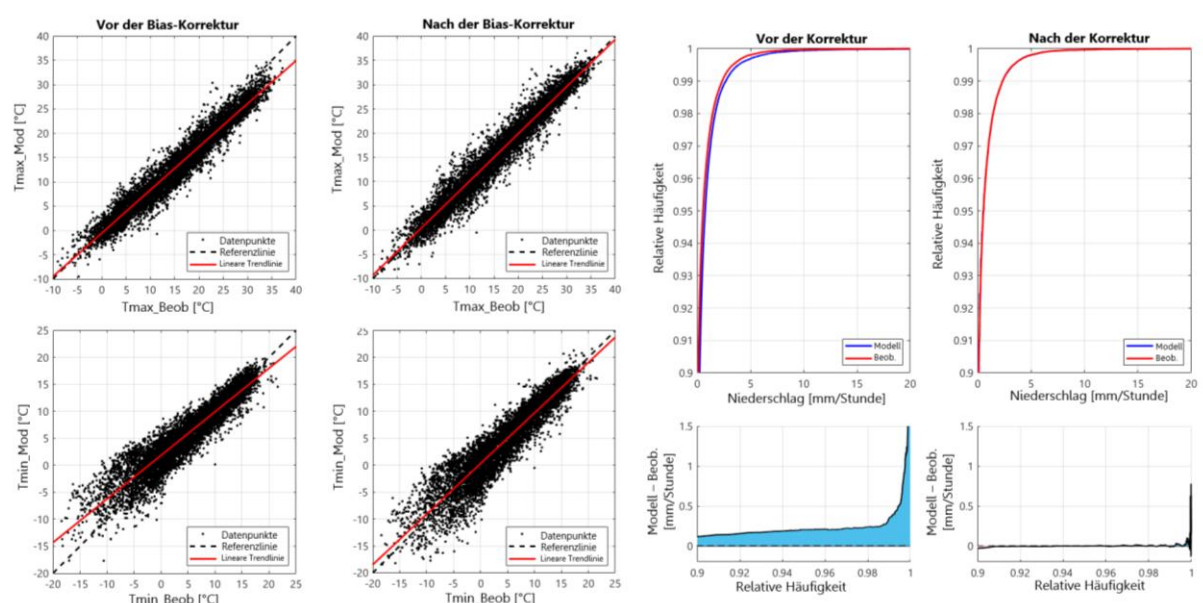


Abbildung 1. Vergleich von Modell und Beobachtung vor und nach Bias-Korrektur für Temperatur (Tmax, Tmin) und stündlichen Niederschlag an der Station Flughafen Innsbruck.

Für den Niederschlag zeigt Abbildung 1 den Vergleich der stündlichen Niederschlagsintensitäten zwischen Beobachtung und Modell über kumulative Verteilungsfunktionen (CDFs). Hier wird die Verteilung der Niederschlagsintensitäten über den gesamten Intensitätsbereich dargestellt und jeweils für den unkorrigierten und den korrigierten Datensatz gegenübergestellt. Zusätzlich sind Differenzdarstellungen enthalten, die zeigen, wie groß die Abweichungen zwischen Modell und Beobachtung entlang der Verteilung ausfallen und wie sich diese Abweichungen durch die Bias-Korrektur verändern.

Basierend auf dem korrigierten Datensatz zeigt die CPS-DWD-Simulation unter dem RCP8.5-Szenario ein klares Signal der Erwärmung in allen Jahreszeiten (Abbildung 2). Die monatlichen Mitteltemperaturen steigen um etwa 2 bis 3 K in der nahen Zukunftsperiode (2031-2060) im Vergleich zur historischen Basislinie (1971-2000). In der fernen Zukunft (2071-2100) verstärkt sich die Erwärmung auf 4 bis 6 K im Spätsommer und etwa 3 bis 4 K im Winter. Die Erwärmung ist am stärksten im Juli, August und September, wobei die Mittelwerte der fernen Zukunft die historischen Werte um mehr als 5 K überschreiten. Auch die Winter werden voraussichtlich um etwa 3 bis 4 K wärmer. Der Jahresgang bleibt in seiner Form ähnlich, ist aber hin zu höheren Temperaturen verschoben.

Beim Niederschlag gibt es eine Tendenz hin zu einer Umverteilung über das Jahr (Abbildung 2). Winter und Frühjahr sind in der nahen und fernen Zukunft feuchter im Vergleich zum Referenzzeitraum, mit monatlichen Gesamtmengen, die um bis zu 20 Prozent steigen. Im Gegensatz dazu nimmt der Regenfall im August und September im Vergleich zum Referenzzeitraum ab, während die Monate Mai-Juli wenig Veränderung zeigen. Dies könnte zu einem stärkeren saisonalen Kontrast führen: feuchtere Winter gepaart mit trockeneren Spätsommern.

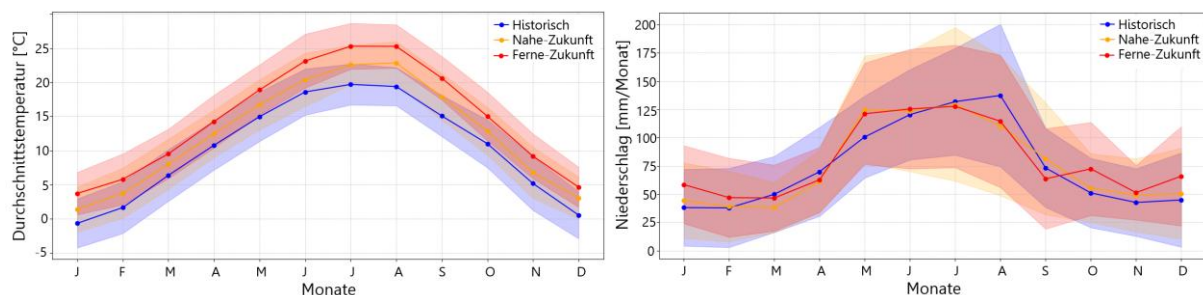


Abbildung 2. Monatliche Durchschnittstemperatur (links) und Niederschlag (rechts) für historische, nahe Zukunfts- und ferne Zukunftsperioden in CPS-DWD-MIROC5-CCLM5 unter dem Szenario RCP8.5.

In Hinblick auf extreme Niederschläge ergibt sich ein anderes Bild als bei den mittleren Niederschlägen. Dies ist in der Heatmap in Abbildung 3 dargestellt, mit monatlichen Anomalien des mittleren Niederschlags und des 99,9%- Perzentils stündlicher Regenfälle. Während der Gesamtniederschlag in den Sommermonaten in der Tendenz gleichbleibt oder abnimmt, steigt die Häufigkeit von Monaten mit extremen stündlichen Regenfällen. Die Kombination längerer Trockenperioden und extremerer Niederschläge entspricht den physikalischen Erwartungen unter Erwärmung: Eine heißere Atmosphäre kann mehr Feuchtigkeit speichern, was konvektive Starkregen begünstigt, während die Gesamtzahl der Regenstunden abnimmt. Das Ergebnis ist konzentrierterer Niederschlag, der die Überflutungsgefahr erhöht, aber wenig zur Bodenfeuchte beiträgt.

Um die Repräsentativität dieser Ergebnisse einzuordnen, wurde das Ensemble konvektionsauflösender Simulationen aus dem CORDEX-FPSCONV-Projekt betrachtet (Abbildung 4). Alle Modelle projizieren eine signifikante Erwärmung, mit Temperaturanstiegen in der nahen Zukunft von etwa 1 bis 2 K und

Zusammenfassend wird erwartet, dass künftige Änderungen signifikante Auswirkungen auf Boden, Oberfläche und Vegetation haben. Höhere Sommertemperaturen erhöhen die Evapotranspiration und den Wasserbedarf der Vegetation, während durch eine Abnahme der mittleren Regenfälle im Spätsommer weniger Wasser zugeführt wird. Wärmere und feuchtere Bedingungen im Winter ändern die Ausgangsbedingungen zu Beginn der Vegetationsperiode. Für urbane blau-grüne Infrastruktur ergeben sich daraus insbesondere zwei Herausforderungen: längere Perioden mit höherem Wasserbedarf und extremere Starkregen, die die Entwässerungssysteme belasten.

Zielsetzung 2

Analyse der ökologischen und hydraulischen Reaktionen von Anpassungsmaßnahmen auf aktuelle und künftige Klimaänderungen.

FF6: Wie reagieren die aktuellen Blau-grünen Infrastrukturen auf Extremereignisse?

Die Reaktion von BGI auf Extremereignisse wurde mithilfe von Langzeitsimulationen für eine historische Periode (1971–2000), die nahe Zukunft (2031–2060) und die ferne Zukunft (2071–2100) untersucht. Die Analyse konzentrierte sich auf die Leistungsfähigkeit während extremer Niederschlags- und Dürreereignisse.

Reaktion auf Niederschlagsereignisse

Simulationen über die drei Zeiträume hinweg zeigen deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen BGI-Typen bei der Modellierung von etwa 5.500 Niederschlagsereignissen pro Zeitraum (Tabelle 1).

BGI ohne Oberflächenabfluss:

Urbane Baumstandorte, Rasenflächen und wasserdurchlässige Beläge zeigten in keinem der untersuchten Zeiträume Oberflächenabfluss. Ihre hohe Infiltrationskapazität war in den Simulationen ausreichend, um alle Niederschlagsintensitäten zu bewältigen.

BGI mit hoher Abflussfrequenz:

Dachbegrünungen erzeugten den häufigsten Abfluss. Extensive Gründächer wiesen in 681–705 Ereignissen (~13 % aller Niederschlagsereignisse) Abfluss auf, während intensive Gründächer in 158–183 Ereignissen (~3 %) Abfluss generierten. Diese hohe Sensitivität ist vor allem auf langanhaltende Niederschläge (48–120 Stunden) zurückzuführen, die die begrenzte Speicherkapazität dieser Systeme sättigen.

BGI mit niedriger Abflussfrequenz:

BGI-Systeme, die zur Bewirtschaftung von Abfluss aus angeschlossenen versiegelten Flächen ausgelegt sind, wie Baumrigolen, Versickerungsmulden, Regengärten, Sickerschächte und Einzelbäume im Straßenraum, erzeugten zwischen 0 und 26 Abflussereignisse pro Zeitraum.

Nach österreichischen Bemessungsrichtlinien sollten BGI-Systeme zur Bewirtschaftung von Abfluss aus angeschlossenen versiegelten Flächen ein Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von fünf Jahren bewältigen können, was weniger als einem Abflussereignis alle fünf Jahre entspricht. Versickerungsmulden, Regengärten und Sickerschächte erfüllen dieses Ziel sowohl für den historischen Zeitraum als auch für die zukünftigen Perioden. Die Baumrigole hingegen erfüllt das Ziel in den zukünftigen Zeiträumen nicht, und die Mulde mit unterirdischem Speicher versagt in allen Perioden. Diese Versagensmechanismen sind häufig auf eine verringerte Speicherkapazität infolge

vorausgegangener Niederschläge oder hohe anfängliche Bodenfeuchte zurückzuführen, wodurch selbst bei kleinen, weniger intensiven Regenereignissen Abfluss entsteht.

Reaktion auf Trockenperioden

Die Analyse der Auswirkungen von Trockenperioden konzentrierte sich auf zwei Aspekte: den Einfluss von Trockenheit auf den anschließenden Niederschlags-Abfluss-Prozess sowie den direkten Trockenstress für die Vegetation der BGI. Obwohl gesunde Vegetation entscheidend für die Leistungsfähigkeit von BGI ist, zeigten die Simulationen, dass Trockenphasen in der Regel nicht unmittelbar von größeren, abflusswirksamen Niederschlagsereignissen gefolgt wurden. Ein Leistungsabfall der BGI aufgrund von trockenheitsgestresster Vegetation unmittelbar vor einem Starkregenereignis wurde daher in dieser Analyse nicht als signifikanter Ausfallmechanismus identifiziert.

Direkter Trockenstress stellt jedoch eine erhebliche Herausforderung dar, insbesondere für BGI, die keinen Zufluss von angrenzenden versiegelten Flächen erhalten (Tabelle 2).

Tabelle 1. Abflussverhalten der BGI-Typen, einschließlich ihrer Sensitivität gegenüber Niederschlagsdauer, der Häufigkeit von Abflussereignissen sowie den zugehörigen Wiederkehrzeiten der Niederschläge für einen historischen Zeitraum (1971–2000) und zwei zukünftige Perioden (2031–2060, 2071–2100).

BGI	1971-2000			2031-2060			2071-2100		
	Sensitivität gegenüber Niederschlagsdauer	Abflussereignisse	Wiederkehrzeit (Jahre)	Sensitivität gegenüber Niederschlagsdauer	Abflussereignisse	Wiederkehrzeit (Jahre)	Sensitivität gegenüber Niederschlagsdauer	Abflussereignisse	Wiederkehrzeit (Jahre)
Baumstandort	-	0	-	-	0	-	-	0	-
Baumrigole	1-4h	3	1-10	1-2h	8	1-10	1-2	10	2-20
Extensives Gründach	48h	685	<1-30	48-120h	681	<1-75	48-72h	705	<1-10
Intensives Gründach	48h	164	< 1-30	96-120h	183	<1-75	48-72h	158	<1-10
Mulde	-	0	-	-	0	-	keine	5	>5
Mulden-Rigolen-System	1-4h	7	1-10	1-3h	22	1-10	1-6h	26	1-100
Durchlässige Beläge	-	0	-	-	0	-		0	-
Regengarten	1-3h	2	3-10	2h	2	2-10	1	4	2-10
Grasfläche	-	0	-	-	0	-		0	-

Sickerschacht	-	0	-	-	0	-	keine	1	100
Einzelner Stadtbaum	1-3h	2	3-10	keine	2	2-10	1-2h	5	2-20

Tabelle 2. Trockenheitsreaktion der BGI-Typen, einschließlich der mittleren jährlichen Anzahl trockener Tage sowie des mittleren jährlichen Bewässerungsbedarfs (mm/Jahr) für einen historischen Zeitraum (1971–2000) und zwei zukünftige Zeiträume (2031–2060, 2071–2100).

BGI	1971-2000		2031-2060		2071-2100	
	Mittlere Anzahl an Trockenstress-Tagen (pro Jahr)	Mittlerer Bewässerungsbedarf (mm/Jahr)	Mittlere Anzahl an Trockenstress-Tagen (pro Jahr)	Mittlerer Bewässerungsbedarf (mm/Jahr)	Mittlere Anzahl an Trockenstress-Tagen (pro Jahr)	Mittlerer Bewässerungsbedarf (mm/Jahr)
Baumstandort	106,6	563,1	121,7	682,8	118,0	768,0
Baumrigole	0,3	0,5	1,6	14,0	2,6	22,8
Extensives Gründach	10,7	28,0	23,0	76,1	27,7	104,7
Intensives Gründach	28,5	127,4	44,3	215,0	48,9	276,6
Mulde	0,2	0,1	0,4	2,7	0,9	5,1
Mulden-Rigolen-System	0,2	0,2	1,2	7,8	2,1	12,8
Regengärten	0,3	0,4	1,6	9,4	2,6	15,4
Grasfläche	25,0	99,2	44,4	184,3	44,5	224,4
Einzelner Stadtbau	1,9	8,2	8,0	55,0	7,9	60,8

Die Anzahl der Trockenstress-Tage (an denen die Bodenfeuchte den Welkepunkt erreicht) war bei urbanen Baumstandorten am höchsten und lag in allen betrachteten Zeiträumen bei durchschnittlich über 100 trockenen Tagen pro Jahr. Auch Rasenflächen und Gründächer zeigten eine hohe Vulnerabilität. Im Gegensatz dazu wiesen Systeme, die externen Abfluss sammeln, wie Baumrigolen und Versickerungsmulden, nur minimalen Trockenstress auf, mit durchschnittlich weniger als drei trockenen Tagen pro Jahr, selbst in der fernen Zukunft. Für nahezu alle BGI-Typen wird sowohl die Anzahl der Trockenstress-Tage als auch der entsprechende jährliche Bewässerungsbedarf deutlich ansteigen. Beispielsweise vervierfacht sich der Bewässerungsbedarf eines extensiven Gründachs nahezu von 28 mm/Jahr im historischen Zeitraum auf 104,7 mm/Jahr in der fernen Zukunft. Ähnlich erhöht sich der Bedarf einer Rasenfläche von 99,2 mm/Jahr auf 224,4 mm/Jahr. Dieser Trend wird durch eine höhere potenzielle Evapotranspiration infolge steigender Temperaturen sowie durch eine Verlängerung der Trockenperioden verursacht.

FF4: Welches Potenzial besteht, die städtische Überflutungsgefahr zu reduzieren?

Das Potenzial zur Reduktion urbaner Überflutungsgefahren wurde für das Fallbeispiel Innsbruck auf städtischer Ebene untersucht, indem die wirksam angeschlossene versiegelte Fläche um 30 % reduziert wurde. Dabei wurde angenommen, dass die Niederschläge in diesen Bereichen über BGI-Maßnahmen bewirtschaftet werden. Die Analyse erfolgte mithilfe von drei verschiedenen Modellen mit unterschiedlichen Zielgrößen: ein konzeptionelles Modell (KAREN) zur Bewertung von Entlastungen an Mischwasserüberläufen (CSO - Combined Sewer Overflow), ein 1D-hydrodynamisches Modell (SWMM) zur Analyse von Kanalnetzüberlastungen sowie ein gekoppeltes 1D/2D-Modell (Dynamic CA-ffé) zur Simulation überfluteter Flächen. CSO-Volumina und die Anzahl der CSO-Ereignisse wurden mit einer 30-jährigen Niederschlagszeitreihe mit 1-stündiger Auflösung berechnet, während überflutete Flächen, Kanalüberlastungen und überlastete Schächte auf Grundlage von Bemessungsniederschlägen mit 180-minütiger Dauer und Wiederkehrperioden von 1, 2, 5, 10, 30, 50, 75 und 100 Jahren simuliert wurden.

Die Reduktion der angeschlossenen, versiegelten Fläche führte insgesamt zu einer Verringerung der Überflutungsgefahr in Bezug auf CSO, Kanalüberlastung und Überflutungen. Umgekehrt bewirkt eine Zunahme der versiegelten Flächen (z. B. durch Urbanisierung) eine Zunahme dieser Belastungen. Durch eine Reduktion der angeschlossenen Flächen um 30 % sinkt das CSO-Volumen um 31,8 % (30-Jahres-Zeitraum), das Kanalüberlastungsvolumen um 46,79 % (5-jähriges, 180-minütiges Ereignis) bzw. 35,85 % (50-jähriges, 180-minütiges Ereignis) sowie die überflutete Fläche um 46,95 % (5-jähriges, 180-minütiges Ereignis) bzw. 31,64 % (50-jähriges, 180-minütiges Ereignis).

Ein Vergleich der drei Zielgrößen zeigt, dass die Reduktion angeschlossener Flächen bei höheren Wiederkehrperioden (50 Jahre/180 Minuten) den größten Effekt auf Kanalüberlastungen und CSO-Volumina hat, während sich bei kleineren Wiederkehrperioden (5 Jahre/180 Minuten) ein ähnliches Verbesserungsniveau in allen drei Zielgrößen einstellt. Insgesamt verbessert sich das Verhalten aller drei Indikatoren deutlich.

Zusätzlich wurde der Einfluss zukünftiger klimatischer Bedingungen analysiert: historischer Zeitraum (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100). Ohne Entkopplungsmaßnahmen zeigen alle drei Zielgrößen eine zunehmende Tendenz. CSO-Volumina steigen voraussichtlich um 16,14 % in der nahen Zukunft und um 30,59 % in der fernen Zukunft (basierend auf einer 30-jährigen Zeitreihe). Kanalüberlastungsvolumina nehmen um 40,89 % (nahe Zukunft) und 45,14 % (ferne Zukunft) zu (50-jähriges, 180-minütiges Ereignis), während die überflutete Fläche um 31,36 % bzw. 34,10 % wächst (ebenfalls 50-jähriges, 180-minütiges Ereignis). Auch die Anzahl der CSO-Ereignisse und überlasteten Knoten steigt deutlich an.

Während alle Zielgrößen in Zukunft zunehmen, reagieren die überflutete Fläche und das Kanalüberlastungsvolumen stärker auf die zukünftigen Niederschlagsverhältnisse als die CSO-Volumina. Um das CSO-Volumen des historischen Zeitraums zu halten, müssten etwa 16,2 % der Fläche in der nahen Zukunft und 27,1 % in der fernen Zukunft entkoppelt werden.

Zu beachten ist, dass BGI-Umsetzungen in dieser Studie vereinfacht über eine Reduktion der wirksam angeschlossenen versiegelten Fläche abgebildet wurden. In Extremereignissen können BGIs jedoch versagen und Abfluss generieren, was zu abweichenden Ergebnissen führen könnte. Dennoch zeigen die Ergebnisse eindeutig, dass die Implementierung von BGI, modelliert als Reduktion der angeschlossenen versiegelten Flächen, alle drei Zielgrößen verbessert und CSOs, Kanalüberlastungen

und Überflutungsflächen verringert. Unter zukünftigen Klimabedingungen, in denen alle drei Belastungen weiter zunehmen, gewinnt dies zusätzlich an Bedeutung. Damit besteht ein hohes Potenzial zur Reduktion der Überflutungsgefahr durch die Umsetzung von BGI, insbesondere durch die Reduktion der wirksam angeschlossenen versiegelten Flächen.

Zielsetzung 3

Bestimmung des derzeitigen Wasserrückhaltevermögens von Anpassungsmaßnahmen und des Wasserverbrauchs der einbezogenen Vegetation.

Die Wasserrückhaltekapazität von BGI setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen: der Oberflächenrückhaltung (Interzeption durch Vegetation und Mulden-/Oberflächenretention) und der Bodenrückhaltung (abhängig von Porosität und Anfangsfeuchte). Für diese Analyse wurde ein idealisiertes Modell verwendet, um verschiedene BGI-Typen zu vergleichen. Systeme, die Oberflächenabfluss bewirtschaften, sind für eine angeschlossene versiegelte Fläche von 1000 m² dimensioniert, während Systeme ohne Fremdwasserzufluss eine eigene Fläche von 1000 m² aufweisen.

Wasserrückhaltekapazität

Die Ergebnisse zeigen eine klare Unterscheidung basierend auf dem BGI-Design (Tabelle 3). Systeme, die externen Abfluss aufnehmen, verfügen trotz ihrer kleineren Grundfläche über deutlich höhere Oberflächenrückhaltekapazitäten von 8,5 m³ (Baumrigole) bis zu 40,8 m³ (Mulde). Im Gegensatz dazu besitzen große, autarke Systeme wie eine 1000 m² Baum- oder Rasenfläche lediglich eine Oberflächenkapazität von rund 5,5 m³.

Dieses Verhältnis kehrt sich jedoch bei der Bodenrückhaltekapazität um. Aufgrund ihrer großen Fläche verfügen eine 1000 m² Baumfläche oder Rasenfläche über eine viel höhere maximale Bodenrückhaltekapazität (312 m³ bzw. 195 m³) als kompaktere, abflussorientierte Systeme wie eine Biofilteranlage (6,9 m³) oder eine Versickerungsmulde (13,6 m³).

Wasserbedarf der Vegetation

Der Wasserbedarf zur Maximierung der Evapotranspiration und zur Erhaltung der Pflanzengesundheit hängt von der Vegetationsart und der Größe des BGIs ab. Daher weisen kleinere BGI, die für die Aufnahme von Oberflächenabfluss ausgelegt sind (z. B. Mulden, Baumrigolen), einen deutlich geringeren jährlichen Gesamtwasserbedarf auf (z. B. 98–147 m³/Jahr für eine Mulde) als große Flächen wie Baumstandorte (900–1800 m³/Jahr). Dieser geringere Bedarf, kombiniert mit zusätzlicher Wasserzufuhr durch Abfluss, stimmt mit den Erkenntnissen aus Ziel 2 überein und erklärt deren geringeren Trockenstress und Bewässerungsbedarf.

Flächenbezogen (mm/Jahr) werden die Unterschiede in der Vegetation deutlich: BGI mit Bäumen und intensiven Gründächern weisen den höchsten Wasserbedarf je Flächeneinheit auf (bis zu 1800–2250 mm/Jahr), wobei dies stark von den spezifischen Pflanzenarten abhängt. Versickerungsmulden, Mulden-Rigolen-Systeme und Rasenflächen haben einen ähnlichen, moderaten Wasserbedarf, während die trockenresistenten Pflanzen extensiver Gründächer den geringsten Bedarf aufweisen (450–846 mm/Jahr).

Tabelle 3. Wasserrückhaltekapazitäten und Wasserbedarf der Vegetation verschiedener BGI-Typen, mit Angaben zur Oberflächen-, Boden- und Gesamtrückhaltung (in m³ und mm) sowie zum jährlichen Wasserbedarf der Vegetation (mm/Jahr) für den historischen Zeitraum.

BGI	Oberflächen- rückhalte- kapazität (m ³)	Oberflächen- rückhalte- kapazität (mm)	Boden- rückhalte- kapazität (m ³)	Boden- rückhalte- kapazität (mm)	Gesamt- rückhalte- kapazität (m ³)	Wasser- bedarf der Vegetation (mm/Jahr)
Baums tandor t	5.5	5.5	312	312	317.5	900-1800
Baumr igole	8.5	100	20.7	244	29.2	900-1800
Extens ives Gründ ach	4.5	5	51.9	58	56.4	450-846
Intensi ves Gründ ach	10	10	135	135	145	450-2250
Mulde	40.8	300	21.2	156	62	720-1080
Mulde n- Rigole n- Syste m	12.9	300	6.9	160	19.8	720-1080
Regen garten	15.3	180	13.6	160	28.9	810-1080
Grasflä che	5.5	5.5	195	195	200.5	720-1080
Einzeln er Stadt baum	1.2	100	3.7	312	4.9	900-1800

Zielsetzung 4

Analyse der Auswirkungen einer schwankenden Wasserverfügbarkeit aufgrund der in Ziel 1 genannten Folgen auf Rückhaltekapazitäten, Wasserverbrauch und Verdunstungskühlung.

FF3: Welches Potenzial und welcher tatsächliche (unter realen Bedingungen der Wasserverfügbarkeit) Kühlungseffekt besteht von blau-grüner Infrastruktur?

Der Kühleffekt von BGI wird hauptsächlich durch zwei Mechanismen erzeugt: Beschattung durch Vegetation, die die direkte Sonneneinstrahlung reduziert und durch den latenten Wärmestrom, bzw. die Evapotranspiration (ET). Obwohl das potenzielle Kühlvermögen durch ET hoch ist, ein großer Laubbaum in Innsbruck kann an einem heißen Tag mehr als 10 mm Wasser transpirieren, kann die

tatsächliche Kühlleistung durch die Wasserverfügbarkeit im Boden begrenzt sein. Langzeitsimulationen zeigen, dass die tatsächliche ET maßgeblich vom Vegetationstyp und davon abhängt, ob die BGI zusätzliches Abflusswasser von angrenzenden versiegelten Flächen erhält.

Jährliche Evapotranspiration und Wasserverfügbarkeit

Auf Jahresbasis bieten BGI mit Bäumen durchgehend das höchste Kühlpotenzial durch Evapotranspiration. Systeme, die externen Oberflächenabfluss erhalten, wie Baumrigolen und Straßenbäume, weisen die höchsten jährlichen ET-Werte auf; sie steigen von etwa 1191 mm/Jahr im historischen Zeitraum auf über 1424 mm/Jahr in der fernen Zukunft (Tabelle 4).

Es folgen BGI mit Rasenflächen sowie Kräutern und Sträuchern (z. B. Versickerungsmulden, Rasenflächen), mit jährlichen ET-Werten zwischen 732 und 967 mm/Jahr. Extensive Gründächer, die keinen externen Abfluss erhalten und nur über eine begrenzte Wasserspeicherung verfügen, zeigen die niedrigste Leistung mit ET-Werten zwischen 498 und 553 mm/Jahr.

Für nahezu alle BGI-Typen wird ein Anstieg der jährlichen ET in künftigen Perioden erwartet. Dies ist auf eine höhere atmosphärische Nachfrage (potentielle ET) infolge steigender Temperaturen zurückzuführen, kombiniert mit einem prognostizierten moderaten Anstieg des Jahresniederschlags, der die Wasserversorgung für ET verbessert.

Tabelle 4. Evapotranspiration (Kühleffekt) der BGI-Typen, mit Angaben zur mittleren jährlichen Evapotranspiration (mm/Jahr) und zur mittleren täglichen Evapotranspiration an Tagen > 30 °C (mm/Tag) für einen historischen Zeitraum (1971–2000) und zwei künftige Zeiträume (2031–2060, 2071–2100).

BGI	1971-2000		2031-2060		2071-2100	
	Evapo- transpirat ion (mm/Jahr)	Evapotranspir ation an Hitzetagen > 30°C (mm/Tag)	Evapo- transpirat ion (mm/Jahr)	Evapotranspir ation an Hitzetagen > 30°C (mm/Tag)	Evapo- transpirat ion (mm/Jahr)	Evapotranspir ation an Hitzetagen > 30°C (mm/Tag)
Baumstan dort	884	3,4	899	3,7	940	3,5
Baumrigol e	1191	8,1	1322	7,9	1446	8,1
Extensives Gründach	498	3,3	519	3,0	553	2,9
Intensives Gründach	751	4,2	770	3,9	806	3,7
Mulde	788	5,4	880	5,3	967	5,5
Mulden- Rigolen- System	788	5,4	875	5,3	958	5,4
Regengart en	787	5,4	874	5,3	957	5,4
Grasfläche	732	4,5	758	4,1	809	3,9
Einzelner Stadtbau m	1191	8,1	1302	7,7	1424	7,9

Kühlleistung an heißen Tagen

Die Leistungsunterschiede werden an heißen Tagen, definiert als Tage mit einer maximalen Temperatur über 30 °C, besonders deutlich. An solchen Tagen wird die Wasserverfügbarkeit zum entscheidenden begrenzenden Faktor.

- Hochleistungs-BGI: Die Baumrigole und der Straßenbaum halten auch in zukünftigen Klimaszenarien sehr hohe ET-Raten von etwa 8,0 mm/Tag aufrecht. Durch den Anschluss an externen Oberflächenabfluss sind sie während dieser kritischen Hitzeperioden nicht durch Wassermangel eingeschränkt.
- Wasser-gestresste BGI: Im starken Gegensatz dazu zeigt ein isolierter urbaner Baumbestand ohne zusätzlichen Abfluss deutlich geringere Leistungen. Die ET-Rate an heißen Tagen beträgt weniger als die Hälfte derjenigen einer Baumrigole und liegt im Mittel nur bei etwa 3,4–3,7 mm/Tag. Dies zeigt, dass zwar ein großes Kühlpotenzial vorhanden wäre, dieses aber aufgrund von Trockenstress nicht ausgeschöpft werden kann.
- Leistungsrückgang in der Zukunft: BGI mit begrenztem Wasserspeicher, wie Gründächer und Rasenflächen, weisen zukünftig einen spürbaren Rückgang der Kühlleistung an heißen Tagen auf. Beispielsweise sinkt die tägliche ET eines extensiven Gründachs von 3,3 mm/Tag im historischen Zeitraum auf 2,9 mm/Tag in der fernen Zukunft. Ursache hierfür sind längere vorangehende Trockenperioden, die die Bodenfeuchte so weit reduzieren, dass keine nennenswerte Kühlleistung mehr erbracht werden kann, wenn sie am dringendsten benötigt wird. Andere BGI-Typen, die zusätzlichen Zufluss erhalten, zeigen hingegen über alle zukünftigen Perioden hinweg relativ stabile ET-Raten an heißen Tagen.

Auswirkungen von Begrünung und Beschattung auf die thermische Belastung

Wir analysierten den Status quo in Bezug auf Überflutungsgefahr, Wasserhaushalt und Hitzestress innerhalb von AP 5 für die einzelnen Stadtteile Innsbrucks auf Basis der Simulationen der drei Modelle (Abbildung 5). Abbildungen 5A, 5B und 5C zeigen die Verteilung der Komponenten des Wasserhaushalts: Evapotranspiration, Grundwasserneubildung und Abfluss. Abbildungen 5D und 5E zeigen das Überstauvolumen bzw. die überflutete Fläche. Abbildung 5F illustriert den thermischen Stress für Menschen, gemessen mit dem Universal Thermal Climate Index (UTCI), an einem Tag mit einer Lufttemperatur von 31,2 °C, repräsentativ für einen Hitzetag.

Auf Grundlage des Status quo analysierten wir anschließend die Auswirkungen einer Entsiegelung von 30 % der befestigten Oberflächen in allen Stadtteilen gemäß den österreichischen Richtlinien, unter Verwendung verschiedener BGI-Typen (Tabelle 5).

Unsere Ergebnisse zeigen, dass BGI-Maßnahmen, die gemäß den österreichischen Vorgaben dimensioniert sind, dazu beitragen, Überstauvolumen und überflutete Flächen zu reduzieren und gleichzeitig den Wasserhaushalt zu verbessern, insbesondere durch eine erhöhte Grundwasserneubildung (siehe Tabelle 5). Die Evapotranspiration steigt jedoch nur geringfügig an, sodass weder auf Stadtebene noch auf Bezirksebene eine Reduktion des UTCI erreicht wird (siehe Tabelle 5).

Obwohl Begrünung den UTCI um bis zu 2,5 °C senken kann, ist dieser Effekt räumlich sehr begrenzt. Selbst bei einer stadtweiten Entsiegelung von 30 % durch BGI ergibt sich kein messbarer Effekt, da die Flächenumwandlung von versiegelt zu begrünt zu gering ist.

Unsere Ergebnisse unterstreichen zudem den erheblichen Einfluss von Beschattung auf die Reduktion von Hitzestress und bestätigen, dass die Kombination aus wasserführenden BGI und Schatten spendender Vegetation die wirksamste Strategie darstellt, um die Widerstandsfähigkeit urbaner Räume gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels zu erhöhen.

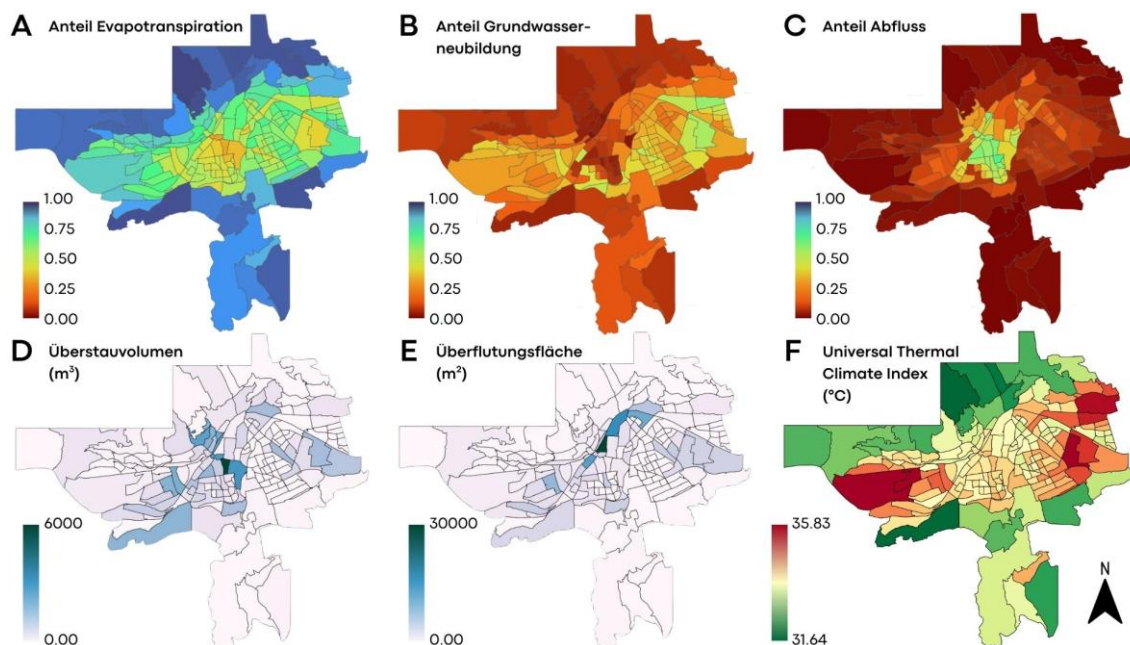


Abbildung 5. Status quo für Innsbruck in Bezug auf Überflutungsgefahr, Wasserbilanz und Hitzestress. A, B und C - Aufschlüsselung der Komponenten der Wasserbilanz: Evapotranspiration, Grundwasserneubildung und Abfluss. D - Überstauvolumen. E - Überflutungsfläche. F - Menschlicher Hitzestress basierend auf dem Universal Thermal Climate Index (UTCI) an einem heißen Tag mit einer Lufttemperatur von 31,2 °C.

Tabelle 5. Auswirkungen der Entsiegelung von 30 % der befestigten Flächen und der entsprechenden Implementierung von BGI auf die Überflutungsgefahr für 5- (J5) und 50- (J50) jährliche Regenereignisse mit einer Dauer von 180 Minuten (D180), auf den langfristigen Wasserhaushalt (einschließlich ET - Evapotranspiration, I - Grundwasserneubildung und R - Abfluss) sowie auf den Hitzestress (einschließlich LST - Landoberflächentemperatur und UTCI - Universal Thermal Climate Index).

BGI	Flood Risk				Water Balance			Heat Stress	
30% Decoupled Area	Surcharge Volume		Flood Extent		ET	I	R	LST	UTCI
	%								
	J5/ D180	J50/ D180	J5/ D180	J50/ D180					
	-46.79	-35.85	-46.95	-31.64					
Tree Pit					+0.26	+7.81	-23.99	-0.21	0.0
Swale					+0.24	+8.34	-25.21	-0.19	0.0
Raingarden					+0.14	+8.25	-24.02	-0.19	0.0
Green Roof					+0.95	-0.37	-9.02	-0.24	0.0

Zielsetzung 5

Zuweisung des geeigneten Vegetationstyps und Planung von Anpassungsmaßnahmen entsprechend den sich ändernden Wiederkehrperioden von Ereignissen.

FF2: Welche Vegetationsarten eignen sich für naturbasierte Anpassungsmaßnahmen in städtischen Gebieten alpiner Regionen, um den Herausforderungen des Klimawandels in Winter- und Sommerperioden zu begegnen?

Die für eine naturbasierte Anpassung in Alpinen Stadtgebieten am besten geeignete Vegetation besteht aus einer strukturellen Mischung aus einheimischen Laubbäumen und hochalpinen Sukkulente. Laubbäume wie *Acer pseudoplatanus* sind für das Straßenbild von besonderer Bedeutung, da sie in den Sommermonaten kühlenden Schatten spenden, ohne den wichtigen Sonneneintrag im Winter zu beeinträchtigen. Darüber hinaus weisen sie eine hohe Toleranz gegenüber Streusalz und schweren Schneelasten auf, wodurch sie sich hervorragend für städtische Umgebungen eignen. Im Zusammenhang mit Gebäudehüllen und Bodenbedeckung ist die Verwendung von trockenresistenten alpinen Sukkulente (*Sedum* und *Sempervivum*) zweckmäßig, um den starken Schwankungen zwischen winterlicher Kälte und sommerlicher UV-Belastung/Trockenheit zu begegnen und so eine ganzjährige Regenwasserbewirtschaftung und Wärmeregulierung zu gewährleisten. Speziell für das Untersuchungsgebiet Innsbruck erfüllen die durch die zuständigen Planungs- und Gartenbaubehörden gesetzten Maßnahmen diese Aufgabe weitgehend.

FF5: Welche Wasserqualität (auch im Hinblick auf Verschmutzungen durch Salzeintrag während der Wintersaison) muss für die Bewässerung urbaner Vegetation erreicht werden?

Die Auswahl der Vegetation für BGI richtet sich nach den Standortbedingungen, die für die Pflanzenleistung entscheidend sind (z. B. Wachstum, Kühlung durch Transpiration und Nutzwert). Wichtige Faktoren sind ausreichendes Bodenvolumen für das Wurzelwachstum, Nährstoffverfügbarkeit und eine ausreichende Wasserversorgung. In typischen städtischen Umgebungen reicht der Niederschlag allein oft nicht aus, um den Wasserbedarf leistungsfähiger Vegetation wie großer Bäume zu decken.

Dies führt zu einer grundlegenden Designentscheidung:

1. Robuste, stressresistente Vegetation auswählen, die unter schwierigen Bedingungen überleben kann (z. B. begrenztes Bodenvolumen, geringe Wasserverfügbarkeit). Ein typisches Beispiel ist der Einsatz bestimmter *Sedum*- und Grasarten auf extensiven Gründächern, die an flache Substrate mit schwankender Wasserverfügbarkeit angepasst sind.
2. Günstige Standortbedingungen schaffen, um leistungsfähige Vegetation zu unterstützen, die größere ökologische Leistungen erbringt.

Während robuste Vegetation eine praktikable Option für Standorte ist, an denen Bedingungen nicht verbessert werden können, bieten diese Arten oft geringere funktionale Vorteile. Beispielsweise liefern Bäume, die Dürre und begrenztes Bodenvolumen tolerieren, typischerweise weniger Transpirationskühlung, Schatten und Nutzwert als ihre anspruchsvolleren Pendanten. Um die Vorteile von BGI zu maximieren, sollte die Hauptstrategie darin bestehen, optimale Wachstumsbedingungen zu schaffen, während weniger leistungsfähige, robuste Arten nur für Standorte ausgewählt werden, an denen dies nicht möglich ist.

Langzeitsimulationen mit dem SWMM UrbanEVA-Modell für Innsbruck zeigen einen wichtigen Erkenntniswert für diesen Entscheidungsprozess: BGI, die für die Ableitung von Regenwasser von angeschlossenen versiegelten Flächen (für ein 5-jähriges Bemessungsereignis) ausgelegt sind, verfügen konstant über ausreichend Wasser. Wie in der Analyse für Ziel 2 gezeigt, weisen diese Systeme auch unter zukünftigen Klimaszenarien keinen signifikanten Trockenstress auf. Dieses Wasserüberschuss, insbesondere in den Wintermonaten, führt zu einer signifikanten Grundwasserneubildung und zeigt, dass für diese spezifischen BGI-Typen die Wasserverfügbarkeit kein limitierender Faktor für das Pflanzenwachstum ist.

Zielsetzung 6

Optimierung und Kombination von Anpassungsmaßnahmen für eine intelligente und nachhaltige Wasserbewirtschaftung, die in der Lage ist, Zeiten des Wasserüberschusses und des Wasserdefizits miteinander zu verbinden und gleichzeitig die Auswirkungen von Extremereignissen zu minimieren.

FF8: Welche Wasserkapazitäten müssen Anpassungsmaßnahmen bereitstellen, um während der Sommermonate eine ausreichende Wasserversorgung sicherzustellen?

Böden und Substrate, in denen BGI-Vegetation wächst, sind natürliche Speichersysteme, die während nasser Perioden Wasser zurückhalten und in Trockenperioden Wasser bereitstellen oder abgeben. Die Speicherkapazität des Bodens wird durch seine Korngrößenverteilung bestimmt, wobei schluffige und tonige Böden höhere Werte aufweisen und sandige Böden geringere Werte. Zusätzlich ist das wurzelbare Boden- oder Substratvolumen ein entscheidender Faktor, da städtische Bäume oft mit stark eingeschränktem Bodenvolumen konfrontiert sind. Nach einer ausreichend langen Dürreperiode trocknen alle Böden aus, das Bodenwasser erreicht den Welkepunkt, und die Vegetation erfährt Trockenstress. In diesem Fall ist Bewässerung notwendig, um die Pflanzen gesund zu halten.

Wir definieren die Wasserkapazität, welche die BGI benötigt, um die Vegetationsgesundheit zu erhalten, als einen theoretischen zusätzlichen Wassertank, der entleert wird, wenn Wasser für die Bewässerung verwendet wird, und durch BGI-Abfluss und Grundwasserneubildung wieder aufgefüllt wird. Die Größe des Tanks wird so klein wie möglich definiert, um die Bewässerungsanforderungen stets zu erfüllen. Ein sehr großer Speicher weist auf ein großes Defizit zwischen Wasserzufluss und Vegetationsbedarf über längere Zeiträume hin, während eine kleinere Speichergröße auf einen Überschuss des Wasserzuflusses im Vergleich zum Wasserbedarf hindeutet.

Die meisten getesteten BGI erfahren nur sehr selten Trockenstress und Bewässerungsbedarf und haben daher ein sehr niedriges potenzielles Speichervolumen von 2–211 mm im historischen Zeitraum (Tabelle 5). Rasenflächen, intensive Gründächer und Baumflächen hingegen benötigen sehr große zusätzliche Speicher, um ihren Bewässerungsbedarf zu decken. Besonders städtische Baumflächen weisen eine sehr hohe zusätzliche Speichergröße auf, da der natürliche Niederschlag normalerweise nicht ihren potenziellen Wasserbedarf deckt. Da die meisten Baumarten Trockenperioden durch Verringerung des Stomataflusses und Speicherung von Wasser im Stamm und in den Ästen überstehen können, sind sie insgesamt nicht so anfällig wie andere Vegetationstypen.

Tabelle 6. Benötigte zusätzliche Speichergröße (mm), um den Bewässerungsbedarf der Vegetation für BGI-Typen im historischen Zeitraum (1971–2000) und in zwei zukünftigen Zeiträumen (2031–2060, 2071–2100) zu decken.

BGI	1971-2000	2031-2060	2071-2100
	Speichergröße (mm)	Speichergröße (mm)	Speichergröße (mm)
Baumstandort	16237	20041	22158
Baumrigole	9	115	132
Extensives Gründach	142	197	260
Intensives Gründach	1255	2897	4132
Mulde	2	44	58
Mulden-Rigolen-System	2	68	86
Regengarten	6	77	91
Grasfläche	1046	1776	2967
Einzelner Stadtbaum	211	340	439

Alle BGI-Typen zeigen einen deutlichen Anstieg der benötigten Speichergröße für die nahen und fernen Zukunftszeiträume, bedingt durch längere Trockenperioden und höhere potenzielle Evapotranspiration. Abbildung 6 zeigt die benötigte Speichergröße für einen 136 m² große Mulde in Abhängigkeit von der angeschlossenen versiegelten Fläche. Selbst bei nur 100 m² angeschlossener Fläche ist die erforderliche Speichergröße bereits deutlich kleiner als bei einer Rasenfläche mit ähnlicher Vegetation und Bodenbeschaffenheit. Wird eine größere Fläche an die Mulde angeschlossen, verringert sich die benötigte Speichergröße weiter, wobei keine zusätzliche Verbesserung in Abhängigkeit vom Klimazeitraum erfolgt.

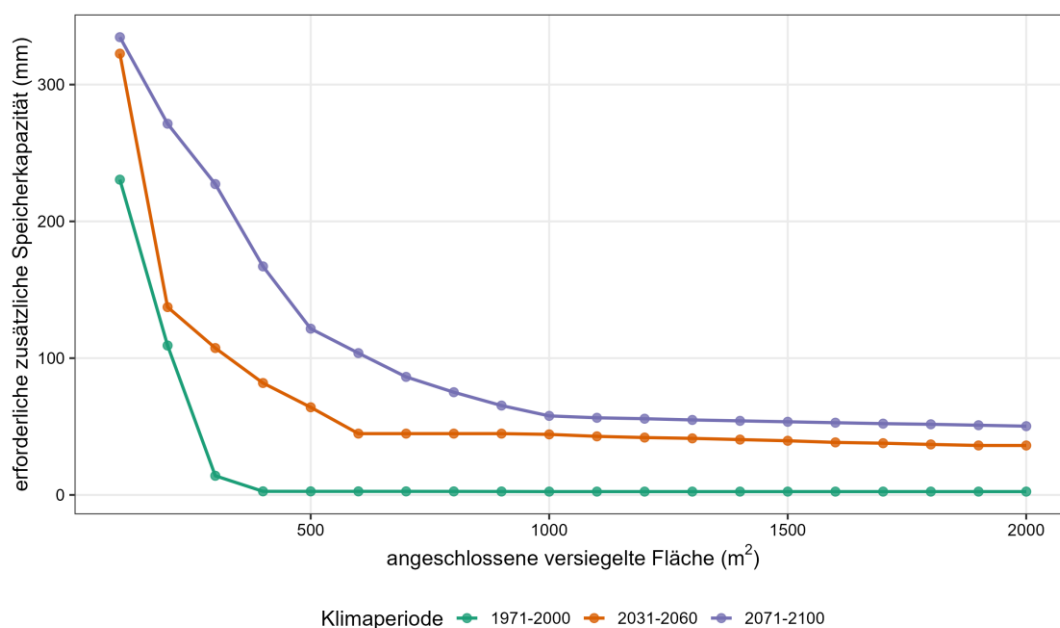


Abbildung 6. Einfluss der angeschlossenen versiegelten Fläche auf die erforderliche zusätzliche Speicherkapazität (mm) für eine 136 m² große Mulde, um den Bewässerungsbedarf über drei Klimaperioden (1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100) zu decken.

FF7: Wie können Konzepte der blau-grünen Infrastruktur optimiert werden, um auf beide gegensätzlichen Effekte des Klimawandels zu reagieren?

Für ein ausgefeiltes BGI-Konzept sollten zunächst Hotspots für Überflutungen und hohe thermische Belastungen identifiziert werden, um BGI strategisch zu platzieren. Die Beziehung zwischen Hitzestress und BGI-Standort ist relativ einfach, da Wärme typischerweise lokal entsteht und durch die Implementierung von BGI im gleichen Bereich effektiv gemindert werden kann. Die Beziehung zwischen Überflutungen und BGI-Standort ist hingegen komplexer.

Hitzestress: Ergebnisse des GIS-basierten Modells zur urbanen Hitzebelastung für die gesamte Stadt Innsbruck zeigten kaum Effekte einer flächendeckenden BGI-Implementierung auf die Reduzierung des stadtweiten Hitzestresses. Stattdessen sollten Städte spezifische Hitze-Hotspots identifizieren, die Kühlung benötigen, oder geplante „Cool Spots“ festlegen, die die Bewohner an heißen Tagen aufsuchen können. Um deren Effektivität und Zugänglichkeit zu maximieren, sollten diese Cool Spots über grüne oder kühle Alleen miteinander verbunden werden, sodass Menschen sie komfortabel erreichen können, ohne unterwegs übermäßiger Hitze ausgesetzt zu sein. Unsere Ergebnisse zeigen zudem den signifikanten Einfluss von Beschattung auf die Reduzierung des Hitzestresses und bestätigen, dass die Kombination aus wasserbewirtschaftenden BGI und Schatten spendender Vegetation die effektivste Strategie zur Steigerung der Resilienz urbaner Räume ist.

Überflutungen: Hotspots urbaner Überflutungen entstehen typischerweise durch eine Kombination aus Kanalüberläufen und Oberflächenabfluss, der aus weit entfernten Bereichen stammen kann. Daher reduziert die Installation von BGI in einem bestimmten Gebiet nicht unbedingt die Überflutung dort und kann sogar Bedingungen in nachgelagerten Bereichen beeinflussen. Die Modellierung der BGI-Effekte auf Mischwasserüberläufe (CSO) zeigte eine allgemeine Abnahme der CSOs stadtweit. Ähnliche Trends wurden für den Kanalüberstau und überflutete Flächen beobachtet, wenn versiegelte Flächen durch BGI entkoppelt wurden. Es wurde jedoch keine klare Korrelation zwischen dem Ausmaß der Entkopplung an spezifischen Standorten und dem Grad der Überflutungsreduktion gefunden. Dies zeigt, dass die Bestimmung der optimalen Standorte für Entkopplungen von mehreren lokalen Faktoren abhängt, einschließlich der angeschlossenen versiegelten Fläche in einem Bezirk, der Kanaleigenschaften und des verwendeten Bemessungsereignisses in der Simulation.

Insgesamt ist die Bestimmung optimaler Entkopplungsstandorte zur Reduzierung des Überflutungsrisikos nicht trivial und erfordert eine detaillierte Analyse. Da unter zukünftigen Klimabedingungen eine Zunahme der Niederschlagsintensität erwartet wird, muss die Kapazität der BGI erhöht werden, um denselben Schutzgrad zu gewährleisten. Verbesserungen der Kapazität können durch eine Erhöhung des Speichervolumens (Fläche und Tiefe) oder durch die Verbesserung der hydraulischen Leitfähigkeit des Filtermediums erreicht werden. Urbane Grünflächen, die keinen Abfluss von angrenzenden versiegelten Flächen erhalten, erzeugen bei starken Regenereignissen in der Regel keinen Oberflächenabfluss, vorausgesetzt, sie sind nicht stark verdichtet, auch unter zukünftigen Klimabedingungen.

Im Gegensatz dazu zeigen BGI-Systeme in Innsbruck, die Abfluss von versiegelten Flächen bewirtschaften, unter den derzeitigen Entwurfsstandards (5-jähriger Wiederkehrperiode) keinen signifikanten Trockenstress, und dies bleibt auch unter zukünftigen Bedingungen gültig. Daher sind für diese Systeme keine Anpassungen erforderlich. Tatsächlich könnte die angeschlossene versiegelte Fläche reduziert werden, während gleichzeitig eine ausreichende Wasserverfügbarkeit gewährleistet bleibt. Für BGI-Systeme mit externem Zufluss sind Substrate mit hohem Sandanteil und damit hoher

hydraulischer Leitfähigkeit vorteilhaft, da sie effektiv Staunässe und Überflutungen während Regenereignissen verhindern. Im Gegensatz dazu können Substrate mit höherem Lehm- und Tonanteil mehr Wasser speichern, um die Bodenfeuchte während längerer Trockenperioden aufrechtzuerhalten, weisen jedoch eine geringere hydraulische Leitfähigkeit auf, was zu häufigeren Überflutungen führen kann, insbesondere unter zukünftigen Klimabedingungen. Da sandbasierte Substrate mit externem Zufluss derzeit keinen signifikanten Wasserstress zeigen, selbst unter zukünftigen Bedingungen, sollten diese bevorzugt werden.

BGI ohne externen Zufluss, wie städtische Bäume und Rasenflächen, erzeugen wahrscheinlich keinen Oberflächenabfluss und haben daher minimalen Einfluss auf städtische Überflutungen, selbst bei extremen Ereignissen. Sie sind jedoch anfälliger für Trockenstress. Für diese BGI-Typen bieten lehmhaltige Böden eine bessere Leistung hinsichtlich Trockenstressresilienz und Oberflächenabflusskontrolle. Substrate mit höherem Tonanteil weisen hingegen eine geringere hydraulische Leitfähigkeit auf, erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Oberflächenabfluss und sollten daher vermieden werden.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Das Projekt analysierte umfassend die Folgen der globalen Erwärmung für städtische Systeme in alpinen Umgebungen sowie die Leistungsfähigkeit von blau-grüner Infrastruktur (BGI) als Anpassungsmaßnahme gegen Überflutungs-, Trocken- und Hitzebelastungen. Durch die Kombination von konvektionsaufgelösten Klimasimulationen, hydrologischen sowie GIS-basierten Modellierungen und räumlichen Analysen lieferte die Studie Innsbruck-spezifische Erkenntnisse, die auf andere Städte übertragbar sind.

Auswirkungen des Klimawandels

Klimaprojektionen zeigen eine deutliche Erwärmung von +2 bis +3 °C bis zur Mitte des Jahrhunderts und bis zu +6 °C bis zum Ende des Jahrhunderts unter dem RCP8.5-Szenario im Vergleich zu historischen Perioden. Die Winter werden voraussichtlich deutlich wärmer und feuchter, während die Spätsommer heißer und trockener werden. Obwohl die sommerlichen Gesamtniederschläge abnehmen, wird die Intensität extremer stündlicher Niederschläge zunehmen, was das Risiko von Extremniederschlagsereignissen verstärkt und gleichzeitig den sommerlichen Trockenstress erhöht. Diese Veränderungen werden die Land-Atmosphäre-Interaktionen, Evapotranspirations (ET) - Dynamik und Wasserverfügbarkeit in städtischen Systemen erheblich beeinflussen.

Leistungsfähigkeit von BGI

Die Leistung verschiedener BGI-Typen variiert stark, abhängig von deren Gestaltung und der Größe der angeschlossenen versiegelten Fläche:

- **Abflussmanagement:** BGI, die Abfluss von versiegelten Flächen aufnehmen (z. B. Baumgruben, Mulden, Raingardens), behalten ihre Leistungsfähigkeit auch unter zukünftigen Klimaszenarien bei und zeigen minimalen Dürrestress.
- **Wasserverfügbarkeit:** Isolierte Grünflächen (z. B. Rasenflächen, Baumbereiche, Gründächer) sind zunehmendem Trockenstress ausgesetzt und benötigen künftig deutlich mehr Bewässerung. Die Bewässerungsanforderungen für Rasenflächen und Gründächer dürften bis zum Ende des Jahrhunderts mehr als doppelt bis dreifach steigen.

- **Überflutungsreduktion:** Eine Reduktion der versiegelten Fläche, die an das Entwässerungssystem angeschlossen ist, um 30 %, kann das Überstauvolumen um bis zu 47 % und die überflutete Fläche bei Bemessungsregenereignissen (5 Jahre, 180 min) um rund 31 % verringern. Intensivere zukünftige Niederschläge erfordern jedoch eine zusätzliche Entkopplung der Flächen um 16–27 %, um das aktuelle Niveau hinsichtlich Mischwasserüberläufen aufrechtzuerhalten.
- **Retention und Speicherkapazität:** Systeme, die externen Abfluss managen, zeigen hohe Oberflächenretention, aber geringe Bodenspeicherkapazität, während großflächige BGI wie Baum- und Rasenflächen erheblichen Bodenspeicher bereitstellen. Böden mit hohem Sandanteil eignen sich am besten für das Abflussmanagement, während lehmige Böden die Trockenresilienz fördern.

Kühleffekte und Minderung von Hitzestress

BGI mit Bäumen und Wasserversorgung liefern die höchste Kühlleistung, mit täglichen ET-Raten von bis zu 8 mm/Tag an heißen Tagen. Ohne ausreichende Bodenfeuchte oder Abflusszufuhr sinkt die Kühlleistung jedoch stark ab. Eine stadtweite Umsetzung von BGI nach den aktuellen Planungsrichtlinien reduziert den städtischen Hitzestress allein nicht signifikant, da die begrünten Flächenanteile zu gering sind. Lokale Effekte sind jedoch erheblich: Gut bewässerte Flächen können den Universal Thermal Climate Index (UTCI) um bis zu 2,5 °C senken, während Beschattung ihn um bis zu 13,5 °C reduzieren kann. Abhängig von meteorologischen Bedingungen kann Hitzestress damit teilweise vollständig eliminiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination aus wasserführender BGI und beschattender Vegetation die effektivste Strategie zur Steigerung der urbanen thermischen Resilienz darstellt. Kühlbereiche sollten zudem strategisch über grüne oder kühle Alleen verbunden werden, sodass sich Fußgänger auch während Hitzewellen komfortabel durch die Stadt bewegen können.

Gestaltung von Vegetation und Boden

Die Auswahl der Vegetation muss auf lokale Wasserverfügbarkeit und Substratgestaltung abgestimmt sein. Zwei Strategien sind sinnvoll:

- Robuste, stressresistente Arten für Flächen mit begrenztem Wasser- und Bodenvolumen (z. B. Sedumarten, Gräser auf Gründächern).
- Hochleistungsvegetation (z. B. große Bäume) für konzipierte Standorte mit ausreichendem Boden- und Wasserangebot, die mehr Beschattung, Evapotranspiration und Aufenthaltsqualität bieten.

BGIs, die an versiegelte Flächen angeschlossen sind, können die Hochleistungsvegetation auch ohne zusätzliche Bewässerung unterstützen, selbst unter zukünftigen Klimabedingungen.

Optimierung von BGI für zukünftige Klimabedingungen

Um Resilienz unter prognostizierten Klimaextremen aufrechtzuerhalten, müssen BGI-Systeme so gestaltet sein, dass sie Perioden von Wasserüberschuss und -defizit überbrücken können. Eine erhöhte Substrattiefe und verbesserte hydraulische Leitfähigkeit sind entscheidend, um die Vegetationsgesundheit zu erhalten und lokale Überflutungen zu verhindern. Eine strategische,

räumlich gezielte Umsetzung in Hotspot-Bereichen für Hitze- und Überflutungsrisiken ist entscheidend, um messbare Vorteile auf Stadtebene zu erzielen.

Gesamtschlussfolgerungen

Der Klimawandel wird sowohl Trockenrisiken als auch die Überflutungsgefahr in alpinen Städten erhöhen, was integrierte Wassermanagementansätze erfordert. BGI ist eine wirksame und multifunktionale Anpassungsstrategie, deren Leistung jedoch stark von Gestaltung, Standort und Vernetzung abhängt. Die größten Vorteile ergeben sich aus gekoppelten Systemen, die sowohl Regenwasser managen als auch Schatten spenden, und so multifunktionale Landschaften schaffen, die Hitzestress reduzieren, Abfluss kontrollieren und die Vegetationsgesundheit sichern. Die Stadtplanung sollte daher über isolierte Begrünungsmaßnahmen hinausgehen und auf vernetzte, hydrologisch gekoppelte und beschattungsoptimierte BGI-Systeme setzen, um widerstandsfähige und lebenswerte Städte unter zukünftigen Klimabedingungen zu gewährleisten.

C) Projektdetails

6 Methodik

Die folgenden Unterüberschriften beschreiben die im Rahmen der einzelnen Arbeitspakete (APs) durchgeführten Aktivitäten hinsichtlich der eingesetzten Methoden, um die Ziele zu erreichen und die Forschungsfragen zu beantworten. Weitere Aktivitäten umfassten die Verbreitung der Zwischen- und Endergebnisse des Projekts.

6.1 Klimaszenarien & Datenbeschaffung

Für die Analyse des Klimawandels in Innsbruck und Umgebung wurden konvektionsauflösende Klimasimulationen (CPS) mit einer Auflösung von etwa 3 km verwendet. Als zentrale Datenbasis diente die CPS-DWD-MIROC5-CCLM5-0-16 Simulation (im Folgenden CPS-DWD), die kontinuierlichen Daten über 30-Jahres-Zeiträume für historisch (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100) für das Szenario RCP8.5 bereitstellt.

Da die Stationsmessungen (Flughafen Innsbruck) zeitlich nicht mit der historischen 30-Jahres-Periode überlappen, wurde für den Vergleich mit Beobachtungen und für die Einrichtung der Bias-Korrektur zusätzlich der Evaluationslauf HoKliSim-De (ERA5-gesteuerte CPS-DWD Simulation) für den Zeitraum 2000–2019 herangezogen. Als Beobachtungsreferenz wurden Messwerte der Lufttemperatur und des Niederschlags von der Station Flughafen Innsbruck verwendet.

Zur Einordnung der Projektionen aus CPS-DWD und zur Darstellung der Bandbreite möglicher Entwicklungen wurde außerdem ein Ensemble von fünf CPS-Simulationen aus dem CORDEX-FPSCONV-Projekt ausgewertet. Im Gegensatz zu CPS-DWD liegen diese Simulationen als Zeitscheiben über jeweils zehn Jahre vor (1996–2005, 2041–2050 und 2090–2099), basierend auf demselben Szenario (RCP8.5). Die Ensemble-Mitglieder, ihre Konfigurationen und die verantwortlichen Institutionen sind in Tabelle 7 dokumentiert.

Tabelle 7. Konvektionsauflösende Simulationen (CPS) für die Ensemble-Analyse, einschließlich antreibender globaler Klimamodelle und verantwortlicher Institutionen.

globales Klimamodell (GCM)	RCM/CPS Name	Institution/Konsortium
MIROC-MIROC5	CCLM5-0-16 (CPS-DWD)	CLMcom-DWD
ICHEC-EC-EARTH	CCLM5-0-9	CLMcom-CMCC
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	AROME41t1	CNRM
ICHEC-EC-EARTH	HCLIM38-AROME	HCLIMcom
MPI-M-MPI-ESM-LR	COSMO-crCLIM	CLMcom-ETH
MOHC-HadGEM2-ES	CCLM5-0-15	CLMcom-DWD

6.2 Bias-Korrektur der Klimadaten

Die Rohdaten von Klimamodellen weisen oftmals systematische Abweichungen im Vergleich zu Beobachtungen auf, insbesondere bei Temperatur und Niederschlag. Diese Unterschiede können durch die Modellauflösung, die Parametrisierung physikalischer Prozesse oder Unterschiede zwischen den betrachteten Zeiträumen entstehen. Da sich das Projekt auf hydrologische und mikroklimatische

Analysen im Stadtmaßstab stützt, wurden die verwendeten Klimasimulationen an lokale Beobachtungen angepasst.

Daher wurde eine Bias-Korrektur auf die CPS-DWD-MIROC5-CCLM5-0-16 Simulationen angewendet. Als Referenz dienten Beobachtungsdaten der Station Flughafen Innsbruck für den Zeitraum 2000–2019. Der HoKliSim-De Evaluationslauf (ERA5-getriebene CPS-DWD-Simulation für denselben Zeitraum) diente zur Einrichtung der Bias-Korrektur; die so abgeleiteten Korrekturparameter wurden anschließend in gleicher Weise auf CPS-DWD angewendet.

Ziel der Korrektur war es, die statistischen Verteilungen der simulierten und beobachteten Variablen anzugleichen, dabei jedoch das langfristige Klimaänderungssignal zu erhalten. Für Temperatur und Niederschlag wurden separate Verfahren genutzt. Für T_{min} und T_{max} wurde Quantile Delta Mapping (QDM) auf monatlicher Basis eingesetzt. Für stündlichen Niederschlag wurde ein temperatur-konditioniertes Quantile Mapping in Abhängigkeit von der Tagesmitteltemperatur verwendet, um die Verteilung der stündlichen Intensitäten einschließlich seltener hoher Werte konsistent zu justieren.

Die Wirkung der Bias-Korrektur für Temperatur (T_{max}, T_{min}) und stündlichen Niederschlag im direkten Vergleich von Modell und Beobachtung wird im Ergebnisabschnitt in Abbildung 1 dokumentiert. Zur ergänzenden methodischen Qualitätssicherung wurden zwei weitere Prüfungen durchgeführt, die insbesondere für Anwendungen im Stadtmaßstab relevant sind:

(i) **Jährliche Niederschlagssummen:** Die jährlichen Niederschlagssummen wurden zwischen Rohmodell, korrigiertem Modell und Beobachtungen verglichen (Abbildung 7). Dargestellt sind die Jahressummen für 2000–2019 aus Beobachtungen sowie aus CPS-DWD vor und nach Bias-Korrektur; die horizontalen Linien kennzeichnen jeweils den Mittelwert des betrachteten Zeitraums. Diese Darstellung dient als Plausibilitätsprüfung auf Jahresskala und dokumentiert, wie sich die Bias-Korrektur auf die Größenordnung der jährlichen Niederschlagsmengen im Vergleich zu den Messdaten auswirkt.

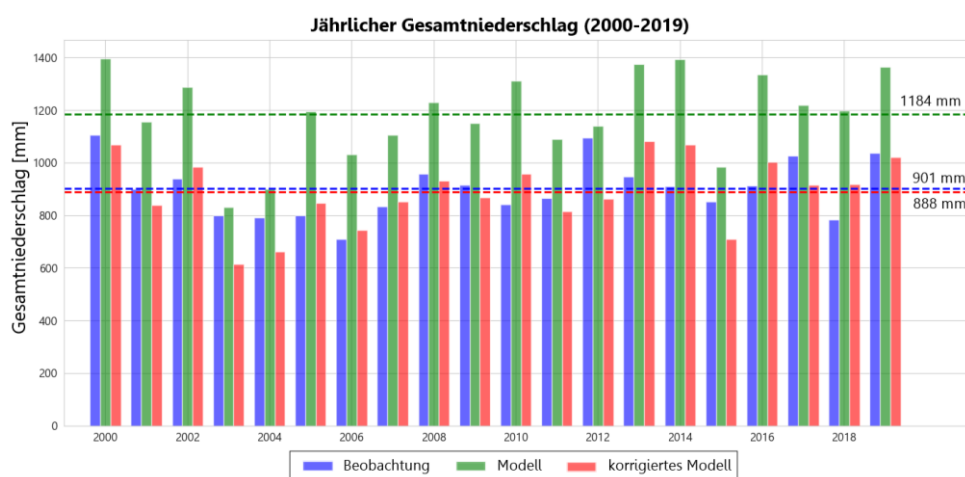


Abbildung 7. Jährliche Niederschlagssummen für 2000–2019 aus Beobachtungen (blau), unkorrigiertem CPS-DWD (grün) und korrigiertem CPS-DWD (rot). Die horizontalen Linien zeigen die Mittelwerte für jeden Datensatz.

(ii) **Clausius–Clapeyron-Skalierung:** Zur weiteren Prüfung der Konsistenz von simulierten Niederschlagsextremen wurde die Skalierungsbeziehung zwischen der täglichen Mitteltemperatur und dem 99,9. Perzentil der stündlichen Niederschläge analysiert (Abbildung 8). Erwartet wird näherungsweise eine Clausius–Clapeyron-Rate von etwa 7% Zunahme der Feuchtehaltekapazität pro Grad Celsius Erwärmung. In der Darstellung wird die Beziehung für Beobachtungen sowie für CPS-DWD

vor und nach Bias-Korrektur gegenübergestellt, wobei insbesondere der warme Temperaturbereich (z. B. oberhalb von 20°C) für konvektiv geprägte Starkregenereignisse relevant ist. Die Abbildung dient dazu zu dokumentieren, wie sich die Bias-Korrektur auf die temperaturabhängige Charakteristik sehr intensiver stündlicher Niederschläge auswirkt und ob die Skalierung im korrigierten Datensatz plausibel abgebildet wird.

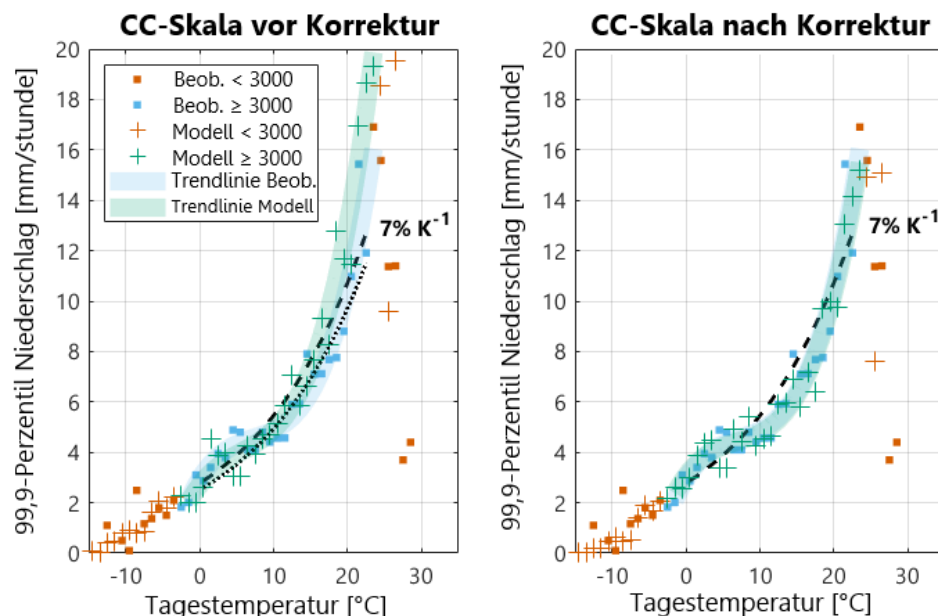


Abbildung 8. Clausius-Clapeyron-Skalierung des 99,9%-Perzentsils stündlicher Niederschläge im Vergleich zur Tagesmitteltemperatur vor (links) und nach (rechts) der Bias-Korrektur.

Die Modelldaten zeigen einen klaren Zusammenhang zwischen der Tagesmitteltemperatur und Extremniederschlägen. Ohne Korrektur tendieren die Projektionen dazu, im Vergleich zu Beobachtungen den Zusammenhang zwischen Erwärmung und Extremniederschlägen zu überschätzen. Im korrigierten Datensatz wird der Zusammenhang im Vergleich zu Messdaten plausibel abgebildet. Die Bias-Korrektur führt hier zu einer verbesserten Datenbasis für die Analyse zukünftiger Änderungen bei Starkregen.

6.3 Ensemble-Analyse konvektionsauflösender Simulationen

Neben dem Hauptdatensatz CPS-DWD wurde ein Ensemble von fünf weiteren konvektionsauflösenden Simulationen aus der CORDEX-FPSCONV-Initiative ausgewertet, um die Projektionen in einen breiteren Kontext zu setzen und die Bandbreite möglicher Entwicklungen abzuschätzen. Im Gegensatz zu CPS-DWD liegen diese Simulationen als 10-Jahres-Zeitscheiben vor, die die Zeiträume 1996–2005 (historischer Referenzzeitraum), 2041–2050 (nahe Zukunft) und 2090–2099 (ferne Zukunft) abdecken. Die Ensemble-Mitglieder, ihre Konfigurationen und die verantwortlichen Institutionen sind in Tabelle 7 (Abschnitt 6.1) dokumentiert.

Da die Ensemble-Zeitscheiben deutlich kürzer sind als die 30-jährigen CPS-DWD-Perioden, fokussiert die Ensembleauswertung auf robuste Kenngrößen, die auch für 10-Jahres-Zeiträume interpretierbar sind. Dafür wurden für jedes Ensemble-Mitglied (i) Änderungen der mittleren Temperatur und (ii) Änderungen des Niederschlags auf monatlicher, saisonaler und jährlicher Skala berechnet. Um die Modelle vergleichbar zu machen, wurden die Werte der Zukunftszeitscheiben jeweils relativ zur historischen Zeitscheibe des gleichen Modells ausgewertet (Modell-interner Vergleich), sodass

Unterschiede in der absoluten Niederschlags- oder Temperaturhöhe zwischen den Modellen nicht den Vergleich dominieren.

Der monatliche Verlauf des Niederschlags zeigt weitere Details zur saisonalen Umverteilung der Niederschläge (Abbildung 9). In der nahen wie in der fernen Zukunft zeigen beinahe alle Modelle über das Winterhalbjahr hinweg höhere Niederschlagswerte, insbesondere von Dezember bis April. Dagegen tendieren Spätsommer und besonders der August in mehreren Modellen zu niedrigeren Werten. Die Stärke dieser Veränderungen unterscheidet sich je nach Modell: So sind bei CCLM5-0-9 und COSMO-crCLIM die Rückgänge im Sommerhalbjahr deutlicher ausgeprägt, während AROME41t1 geringere Änderungen zeigt. CPS-DWD folgt demselben Gesamtmuster feuchterer Winter und trockenerer Sommer und liegt im August und September tendenziell am trockeneren Ende der in Abbildung 9 dargestellten Ensemble-Spannweite. Diese Darstellung dient dazu, die saisonale Struktur der Änderungen und die Modellstreuung über die Monate hinweg konsistent zu dokumentieren.

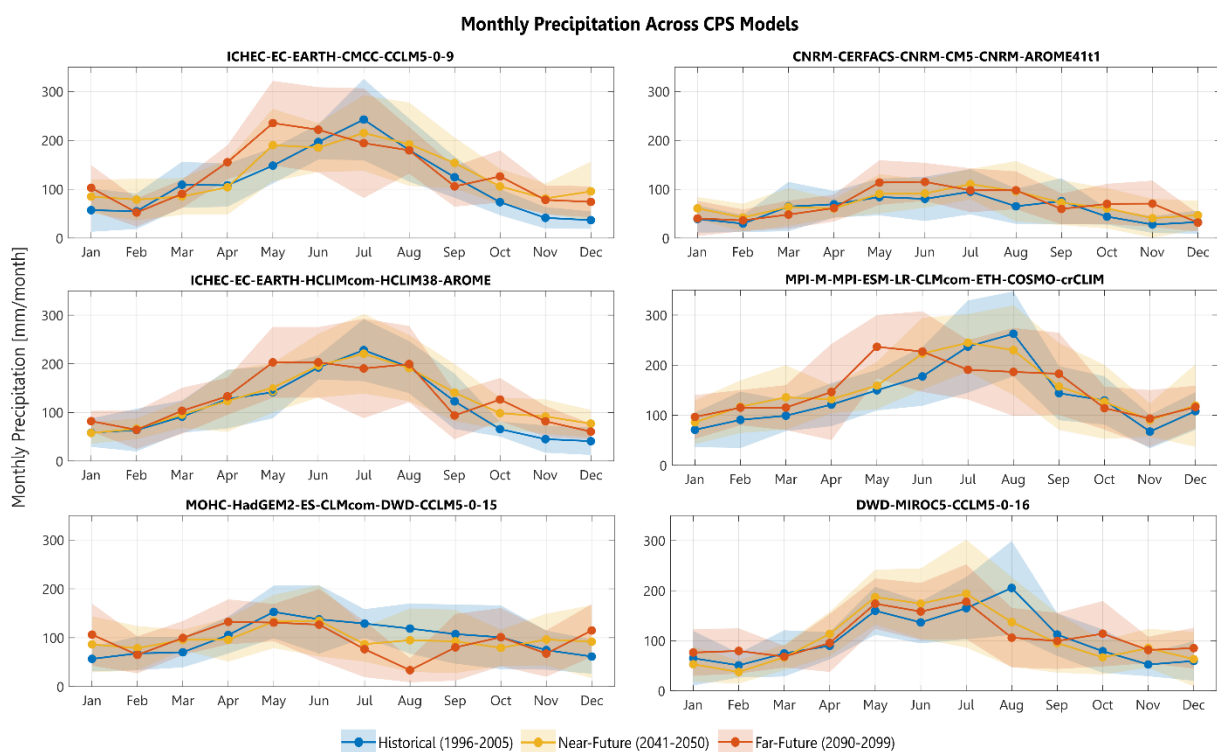


Abbildung 9. Monatlicher Niederschlag im CPS-Ensemble für Historie (blau), nahe Zukunft (orange) und ferne Zukunft (rot).

Die saisonalen Streudiagramme in Abbildung 10 zeigen das kombinierte Verhalten von Temperatur- und Niederschlagsanomalien für den Jahresmittelwert, Winter und Sommer. Jeder Punkt repräsentiert eine 10-Jahres-Periode eines Modells, dargestellt relativ zum historischen Referenzwert. Auf Jahresbasis liegen die Punkte bei positiven Temperaturänderungen, während die Niederschlagsanomalien zwischen den Modellen stärker streuen und sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Im Winter liegen die Punkte überwiegend in dem Bereich, der gleichzeitig höhere Temperaturen und höhere Niederschläge anzeigt. Im Sommer konzentrieren sich die Punkte dagegen stärker in dem Bereich, der höhere Temperaturen mit geringeren Niederschlägen kombiniert, wobei die Streuung zwischen den Modellen sichtbar bleibt. CPS-DWD ordnet sich in diese Muster ein und liegt im Sommer im Bereich der niedrigeren Niederschlagsänderungen innerhalb des Ensembles. Abbildung 10 dient damit als kompakte Übersicht, um die gemeinsame Lage von Temperatur- und

Niederschlagsänderungen sowie die saisonalen Unterschiede und die Streuung im Ensemble zu beschreiben.

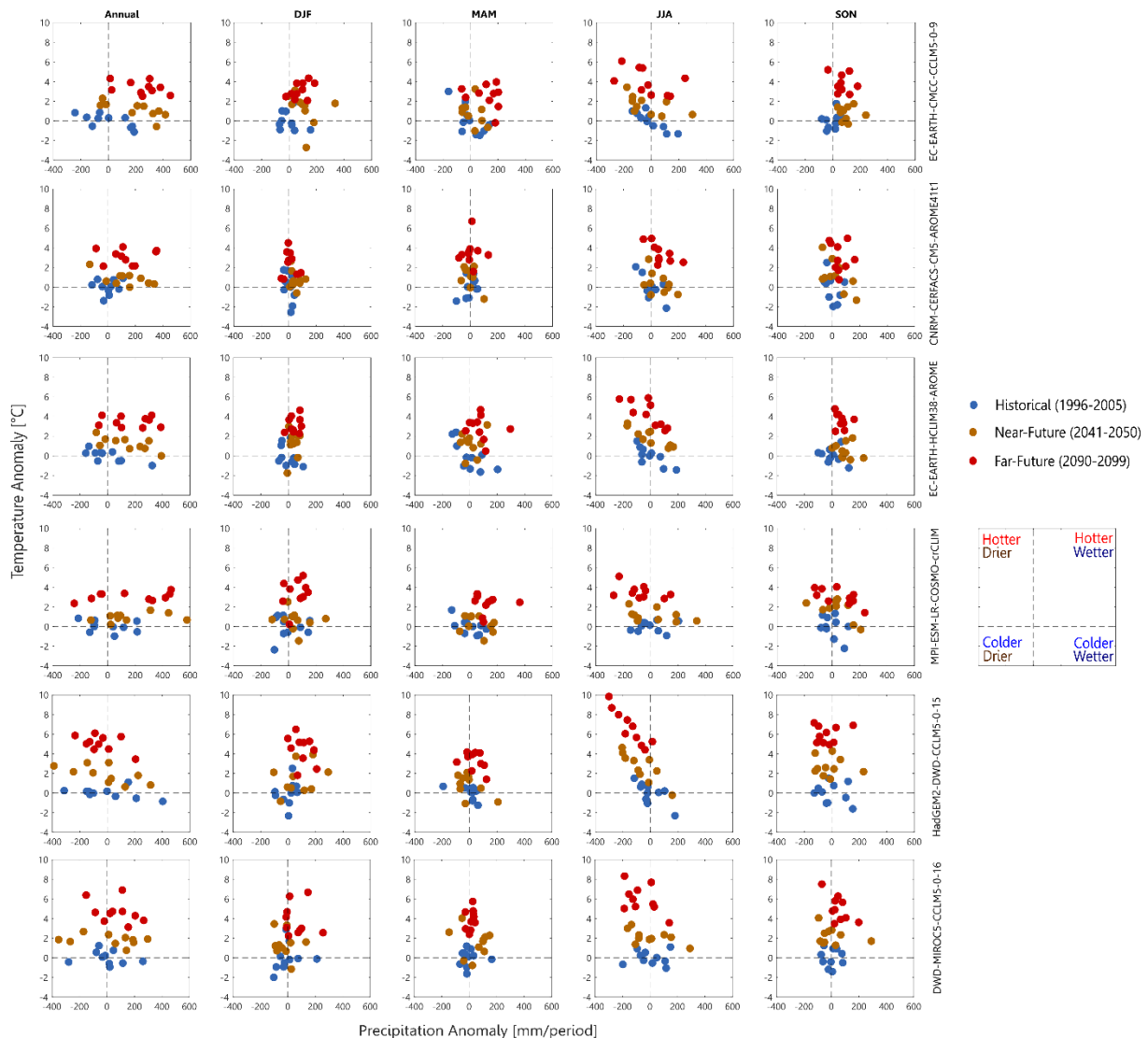


Abbildung 10. Ensemble-Streudiagramme von Mittelwerten für Temperatur und Niederschlag (Jahr, Winter, Sommer) für Historie (blau), nahe Zukunft (orange) und ferne Zukunft (rot).

6.4 Monitoring & Parametrisierung

Umfassende Messkampagnen wurden unter Einsatz von sechs Klimastationen durchgeführt. Aus diesen Beobachtungen wurde der Universal Thermal Climate Index (UTCI) abgeleitet, um die lokalen thermischen Bedingungen zu bewerten. Die gemessenen UTCI-Werte wurden anschließend mit den in AP5 modellierten Ergebnissen in Kontext gebracht, bei denen der UTCI für die gesamte Stadt Innsbruck berechnet wurde. Dies diente als Plausibilitätsanalyse, um die Konsistenz und Zuverlässigkeit der modellierten Daten im Vergleich zu den empirischen Messungen zu prüfen.

6.5 Hydrologische, Mikro- und Bioklimatische Modellierungen

Ein integrierter Modellierungsansatz wurde in AP4 aufgebaut, welcher folgende Komponenten umfasst: (1) ein hydrodynamisches 1D-Modell des städtischen Kanalisationsnetzes zur Berechnung des Überstauvolumens, (2) ein gekoppeltes 1D/2D-Modell auf Basis von zellulären Automaten zur

Berechnung der Überflutungsfläche, (3) ein konzeptionelles Modell für Mischwasserüberläufe, (4) ein Wasserbilanzmodell, basierend auf einem Niederschlag-Abfluss-Modell mit einer Erweiterung zur verbesserten Verdunstungsberechnung für Wasserbilanz, Trockenstress und Bewässerungsbedarf, und (5) ein GIS-basiertes Modell für Energiebilanzen, städtische Überhitzung und Hitzestress. Jedes integrierte Modell verfügt über unterschiedliche zeitliche und räumliche Auflösungen und ist speziell darauf ausgelegt, bestimmte Leistungsindikatoren zu berechnen.

Modellierung städtischer Überflutung

Das Stormwater Management Model – SWMM (Rossman, 2015) wurde verwendet, um das Kanalisationsnetz von Innsbruck zu simulieren. Das 1D-SWMM-Modell umfasst 6.853 Leitungen, 6.471 Knoten und 137.513 Teilgebiete mit einer insgesamt kalibrierten Fläche von 794,2 ha (Herzog, 2024). Das Modell wurde durch den Vergleich seiner Ergebnisse mit Pegelmessdaten für zehn beobachtete Niederschlagsereignisse im Jahr 2023 kalibriert. Das 1D-SWMM-Modell der Stadt Innsbruck wurde mit einem zellulären Automaten (CA)-basierten Oberflächenmodell in einem „Fast-Flood Model“ namens „Dynamic CA-ffé“ gekoppelt. Dieses Modell basiert auf dem CA-ffé-Framework von Jamali et al. (2019) und wurde von Gholami Korzani et al. (2026) und Hauser et al. (2025) weiterentwickelt. Es nutzt CA, um die Topographie zu integrieren und Überflutungen anhand einfacher Übergangsregeln zu simulieren, was eine effiziente Hochauflösungs-Vorhersage von Überflutungen ermöglicht. Dynamic CA-ffé (Gholami Korzani et al., 2026) kombiniert eine 2D-Simulation des Oberflächenabflusses mit einer dynamischen Abwasserableitung und gewährleistet die kontinuierliche Interaktion zwischen Oberflächen- und Untergrundabfluss durch kontinuierlichen Datenaustausch; Hauser et al. (2025) lieferten eine angepasste Version für alpine Fallstudien.

Modellierung von Mischwasserüberläufen

Ein konzeptionelles Modell des Fallgebiets Innsbruck wurde in der Software KAREN (Rauch, W. & Kinzel, H., 2007) erstellt, das das Abflussverhalten des ausgewählten Mischwassersystems abbilden kann. Die Simulation basiert auf mehrjährigen Niederschlagsreihen (≥ 10 Jahre) (Kleidorfer und Rauch, 2011) und stellt das Netzwerk auf Basis von Einzugsgebieten dar. Das Modell wird für aktuelle und zukünftige Szenarien berechnet und anschließend mit den Auswirkungen von Urbanisierung und Entkopplungsmaßnahmen verglichen.

Modellierung der Wasserbilanz

Das SWMM-UrbanEVA-Niederschlag-Abfluss-Modell (Hörnschemeyer et al., 2021) wurde verwendet, um die Wasserbilanz in Innsbruck zu simulieren. Das Modell basiert sowohl auf dem kalibrierten 1D-SWMM-Kanalnetzmodell als auch auf hochauflösenden Luftbilddaten. Mit Hilfe der Luftbilddaten wurde das gesamte Stadtgebiet in sechs Landnutzungsklassen mit einer Auflösung von 0,2 m unterteilt: Gebäude, Gründächer, Verkehrsflächen, Wasser, Vegetation < 2 m Höhe und Vegetation > 2 m Höhe. Die Landnutzungsklassen Gebäude und Verkehrsflächen wurden mit den Teilgebieten des Kanalnetzmodells verglichen, und alle Gebäude sowie Verkehrsflächen im Wasserbilanzmodell wurden mit Entkopplungsmaßnahmen (Sickerschächte und Mulden) verbunden, die im Kanalnetzmodell nicht vorhanden sind. Alle versiegelten Flächen wurden im Wasserbilanzmodell als einfache Teilgebiete implementiert, und die Gründächer, Vegetation und Entkopplungsmaßnahmen wurden als SWMM-LID-Module abgebildet.

Modellierung des Hitzestresses

Für die Analyse von Land-Atmosphäre-Interaktionen, insbesondere der Oberflächenenergieflüsse, Oberflächentemperatur, Evapotranspiration und des Universal Thermal Climate Index (UTCI), wurde ein GIS-basiertes Modellierungsverfahren eingesetzt. Letzterer ist ein Index zur Bestimmung des menschlichen Hitzestresses. Der Modellierungsansatz basiert auf früheren Studien von Back et al. (2023) und Back et al. (2024) und wurde angepasst, um die Modellierung aller Parameter auf stadtweiter Ebene zu ermöglichen. Die Berechnungen basieren auf Falschfarben Infrarotbildern (Colour Infrared - CIR), einer Art multispektraler Aufnahmen, die Informationen im nahen Infrarot-, Rot- und Grünbereich des elektromagnetischen Spektrums erfassen. Diese sind besonders nützlich zur Analyse des Vegetationszustands oder der Landbedeckung, da unterschiedliche Vegetationstypen unterschiedliche Reflexions- und Absorptionsmuster aufweisen. Beispielsweise korrelieren bestimmte Reflexionsmuster von Vegetation mit Wasserbedingungen, wie Trockenstress. Die räumliche Auflösung der Eingangs-CIR-Daten bestimmt die räumliche Genauigkeit der Ausgabedaten, hier 0,2 m. Die Modellierung wurde in ArcGIS Pro 3.3 (ESRI, 2019) durchgeführt.

6.6 Optimierte Lösungsansätze für entgegengesetzte Ziele

Mit dem in AP4 entwickelten integrierten Modellierungsansatz wurde das Potenzial von Entkopplungsmaßnahmen und der Umsetzung von BGI untersucht, um das städtische Überflutungsrisiko zu verringern, die Wasserbilanz zu verbessern und das urbane Klima in der Stadt Innsbruck zu optimieren. Die Auswirkungen unterschiedlicher Anteile entkoppelter Flächen und BGI-Umsetzungen wurden simuliert und analysiert, indem 30 % der Straßenflächen (Fahrbahnen und Gehwege) sowie der Dachflächen entkoppelt wurden. Die BGI wurden gemäß den österreichischen Richtlinien dimensioniert (ÖWAV Regelblatt 45, 2015).

7 Arbeits- und Zeitplan

Alle Projektaktivitäten wurden gemäß dem ursprünglichen Zeitplan, der in Abbildung 11 dargestellt ist, durchgeführt. Die geplanten Arbeitspakete, Meilensteine und Ergebnisse wurden innerhalb des definierten Zeitrahmens abgeschlossen, ohne nennenswerte Abweichungen oder Verzögerungen. Die Koordination zwischen Modellierung, Datenanalyse und Berichterstellungsphasen gewährleistete einen reibungslosen Arbeitsablauf und die fristgerechte Lieferung aller Ergebnisse. Folglich verlief das Projekt wie ursprünglich geplant und erreichte alle gesetzten Ziele.

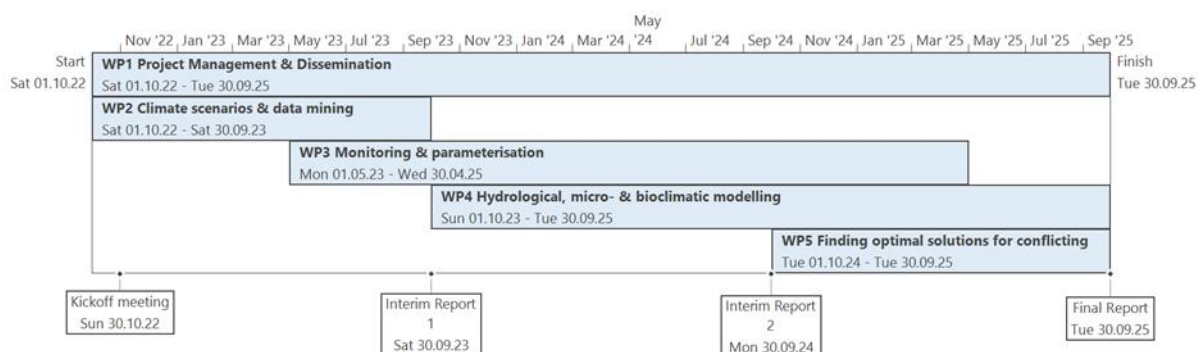


Abbildung 11. Gantt-Diagramm des Projektablaufplans.

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

8.1 Publikationen

- Back, Y., Jasper-Tönnies, A., Bach, P. M., Kumar, P., Santamouris, M., Rauch, W. & Kleidorfer, M. (2025). Current interventions are inadequate to maintain cities' resilience during concurrent drought and excessive heat. *Earth's Future*, 10.1029/2024EF005208.
- Hauser, M., Back, Y., Rauch, W. & Kleidorfer, M. (2025): Assessing combined sewer overflow performance under climate projections and urban development. *Journal of Hydrology*.
- Back, Y., Funke, F., Hauser, M., Kelvin, J., Jasper-Tönnies, A., Leitinger, G. & Kleidorfer, M. (2025). Planung von Blau-Grüner Infrastruktur – Integrierte Modellierung hinsichtlich urbaner Überflutungen, Wasserbilanz und Stadtklima. *Aqua & Gas, Switzerland*, N° 10, 16-21.
- Back, Y., Bach, P. M., Santamouris, M., Rauch, W. & Kleidorfer, M. (2024). Role of surface energy fluxes in urban overheating under buoyancy-driven atmospheric conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129, e2023JD039723.
- Huynh Thi Ngoc, C.; Back, Y.; Funke, F.; Hauser, M.; Kleidorfer, M. (2024): Implementation of Nature-Based Solutions in Urban Water Management in Viet Nam, a Comparison among European and Asian Countries. In: *Sustainability* 16/20, Nr. 8812.

8.2 Konferenzbeiträge

- Hauser, Martina; Kelvin, Jaya; Kleidorfer, Manfred (2025): Die Zukunft des urbanen Entwässerungsmanagements: Auswirkungen von Klimawandel- und Stadtentwicklungsszenarien
In: *Aqua Urbanica 2025*, 21.-23.09.2025, Rapperswil. Urbanes Regenwasser bewirtschaften: Herausforderungen – Lösungen – Visionen. Graz: Technische Universität Graz., No. P08.
(<https://doi.org/10.3217/vk45c-8zx84>)
- Back, Yannick; Funke, Fabian; Hauser, Martina; Kelvin, Jaya; Jasper-Tönnies, Alrun; Leitinger, Georg; Kleidorfer, Manfred (2025): Planung von Blau-Grüner Infrastruktur auf Stadtebene unter Berücksichtigung von urbanen Überflutungen, Wasserbilanz und Stadtklima. In: *Aqua Urbanica 2025*, 21.-23.09.2025, Rapperswil. Urbanes Regenwasser bewirtschaften: Herausforderungen – Lösungen – Visionen. Graz: Technische Universität Graz., No. P08.
(<https://doi.org/10.3217/dvm47-cb518>)
- Funke, Fabian; Huynh Thi Ngoc, Chau; Grimme, Viktoria; Ambrosi, Lisa; Back, Yannick; Kelvin, Jaya; Jasper-Tönnies, Alrun; Hörnschemeyer, Birgitta; Leitinger, Georg; Kleidorfer, Manfred (2025): Wasserhaushalt und Kühlpotential städtischer Freiräume im aktuellen und zukünftigen Klima. In: *Aqua Urbanica 2025*, 21.-23.09.2025, Rapperswil. Urbanes Regenwasser bewirtschaften: Herausforderungen – Lösungen – Visionen. Graz: Technische Universität Graz., No. P08.
(<https://doi.org/10.3217/0h1zj-edv88>)
- Funke, Fabian; Ambrosi, Lisa; Back, Yannick; Kelvin, Jaya; Jasper-Tönnies, Alrun; Hörnschemeyer, Brigitta; Leitinger, Georg; Kleidorfer, Manfred (2024): Einfluss des Klimawandels auf Blau-Grüne Infrastruktur in Städten: Modellierung von Wasserbilanz, Bewässerungsbedarf und

Trockenstress.

In: Tagungsband der Aqua Urbanica 2024 - Urbanes Niederschlagswassermanagement: Herausforderungen - Möglichkeiten - Grenzen. 22.-24.09.2024, Graz. Graz: Technische Universität Graz., S. V03 - 1 - V03 - 12. (<https://doi.org/10.3217/xsxt-b4373>)

Back, Yannick; Ambrosi, L.; Funke, F.; Hauser, M.; Leitinger, G.; Kleidorfer, Manfred (2024): Die Rolle der Bewässerung städtischer Grünflächen während gleichzeitiger Trocken- und Hitzeperioden. In: Tagungsband der Aqua Urbanica 2024 - Urbanes Niederschlagswassermanagement: Herausforderungen - Möglichkeiten - Grenzen. 22.-24.09.2024, Graz. Graz: Technische Universität Graz., S. P01-1 - P01-7. (https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/c76c507b-d7bb-4008-944c-284302b6351a/PDFs/2024/Beitraege/P01-BACK-Beitrag.pdf)

Hauser, Martina; Back, Yannick; Kleidorfer, Manfred (2024): Future challenges for urban drainage systems regarding combined sewer overflow emissions. In: Proceedings of the 16th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2024). Delft, June, 2024. Delft: Delft University of Technology., S. 1 - 4.

Back, Yannick; Ambrosi, Lisa; Funke, Fabian; Leitinger, Georg; Kleidorfer, Manfred (2024): Balancing urban heat and water scarcity: The role of urban green space irrigation during compound drought-heatwave events. In: Proceedings of the 16th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2024). Delft, June, 2024. Delft: Delft University of Technology.

Ambrosi, Lisa; Kleidorfer, Manfred; Einfalt, Thomas; Back, Yannick; Jasper-Tönnies, Alrun; Fennig, Claudia; Hauser, Martina; Funke, Fabian; Leitinger, Georg (2024): Balancing Urban Heat, Flood and Water Scarcity: Blue-Green Infrastructure in Alpine Cities. In: EGU sphere: EGU - General Assembly 2024 - Book of Abstracts. Vienna, Austria & Online | 14–19 April 2024. Göttingen: Copernicus., No. EGU24-15236. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-15236>

Hauser, Martina; Back, Yannick; Kleidorfer, Manfred (2023): Künftige Herausforderungen für städtische Entwässerungssysteme in Bezug auf Emissionen aus Mischwasserüberläufen. In: Helmreich, B.; Rosenberger, L.; Stinshoff, P.: Tagungsband Aqua Urbanica 2023. „Die wasser- und schadstoffbewusste Stadt – Klimaangepasstes Regenwassermanagement trifft Schadstoffproblematik“. am 09./10. Oktober 2023 in Garching bei München, Deutschland. Graz: Technische Universität Graz (= Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft Technische Universität München, 227)., S. 291 - 296. https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/c76c507b-d7bb-4008-944c-284302b6351a/PDFs/2023/Tagungsband/Tagungsband_AU2023.pdf

Back, Yannick; Jasper-Tönnies, A.; Leitinger, G.; Einfalt, T.; Ferk, I.; Ambrosi, L.; Funke, F.; Hauser, M.; Huynh Thi Ngoc, C.; Kleidorfer, M. (2023): More blue along the green infrastructure to improve drought resilience in Alpine cities. In: Proceedings of the NOVATECH 2023. Lyon, France, Jul 2023. Lyon: Graie., No. HAL-04184757. (<https://hal.science/hal-04184757/document>)

Funke, Fabian; Reinstaller, Stefan; Kleidorfer, Manfred (2023): Impact of urban drainage malfunctions and blue-green measures on urban flooding. In: Proceedings of the NOVATECH 2023. Lyon, France, Jul 2023. Lyon: Graie., No. hal-0417696. (<https://hal.science/hal-04176963v1>)

Hauser, Martina; Back, Yannick; Jasper-Tönnies, Alrun; Kleidorfer, Manfred (2023): Future challenges for urban drainage systems regarding combined sewer overflow emissions. In: Proceedings of the NOVATECH 2023. Lyon, France, Jul 2023. Lyon: Graie., No. hal-04185047. (<https://hal.science/hal-04185047>)

Funke, Fabian; Reinstaller, Stefan; Kleidorfer, Manfred (2023): Dezentrale Siedlungsentwässerung zur Anpassung an klimawandelinduzierte Starkregenereignisse. In: Helmreich, B.; Rosenberger, L.; Stinshoff, P.: Tagungsband Aqua Urbanica 2023. „Die wasser- und schadstoffbewusste Stadt – Klimaangepasstes Regenwassermanagement trifft Schadstoffproblematik“. am 09./10. Oktober 2023 in Garching bei München, Deutschland. Graz: Technische Universität Graz (= Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft Technische Universität München, 227), S. 277 - 283. (https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/c76c507b-d7bb-4008-944c-284302b6351a/PDFs/2023/Tagungsband/Tagungsband_AU2023.pdf)

8.3 Präsentationen an Konferenzen

Präsentationen:

Aqua Urbanica 2025, Rapperswil, 22.09.2025. Presenter: Back, Yannick Co-Authors: Funke, Fabian; Hauser, Martina; Kelvin, Jaya; Jasper-Tönnies, Alrun; Leitinger, Georg; Kleidorfer, Manfred: Planung von Blau-Grüner Infrastruktur auf Stadtebene unter Berücksichtigung von urbanen Überflutungen, Wasserbilanz und Stadtklima.

Aqua Urbanica 2025, Rapperswil, 22.09.2025. Presenter: Hauser, Martina Co-Authors: Kelvin, Jaya; Kleidorfer, Manfred: Die Zukunft des urbanen Entwässerungsmanagements: Auswirkungen von Klimawandel- und Stadtentwicklungsszenarien.

13th Urban Drainage Modelling Conference 2025, Innsbruck, 15.-19.09.2025. Presenter: Back, Yannick, Co-Authors: Hauser, Martina; Funke, Fabian; Kelvin, Jaya; Jasper-Tönnies, Alrun; Leitinger, Georg; Kleidorfer, Manfred: Integrated modelling of multi-purpose adaptation measures to optimise water management and mitigate flood, drought and heat risks.

25. Österreichische Klimatag, Innsbruck, 24.04.2025. Presenter: Back, Yannick Co-Authors: Ambrosi, L.; Funke, F.; Hauser, M.; Jasper-Tönnies, A.; Kelvin, J.; Einfalt, T.; Huynh Thi Ngoc, C.; Leitinger, G.; Kleidorfer, M.: BlueGreenCities - Blue-Green Infrastructure for Improving Resilience to Floods and Droughts in Alpine Cities.

ÖWAV-Tagung: KARL - Auswirkung auf Mischwasserentlastung und Regenwassermanagement, Innsbruck, 04.02.2025. Presenter: Hauser, Martina: Integrierte Pläne und Klimawandel - Zukünftige Herausforderungen für Mischwasserentlastungen hinsichtlich Klimawandel, Stadtentwicklung und Richtlinien

Aqua Urbanica 2024 - Urbanes Niederschlagswassermanagement: Herausforderungen - Möglichkeiten - Grenzen, Graz, 23.09.2024. Presenter: Funke, Fabian Co-Authors: Ambrosi, Lisa; Back, Yannick; Kelvin, Jaya; Jasper-Tönnies, Alrun; Hörnschemeyer, Brigitta; Leitinger, Georg; Kleidorfer, Manfred: Einfluss des Klimawandels auf Blau-Grüne Infrastruktur in Städten: Modellierung von Wasserbilanz, Bewässerungsbedarf und Trockenstress.

16th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2024), Delft, 12.06.2024. Presenter: Hauser, Martina Co-Authors: Back, Yannick; Kleidorfer, Manfred: Future challenges for urban drainage systems regarding combined sewer overflow emissions.

16th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2024), Delft, 12.06.2024. Presenter: Back, Yannick Co-Authors: Ambrosi, Lisa; Funke, Fabian; Leitinger, Georg; Kleidorfer, Manfred: Balancing urban heat and water scarcity: The role of urban green space irrigation during compound drought-heatwave events.

Aqua Urbanica 2023 - Die wasser- und schadstoffbewusste Stadt, Garching, 10.10.2023. Presenter: Funke, Fabian Co-Authors: Reinstaller, Stefan; Kleidorfer, Manfred: Dezentrale Siedlungsentwässerung zur Anpassung an klimawandelinduzierte Starkregenereignisse.

Aqua Urbanica 2023 - Die wasser- und schadstoffbewusste Stadt, Garching, 10.10.2023. Presenter: Hauser, Martina Co-Authors: Back, Yannick; Kleidorfer, Manfred: Künftige Herausforderungen für städtische Entwässerungssysteme in Bezug auf Emissionen aus Mischwasserüberläufen.

40th IAHR World Congress 2023, Wien, 24.08.2023. Presenter: Hauser, Martina Co-Authors: Back, Yannick; Kleidorfer, Manfred: Future challenges for urban drainage systems in mountain regions.

40th IAHR World Congress 2023, Wien, 24.08.2023. Presenter: Back, Yannick Co-Authors: Jasper-Tönnies, Alrun; Bach, Peter; Kumar, Prashant; Rauch, Wolfgang; Kleidorfer, Manfred: Beyond current interventions to increase cities' resilience to water scarcity.

Novatech 2023 - L'eau dans la ville/Urban water, Lyon, 06.07.2023. Presenter: Funke, Fabian Co-Authors: Reinstaller, Stefan; Kleidorfer, Manfred: Impact of urban drainage malfunctions and blue-green measures on urban flooding.

Poster Präsentationen:

Aqua Urbanica 2025, Rapperswil, 22.09.2025. Presenter: Kleidorfer, Manfred Co-Authors: Funke, Fabian; Huynh Thi Ngoc, Chau; Grimme, Viktoria; Ambrosi, Lisa; Back, Yannick; Kelvin, Jaya; Jasper-Tönnies, Alrun; Hörnschemeyer, Birgitta; Leitinger, Georg: Wasserhaushalt und Kühlpotential städtischer Freiräume im aktuellen und zukünftigen Klima.

25. Österreichische Klimatag, Innsbruck, 24.04.2025. Presenter: Back, Yannick Co-Authors: Ambrosi, L.; Funke, F.; Hauser, M.; Jasper-Tönnies, A.; Kelvin, J.; Einfalt, T.; Huynh Thi Ngoc, C.; Leitinger, G.; Kleidorfer, M.: BlueGreenCities - Blue-Green Infrastructure for Improving Resilience to Floods and Droughts in Alpine Cities.

Aqua Urbanica 2024 - Urbanes Niederschlagswassermanagement: Herausforderungen - Möglichkeiten - Grenzen, Graz, 23.09.2024. Presenter: Back, Yannick Co-Authors: Ambrosi, L.; Funke, F.; Hauser, M.; Leitinger, G.; Kleidorfer, M.: Die Rolle der Bewässerung städtischer Grünflächen während gleichzeitiger Trocken- und Hitzeperioden.

European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2024, Wien, 17.04.2024. Presenter: Ambrosi, L. Co-Authors: Kleidorfer, M.; Einfalt, T.; Back, Y.; Jasper-Tönnies, A.; Fennig, C.; Hauser, M.; Funke, F.; Leitinger, G.: Balancing Urban Heat, Flood and Water Scarcity: Blue-Green Infrastructure in Alpine Cities.

Novatech 2023 - L'eau dans la ville/Urban water, Lyon, 04.07.2023. Presenter: Back, Y. Co-Authors: Jasper-Tönnies, A.; Leitinger, G.; Einfalt, T.; Ferk, I.; Ambrosi, L.; Funke, F.; Hauser, M.; Huynh Thi Ngoc, C.; Kleidorfer, M.: More blue along the green infrastructure to improve drought resilience in Alpine cities.

Novatech 2023 - L'eau dans la ville/Urban water, Lyon, 04.07.2023. Presenter: Hauser, Martina Co-Authors: Back, Yannick; Jasper-Tönnies, Alrun; Kleidorfer, Manfred: Future challenges for urban drainage systems regarding combined sewer overflow emissions.

8.4 Abschlussarbeiten

Bachelorarbeiten:

1. Jacob Brunner (2025) - Blau-Grüne Infrastruktur zur Minderung der urbanen Hitze und des menschlichen Hitzestress
2. Loris Matzohl (2025) - Dimensionierung und Optimierung Blau – Grüner Infrastrukturen zur Verringerung des Trockenstress und Steigerung der Verdunstungskühlung
3. Patrick Schwarz (2025) - Blau-Grüne Infrastruktur zur Verbesserung der Energieund Wasserbilanz: Oberflächentemperatur und Verdunstung
4. Katharina Scheckinger (2025) – Modellstudie: Potenzial von kleinen Stadtbächen zur urbanen Hitzeminderung
5. Noah Kneissl (2025) - Bach to the future: Reaktivierung der kleinen Sill in Innsbruck zur Temperaturminderung an Hitzetagen
6. Anna Zillinger (2025) - Analyse des Mikroklimas am DDr.-Alois-Lugger-Platz in Innsbruck mittels ENVI-met
7. Jana Jenewein (2024) - Erfassung dezentraler Versickerungsanlagen in Innsbruck
8. Felina Bothur (2024) - Zustandserfassung von dezentralen Versickerungsanlagen in Innsbruck
9. Peter Winkler (2024) - Klimawandelauswirkungen auf Dezentrale Anlagen
10. Jannik Löffler (2024) - Zustandserfassung von urbanen Grünflächen
11. Rafael Steinwandter (2024) - Auswirkungen des aktuellen Zustands auf die Infiltrationsleistung von dezentralen Versickerungsanlagen in Innsbruck
12. Manuel Summerer (2024) - Auswirkungen des Alters auf die Infiltrationsleistung von dezentralen Versickerungsanlagen (Innsbruck)
13. Aaron Senoner (2024) - Wasserverbrauch und Wasserressourcen in der Gemeinde Innsbruck
14. Stefan Hupfaut (2024) - Bilanzierung zukünftiger Wasserbedarf Innsbruck unter Klimawandelbedingungen

Masterarbeiten:

1. Veronika Grimme (2025) - Zukunftsfähige Stadtplanung: Der Einfluss blauer und grüner Infrastruktur auf die Wasserbilanz im urbanen Raum
2. Maximilian Franz Osenstätter (2025) - Blau-Grüne Infrastruktur zur Bewältigung der städtischen Hitzeproblematik: Untersuchungen des Einflusses auf die Energie und Wasserbilanz am Beispiel Innsbruck

3. Antonia Herzog (2024) - Hydrodynamische Kanalnetzberechnung der Stadt Innsbruck

Dissertationen:

Die folgenden Doktorandinnen und Doktoranden waren an dem Projekt beteiligt:

1. *Dipl.-Ing. Martina Hauser*

Laufende Dissertation. Voraussichtlicher Abschluss: März 2026

2. *Fabian Funke, M.Sc.*

Laufende Dissertation. Voraussichtlicher Abschluss: Februar 2026

3. *Chau Huynh Thi Ngoc, M.Sc.*

Laufende Dissertation. Voraussichtlicher Abschluss: Ende 2026

8.5 Geplante Publikationen

Back, Yannick; Bach, Peter; Jasper-Tönnies, Alrun; Leitinger, Georg; Rauch, Wolfgang; Kleidorfer, Manfred (under review). A global index quantifying surface energy partitioning and land-atmosphere dynamics. Under Review. In: Nature communications earth & environment.

Hauser, Martine; Kelvin, Jaya; Kleidorfer, Manfred (submitted): Potential of mitigation strategies to compensate climate change impacts on the urban drainage network and pluvial flood hazard, submitted to Water Science and Technology, Special Issue: Flooding 2025 on 07.11.2025.

Back, Yannick; Hauser, Martine; Funke, Fabian; Kelvin, Jaya; Jasper-Tönnies, Alrun; Leitinger, Georg; Kleidorfer, Manfred (in preperation). Integrated modelling of multi-purpose adaptation measures to optimise water management and mitigate flood, drought and heat risks.

Huynh Thi Ngoc, Chau; Funke, Fabian; Grimme, Veronika; Kelvin, Jaya; Kleidorfer, Manfred (in preperation). Impacts of climate change on performance of Nature-Based Solutions in urban areas: an evaluation on water balance and cooling effects.

Referenzen

Back, Y., Bach, P. M., Santamouris, M., Rauch, W. & Kleidorfer, M. (2024). Role of surface energy fluxes in urban overheating under buoyancy-driven atmospheric conditions. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 129, e2023JD039723.

BACK, Y., KUMAR, P., BACH, P. M., RAUCH, W. & KLEIDORFER, M. 2023. Integrating CFD-GIS modelling to refine urban heat and thermal comfort assessment. Science of The Total Environment, 858, 159729. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159729>.

Brienen, S., Haller, M., Brauch, J., Früh, B., Deutscher Wetterdienst, 2022. HoKliSim-De. https://doi.org/10.5676/DWD/HOKLISIM_V2022.01.

Cannon, A., Sobie, S., Murdock, T., 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? J. Clim. 28, 150722131126009. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754>.

Coppola, E., Sobolowski, S., Pichelli, E., Raffaele, F., Ahrens, B., Anders, I., Ban, N., Bastin, S., Belda, M., Belusic, D., Caldas-Alvarez, A., Cardoso, R.M., Davolio, S., Dobler, A., Fernandez, J., Fita, L.,

- Fumiere, Q., Giorgi, F., Goergen, K., Güttler, I., Halenka, T., Heinzeller, D., Hodnebrog, Ø., Jacob, D., Kartsios, S., Katragkou, E., Kendon, E., Khodayar, S., Kunstmann, H., Knist, S., Lavín-Gullón, A., Lind, P., Lorenz, T., Maraun, D., Marelle, L., Van Meijgaard, E., Milovac, J., Myhre, G., Panitz, H.-J., Piazza, M., Raffa, M., Raub, T., Rockel, B., Schär, C., Sieck, K., Soares, P.M.M., Somot, S., Srnec, L., Stocchi, P., Tölle, M.H., Truhetz, H., Vautard, R., De Vries, H., Warrach-Sagi, K., 2020. A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Clim Dyn* 55, 3–34. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8>
- ESRI 2019. ArcGIS Desktop: Release 10. [Software]. Redlands, California.: Available: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources>.
- Fosser, G., Gaetani, M., Kendon, E.J., Adinolfi, M., Ban, N., Belušić, D., Caillaud, C., Careto, J.A.M., Coppola, E., Demory, M.-E., De Vries, H., Dobler, A., Feldmann, H., Goergen, K., Lenderink, G., Pichelli, E., Schär, C., Soares, P.M.M., Somot, S., Tölle, M.H., 2024. Convection-permitting climate models offer more certain extreme rainfall projections. *npj Clim Atmos Sci* 7, 51. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00600-w>
- Gholami Korzani, M., Chaudhary, A., Jamali, B., Deletic, A., (2026). Dynamic CA-ffé: a hybrid 1D/2D fast flood evaluation model for urban flash floods. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134762>
- Haller, M., Brien, S., Brauch, J., Früh, B. 2022a. CPS HIST V2022.01. DOI: 10.5676/DWD/CPS_HIST_V2022.01
- Hauser, M., Back, Y., Rauch, W. & Kleidorfer, M. (2025): Assessing combined sewer overflow performance under climate projections and urban development. *Journal of Hydrology*.
- Herzog, A.I.L., 2024. Hydrodynamic sewer network calculation for the city of Innsbruck (in German: Hydrodynamische Kanalnetzberechnung der Stadt Innsbruck), Master thesis.
- HÖRNSCHEMEYER, B., HENRICHS, M. & UHL, M. 2021. Swmm-urbaneva: A model for the evapotranspiration of urban vegetation. *Water (Switzerland)*, 13.
- JAMALI, B., BACH, P. M., CUNNINGHAM, L. & DELETIC, A. 2019. A Cellular Automata Fast Flood Evaluation (CA-ffé) Model. *Water Resources Research*, 55, 4936-4953.
- KLEIDORFER, M. & RAUCH, W. 2011. An application of Austrian legal requirements for CSO emissions. *Water Science and Technology*, 64, 1081-1088.
- OWAV-RB 45, 2015. Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund.
- Rauch, W., Kinzel, H., 2007. KAREN – User Manual. hydro-IT, GmbH, Innsbruck [WWW Document]. URL <http://www.hydro-it.com/produkte/karen/> (accessed 1.18.24).
- ROSSMAN, L. 2015. Storm water management model user's manual, version 5.1 (EPA-600/R-14/413b). US EPA National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA.
- Rybka, H., Haller, M., Brien, S., Brauch, J., Früh, B., Junghänel, T., Lengfeld, K., Walter, A., Winterrath, T., 2022. Convection-permitting climate simulations with COSMO-CLM for Germany: analysis of present and future daily and sub-daily extreme precipitation. *Meteorol. Zeitschrift* 32. <https://doi.org/10.1127/metz/2022/1147>.

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.