

PLANUNG VON BLAU-GRÜNER INFRASTRUKTUR

INTEGRIERTE MODELLIERUNG HINSICHTLICH URBANER ÜBERFLUTUNGEN, WASSERBILANZ UND STADTKLIMA

Die Implementierung von Blau-Grüner Infrastruktur (BGI) vermag in Innsbruck Überflutungsrisiken reduzieren und die Grundwasserneubildung verbessern, dennoch ist gemäss einer Studie ihr Einfluss auf die stadtweite Hitzebelastung gering. Zwar senken Begrünungen lokal den Hitzestress deutlich, aber wegen der geringen Umwandlung versiegelter Flächen nur begrenzt. Am effektivsten ist eine Kombination aus wasserbewirtschaftender BGI und beschattender Vegetation. Diese mindert Überflutungen, verbessert die Wasserbilanz und reduziert den Hitzestress.

*Yannick Back; Fabian Funk; Martina Hauser, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Umwelttechnik
Jaya Kelvin; Alrun Jasper-Tönnies, hydro&meteo GmbH
Georg Leitinger, Universität Innsbruck, Institut für Ökologie; Manfred Kleidorfer, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur*

RÉSUMÉ

PLANIFICATION D'INFRASTRUCTURES BLEUES ET VERTES

Les résultats d'une étude menée à Innsbruck démontrent que la mise en œuvre d'infrastructures bleues et vertes (IBV) permet d'améliorer le bilan hydrique urbain et de réduire les risques d'inondation. Toutefois, elles n'ont qu'une influence limitée sur la charge thermique urbaine. L'ombrage est particulièrement important pour le refroidissement des zones urbaines, le *Sky View Factor* (SVF) ayant été identifié comme un paramètre explicatif central. Dans ce contexte, les arbres offrent un double avantage. Non seulement ils favorisent le bilan hydrique grâce à l'infiltration par les racines et à l'évaporation, mais ils réduisent également la température moyenne du rayonnement et donc le stress thermique humain grâce à leur couronne. Dans le cadre d'une approche globale, les IBV ne doivent pas seulement permettre l'infiltration des eaux pluviales et contribuer à la prévention des inondations, mais aussi être conçus de manière à améliorer le climat urbain. Pour cela, il est essentiel de disposer de plus d'espace et d'une plus grande proportion d'arbres procurant de l'ombre. Les fosses de plantation, les cuvettes et les jardins pluviaux sont particulièrement efficaces sur le plan du climat urbain dans la mesure où ils favorisent l'évaporation d'une grande partie de l'eau de pluie collectée et ne l'acheminent pas vers les nappes phréatiques.

EINLEITUNG

Die gezielte Implementierung Blau-Grüner Infrastruktur (BGI) gilt als zentrale Massnahme zur Klimawandelanpassung in Städten. Sie verbessert die Wasser- und Energiebilanz an der Oberfläche und beeinflusst dadurch massgeblich den Wasser- und Wärmeaustausch zwischen Boden, Vegetation, Oberfläche und Atmosphäre [1, 2]. Die Abkopplung von versiegelten Flächen mit BGI reduziert die Ableitung von Niederschlagswasser in die Kanalisation, wodurch das Kanalisationssystem entlastet und das Risiko städtischer Überflutungen verringert wird. Gleichzeitig sinkt die Belastung durch Mischwasserüberläufe [3], was in weiterer Folge einen positiven Effekt auf die Qualität nachgeschalteter Gewässer hat.

Neben zunehmenden Starkregenereignissen [4] führen klimawandelbedingte Veränderungen der Niederschlagsverteilung auch zu längeren und intensiveren Trockenphasen [5]. Infolge dessen kann die Versorgung der urbanen Vegetation, insbesondere der grünen Infrastrukturelemente, durch natürlichen Niederschlag immer häufiger nicht mehr zuverlässig gewährleistet werden. Eine nachhaltige und gezielte Bewässerung wird daher immer wichtiger, um deren Funktion als Verdunstungs-

Kontakt: Y. Back, yannick.back@uibk.ac.at

kühler in Hitzewellen sicherzustellen [6]. Durch die Versickerung von Regenwasser versiegelter Flächen in BGI kann das Regenwasser zurückgehalten und nutzbar gemacht werden, wodurch diese Elemente auch längere Trockenperioden überstehen können, abhängig vom Vegetationstyp und der Auslegung der Systeme. Ziel dieser Studie ist es, das Potenzial von Abkopplungsmassnahmen und BGI-Implementierung zur Minderung urbaner Überflutungsrisiken sowie zur Verbesserung der Wasserbilanz und des Stadtklimas am Beispiel der Stadt Innsbruck, Österreich, zu untersuchen. Die Ergebnisse umfassen zunächst eine Status-quo-Analyse hinsichtlich Überflutungsgefährdung, Wasserbilanz und Hitzestress. Darauf aufbauend erfolgt eine Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher BGI-Typen, dimensioniert nach österreichischen Regelblattvorgaben. Abschliessend wird der kombinierte Effekt der Begrünung und Beschattung auf die Hitzestressreduktion untersucht.

MODELLE UND SIMULATIONEN

Die Simulationen erfolgen in unterschiedlichen Modellen und werden für die gesamte Stadt Innsbruck auf Basis, so genannter «Zählsprengel», durchgeführt. Dies sind abgegrenzte Bereiche mit einer eindeutigen Nummer und einer definierten Fläche, die für statistische Zwecke, wie die Erfassung der Bevölkerungszahl, herangezogen werden. Die Modelle umfassen, ein hydrodynamisches 1D-Modell für das Überstauvolumen der Schächte im Entwässerungsnetz, ein gekoppeltes 1D/2D-Modell basierend auf zellulären Automaten für die Überflutungsfläche, ein Niederschlags-Abfluss-Modell mit einem Aufsatz zur verbesserten Verdunstungsberechnung für Wasserbilanz, Trockenstress und Bewässerungsbedarf und ein Geoinformationssystem-basiertes Modell für Energiebilanzen, innerstädtische Überwärmung und Hitzestress. Die Klimadaten zu Temperatur und Niederschlag stammen aus einem konvektionsauflösenden Simulationsmodell (CPS, vgl. Rybka et al. [7]) für den historischen Zeitraum 1971 bis 2000. Diese hohe räumliche Auflösung von 3 km ist zusammen mit der stündlichen Zeitauflösung entscheidend, um die für Innsbruck relevanten Prozesse physikalisch robust abzubilden: die komplexe alpine Topographie und die für Überflutungen

kritischen, konvektiven Starkregenereignisse. Zur Validierung und Verbesserung der lokalen Genauigkeit wurden die Daten abschliessend mit Beobachtungsdaten der *Geosphere Austria Bias* korrigiert. Neben dem Ist-Zustand von Innsbruck werden zusätzlich Szenarien einer Flächenabkopplung und BGI-Implementierung gerechnet. Des Weiteren werden unterschiedliche Anteile an abgekoppelter Fläche und BGI-Implementierungen mit 10%, 20% und 30% Anstieg in Strassenzügen (Strassen und Gehwege) und auf Gebäuden simuliert.

Als Szenario wurde untersucht, welche Auswirkungen eine 30%-Abkopplung aller versiegelten Flächen in allen Zählsprengeln durch unterschiedliche BGI hat (Tab. 1). Die BGI wurden nach österreichischem Regelblatt (ÖWAV-Regelblatt 45) dimensioniert. Im 1D-Kanalnetzmodell und 1D/2D-Überflutungsmodell wird die Abkopplung vereinfacht durch Verringerung der Fläche dargestellt und keine BGI im Modell implementiert. Die Reduktionen des Überstauvolumens und der Überflutungsfläche für die gesamte Stadt wurden jeweils für ein 5-jährliches und 50-jährliches Regenereignis bei einer Dauerstufe von 180 Minuten untersucht.

ÜBERFLUTUNGSGEFÄHRDUNG

Zur Simulation des Kanalnetzes von Innsbruck wurde das *Stormwater Management Model* (SWMM) von Rossman [8] verwendet. Das 1D-SWMM-Modell umfasst 6853 Abwasserkanäle, 6432 Schächte und 39 Speicherbauwerke. Es umfasst ausserdem 137 513 Teileinzugsgebiete mit einer Gesamtfläche von 794,2 Hektar, die sich auf sieben Niederschlagsmessstationen verteilen. Das Modell wurde kalibriert, indem die Ergebnisse mit Wasserstandsmessdaten von zehn beobachteten Niederschlagsereignissen aus dem Jahr 2023 verglichen wurden. Anschliessend wurde das 1D-SWMM-Modell der Stadt Innsbruck mit einem 2D-Oberflächenmodell gekoppelt und so ein gekoppeltes 1D/2D-*Fast-Flood-Model* (mittels *Dynamic CA-ffé*) erstellt. Dieses Modell ist eine Weiterführung basierend auf dem Ursprungsmodell *CA-ffé* von Jamali et al. [9] und verwendet zelluläre Automaten, um die Topographie und die Kontinuitätsgleichung zu integrieren. Dadurch ist eine effiziente, hochauflösende Überflutungsgefährdung möglich. *Dynamic CA-ffé* kombiniert eine 2D-Oberflächenabflusssimulation mit einem dynamischen Abfluss aus dem

Kanalnetz und gewährleistet so eine kontinuierliche Interaktion zwischen Oberflächen- und Kanalabflüssen durch einen permanenten Datenaustausch.

WASSERBILANZ

Zur Modellierung der Wasserbilanz von Innsbruck wurde das Niederschlags-Abfluss-Modell *SWMM-UrbanEVA* [10] verwendet. Das Modell hat sowohl das kalibrierte 1D-SWMM-Kanalnetzmodell, als auch hochaufgelöste Befliegungsdaten als Datengrundlage. Ausgehend von den Befliegungsdaten wurde das gesamte Stadtgebiet mit einer Auflösung von 0,2 m in sechs Landnutzungsklassen unterteilt:

- Gebäude
- Gründächer
- Strassenflächen
- Wasserflächen
- Grünflächen < 2 m Höhe
- Grünflächen > 2 m Höhe

Die Landnutzungsklassen «Gebäude» und «Strassenflächen» wurden mit den Teileinzugsgebieten des Kanalnetzmodells verglichen und alle Gebäude und Strassenflächen im Wasserbilanzmodell an Abkoppelungsmassnahmen (Sickerschächte und Mulden) angeschlossen, die im Kanalnetzmodell nicht vorhanden sind. Alle versiegelten Flächen wurden im Wasserbilanzmodell als einfaches *Subcatchment* und die Gründächer, Grünflächen und Abkopplungsmassnahmen als SWMM LID-Baustein umgesetzt.

HITZESTRESS

Mithilfe eines GIS-basierten Modellierungsansatzes wurden die Wechselwirkungen zwischen Land und Atmosphäre untersucht, insbesondere die Oberflächentemperatur und der *Universal Thermal Climate Index* (UTCI). Letzterer dient der Bestimmung der menschlichen Hitzebelastung. Der Modellierungsansatz basiert auf früheren Studien von Back et al. (2023) [11] und (2024) [1] und wurde angepasst, um eine Modellierung aller Parameter auf stadtweiter Ebene zu ermöglichen. Die Berechnungen basieren auf Falschfarben-Infrarotbildern (CIR, *Colour Infrared*). Dabei handelt es sich um multispektrale Bilder, die Informationen

VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

| | |
|------|--|
| BGI | Blau-Grüne Infrastruktur |
| CIR | Colour Infrared, Falschfarben-Infrarotbilder |
| SVF | Sky View Factor |
| SWMM | Stormwater Management Model |
| UTCI | Universal Thermal Climate Index |

im nahen Infrarot-, Rot- und Grünbereich des elektromagnetischen Spektrums erfassen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Fähigkeit, verschiedene Wellenlängen zu reflektieren und zu absorbieren, sind diese Bilddaten besonders nützlich für die Analyse des Zustands der Vegetation oder der Bodenbedeckung. Bestimmte Reflexionsmuster der Vegetation korrelieren beispielsweise mit dem Wasserzustand, etwa mit Trockenheit. Die räumliche Auflösung der eingegebenen CIR-Bilddaten bestimmt die räumliche Genauigkeit der Ausgabedaten und beträgt in diesem Fall 0,2 Meter. Die Modellierung wird in *ArcGIS Pro 3.3* [12] durchgeführt.

FALLSTUDIE UND EINGANGSDATEN

Das Fallbeispiel ist die Stadt Innsbruck, die auf einer Höhe von ca. 574 m ü. M. im Inntal in den österreichischen Alpen liegt (Fig. 1 A). Sie erstreckt sich über eine Fläche von 36,6 km² und hat etwa 130 000 Einwohner. Die Untersuchungen in dieser Studie umfassen die 172 Zählsprengel der Stadt. Neben den bereits beschriebenen Niederschlags- und Temperaturdaten aus der Klimamodellierung, benötigen

die Simulationen ein Falschfarben-Infrarot Bild (Fig. 1 C), Informationen zum *Sky View Factor* (SVF) (Fig. 1 B) und eine Oberflächenklassifizierung (Fig. 1 D) als weitere Eingangsdaten.

Der SVF gibt an, wie viel vom Himmel von einem bestimmten Punkt aus sichtbar ist. Dadurch bestimmt dieser Faktor massgeblich, wie viel einfallende direkte und diffuse Sonnenstrahlung an diesem Punkt ankommt.

Die Oberflächenklassifizierung, die die Kategorien Wasser, Verkehrsflächen, Vegetation > 2 m, Vegetation < 2 m, Gründach und Gebäude umfasst, bestimmt die unterschiedlichen Oberflächentypen in der Stadt. Sie dient zur Berechnung des aktuellen Grünanteils, Gebäudeanteils und Versiegelungsanteils in den einzelnen Zählsprengeln. Diese Datensätze werden zusätzlich durch einen Gebäudedatensatz und ein digitales Oberflächenmodell unterstützt. Letzteres dient der Berechnung des SVF und als Eingangsdatensatz für die Überflutungssimulationen im Modell *CA-ffé*.

Alle nötigen Datensätze wurden von der Abteilung Geoinformation des Landes Tirol zur Verfügung gestellt.

ERGEBNISSE

ÜBERFLUTUNGSGEFÄHRDUNG, WASSER-BILANZ UND HITZESTRESS – STATUS QUO

Auf Basis der Simulationen in den einzelnen Modellen wurde der Status quo in Bezug auf die Überflutungsgefährdung, die Wasserbilanz und den Hitzestress für die einzelnen Zählsprengel der Stadt Innsbruck ermittelt: *Figur 2 A, B und C* zeigen die Aufteilung der Komponenten der Wasserbilanz: Evapotranspiration, Grundwasserneubildung und Abfluss; *Figur 2 D und E* zeigen das Überstauvolumen und die Überflutungsfläche; *Figur 2 F* zeigt den menschlichen Hitzestress anhand des *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) an einem Hitzetag mit einer Lufttemperatur von 31,2 °C.

AUSWIRKUNG VON ABKOPPLUNGSMASSNAHMEN UND BGI-IMPLEMENTIERUNG

Die Ergebnisse bestätigen, dass eine grossflächige Flächenabkopplung geeignet ist, das Überstauvolumen und die Überflutungsfläche auf stadtweiter Ebene zu reduzieren. Der Effekt nimmt mit steigender Niederschlagsintensität etwas ab. Ebenso kann festgehalten werden, dass

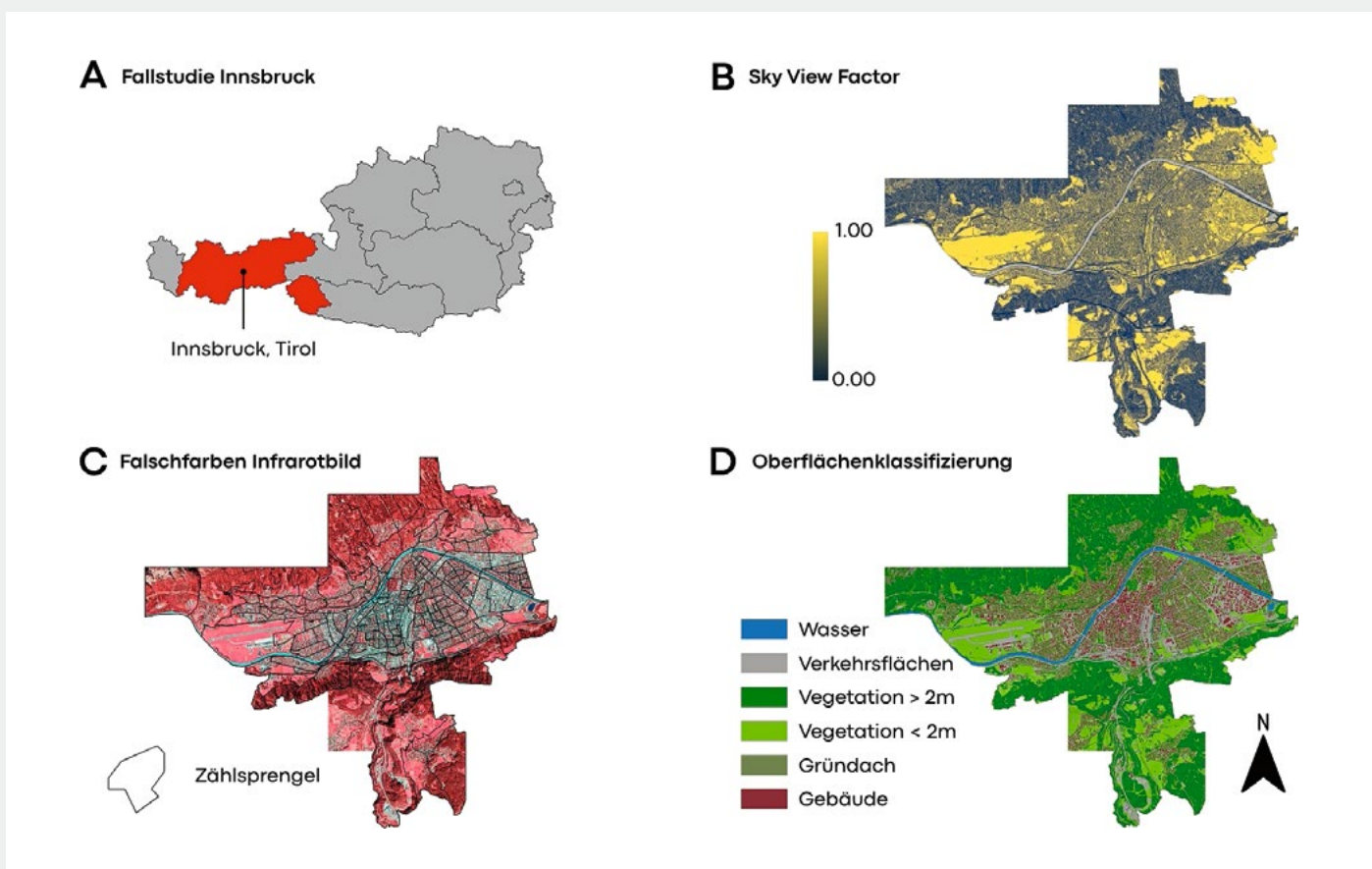


Fig. 1 Geographische Daten für die Fallstudie Innsbruck: A geographische Lage der Fallstudie Innsbruck, B Sky View Factor, C Falschfarben Infrarotbild, D Oberflächenklassifizierung.

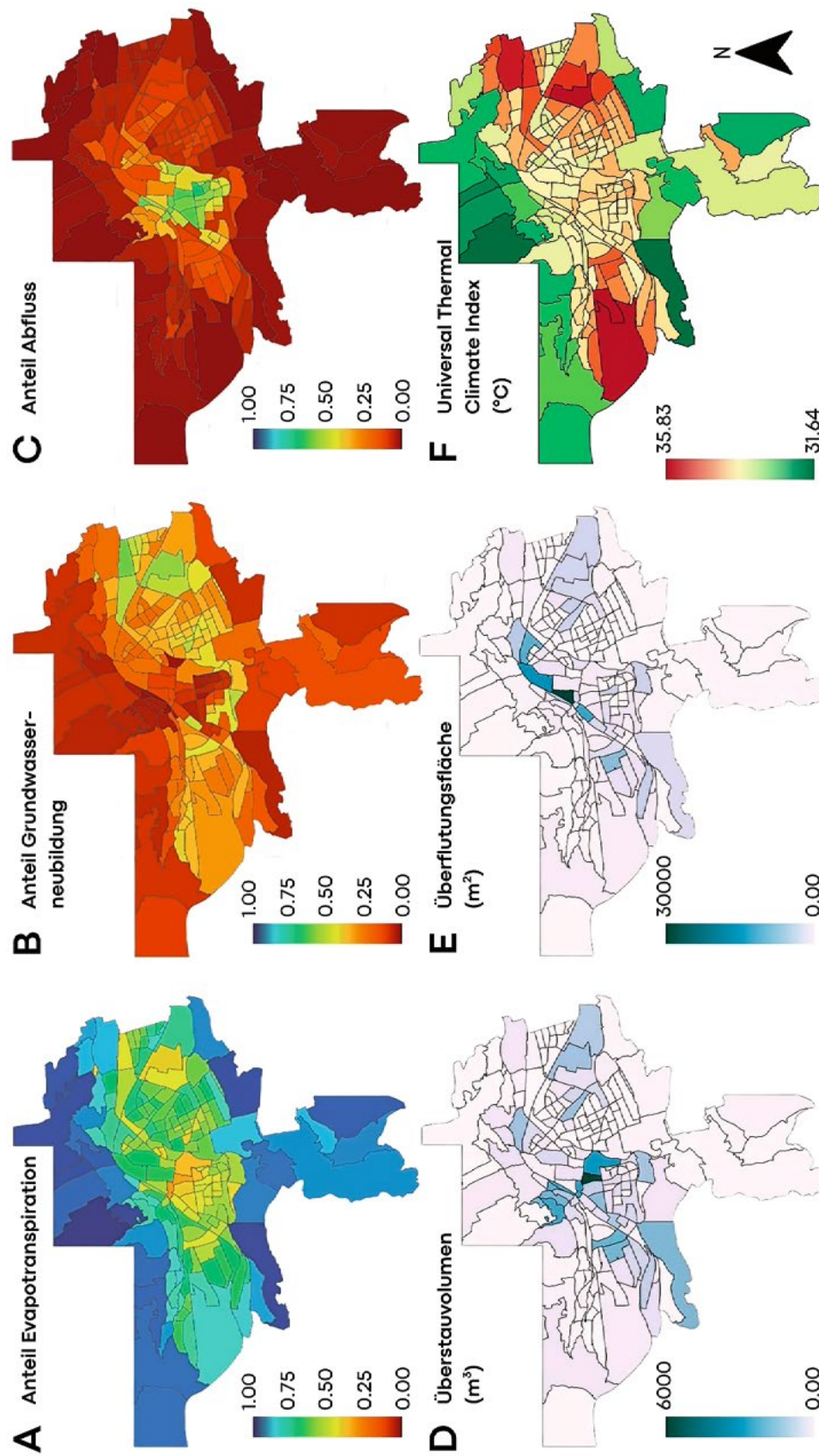


Fig. 2 A–C Aufteilung der Komponenten der Wasserbilanz: Evapotranspiration, Grundwasserneubildung und Abfluss. D Überstauvolumen; E Überflutungsfläche; F menschlicher Hitzestress anhand des Universal Thermal Climate Index (UTC) an einem Hitzetag mit einer Lufttemperatur von 31,2 °C.

| BGI | Überflutungsgefährdung | | | | Wasserbilanz | | |
|-----------------------|---|--------------|--------------------|--------------|--------------|-------|--------|
| Bei 30% Abkopplung | Überstauvolumen | | Überflutungsfläche | | ET | I | R |
| | Änderung im Vergleich zum Ist-Zustand (%) | | | | | | |
| | J5/ D180 | J50/ D180 | J5/ D180 | J50/ D180 | | | |
| | -45,96 | -36,07 | -46,95 | -31,64 | | | |
| Baumrigole | | | | | +0,26 | +7,81 | -23,99 |
| Mulde | | | | | +0,24 | +8,34 | -25,21 |
| Raingarden | | | | | +0,14 | +8,25 | -24,02 |
| Gründach | | | | | +0,95 | -0,37 | -9,02 |

Tab. 1 Auswirkung von Abkopplungsmassnahmen und BGI-Implementierung auf die Überflutungsgefährdung und die Wasserbilanz.
ET: Evapotranspiration; I: Infiltration; R: Reduktion des Abflusses

durch die grossflächige Abkopplung mit BGI, dimensioniert nach Regelblatt 45, die Wasserbilanz auf stadtweiter Ebene leicht verbessert wird. Dies ist an dem deutlichen Rückgang des Abflussanteils an der Wasserbilanz erkennbar. Jedoch ist auch zu erkennen, dass der Reduktion des Abflusses lediglich ein Anstieg der Infiltration entgegensteht. Der Anstieg der Evapotranspiration hingegen ist nur sehr gering (Tab. 1).
In Bezug auf die Hitzestressreduktion, zeigen die Ergebnisse, dass die Veränderung

einer versiegelten Fläche in eine begrünte Fläche lokal den UTCI um bis zu 2,5 °C herabsetzen kann. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass bei einer Entkopplung von 30% der versiegelten Fläche mit BGI in jedem Zählsprengel, dimensioniert nach Regelblatt 45, keine erkennbare Änderung des Hitzestress (auf Basis der berechneten UTCI-Werte) stattfindet – weder in den einzelnen Zählsprengeln, noch auf stadtweiter Ebene. Dies deckt sich mit dem sehr geringen Anstieg der Evapotranspiration im Wasserbilanzmodell.

Dass die BGI auf sehr lokaler Ebene bedeutende Auswirkungen auf den Hitzestress haben können (UTCI-Reduktion um bis zu 2,5 °C), jedoch weder auf Zählsprengel noch auf stadtweiter Ebene Auswirkungen zeigen, liegt daran, dass auch durch eine Entkopplung um 30% die Flächenveränderung zur stadtweiten Hitzereduktion zu gering ist. Durch eine Entkopplung von 30% in allen Zählsprengeln werden, in Abhängigkeit der Zählsprengelgrösse, beim Einsatz von Baumrigolen, Raingardens und Mulden lediglich bis zu 3,18% bzw. 5,09% der versiegelten Fläche in begrünte Fläche umgewandelt. Diese geringe Flächenänderung bewirkt nur eine sehr geringe Reduktion des mittleren UTCI bzw. des Hitzestresses.
Baumrigolen wurden in diesem Zusammenhang vereinfacht ohne Änderung des SVF im Stadtklimamodell umgesetzt. Sie hätten durch ihre Schatten spendende Wirkung potenziell einen grösseren Einfluss auf den UTCI.

AUSWIRKUNG VON BEGRÜNUNG UND BESCHATTUNG AUF DEN HITZESTRESS

In Figur 3 wurde der mittlere UTCI je Zählsprengel mit dem jeweiligen mittleren Begrünungsanteil und mittleren SVF verglichen. Die Grafik zeigt, dass der SVF und damit die Beschattung, einen grösseren Effekt auf den UTCI zeigt, als der Begrünungsanteil. Dies ist vor allem auf die deutliche Absenkung der mittleren Strahlungstemperatur zurückzuführen, einem der zentralen Faktoren für die Wahrnehmung von Hitzestress durch den Menschen. Durch die Verringerung der direkten Sonneneinstrahlung wird die auf den Körper einwirkende thermische Energie reduziert, was sich unmittelbar auf die Wärmebilanz des menschlichen Organismus auswirkt. Begrünungsmassnahmen wirken primär, neben Effekten

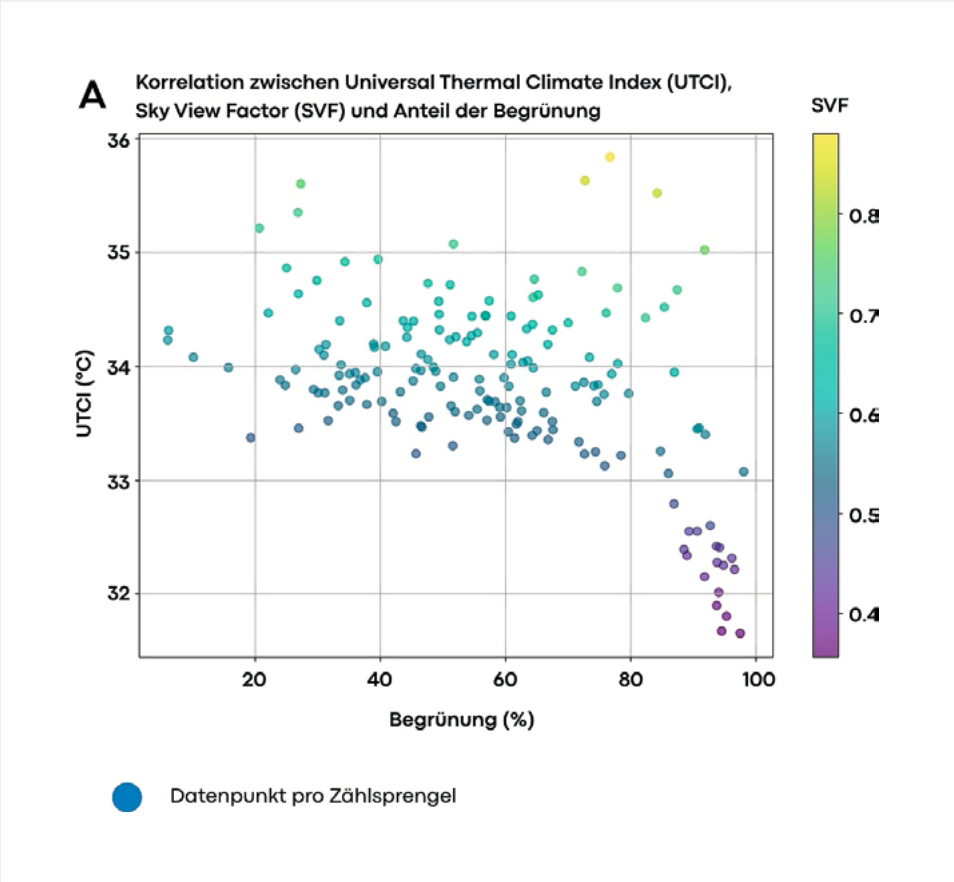


Fig. 3 Korrelation zwischen dem Universal Thermal Climate Index (UTCI), dem Sky View Factor (SVF) und dem Anteil der Begrünung, hier bei einer Lufttemperatur von 31,2 °C. Jeder Datenpunkt stellt die Mittelwerte eines Zählsprengels dar.

auf die Wasserbilanz, auf die Energiebilanz der Oberfläche und führen in der Folge vor allem zu einer Reduktion der Oberflächentemperatur. Die Veränderung der thermischen Abstrahlung durch Begrünung ist jedoch im Vergleich zur Reduktion der direkten Sonneneinstrahlung durch Beschattung deutlich geringer, was die geringere Wirkung auf den UTCI erklärt.

Bäume nehmen in diesem Kontext eine besondere Rolle ein, da sie, abhängig von Kronendurchmesser und Alter, nicht nur über die Begrünungseffekte auf die Wasser- und Energiebilanz der Oberfläche wirken, sondern zusätzlich durch ihre Krone wirksame Beschattung bieten. Mit zunehmender Grösse steigt ihr Potenzial, die mittlere Strahlungstemperatur zu senken, wodurch sie direkt zur Reduktion des UTCI beitragen. Sie vereinen somit die Vorteile beider Strategien und stellen eine besonders effektive Massnahme zur Verbesserung des thermischen Komforts im urbanen Raum dar. Der kombinierte Effekt aus Verdunstungskühlung, Oberflächenabkühlung und Beschattung macht Bäume zu einer multifunktionalen Anpassungsmassnahme im Rahmen der klimagerechten Stadtgestaltung. Dabei wirkt sich, analog zu dichten Wäldern, eine höhere Baumdichte zusätzlich positiv aus, da sich die Effekte gegenseitig verstärken und eine flächige Reduktion der thermischen Belastung ermöglichen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse dieser Studie belegen, dass die Umsetzung von Abkopplungsmassnahmen durch Blau-Grüne Infrastruktur, dimensioniert nach österreichischer Regelblattbemessung, das Potenzial besitzen, die städtische Wasserbilanz zu verbessern und die Überflutungsgefährdung zu reduzieren. Jedoch zeigt sich auch, dass diese Massnahmen nur in

sehr begrenztem Masse zur Reduktion des Hitzestresses auf stadtweiter Ebene beitragen, da der Anstieg der Evapotranspiration in Relation zur Gesamtbilanz marginal bleibt. Begrünung ist in der Lage den *Universal Thermal Climate Index* tagsüber um bis zu 2,5 °C zu reduzieren, dieser Effekt wirkt jedoch nur sehr lokal. Für die thermische Entlastung des urbanen Raums ist insbesondere die Beschattung entscheidend, wobei der *Sky View Factor* als zentraler erklärender Parameter identifiziert wurde. Bäume bieten in diesem Zusammenhang einen doppelten Nutzen. Sie fördern nicht nur die Wasserbilanz über Wurzelinfiltration und Verdunstung, sondern reduzieren gleichzeitig durch ihre Kronen die mittlere Strahlungstemperatur und damit den menschlichen Hitzestress.

Planung und Dimensionierung von BGI sollte in einem ganzheitlichen Ansatz nicht nur Regenwasser versickern und zur Überflutungsprävention beitragen, sondern auch so gestaltet werden, dass sie zur Verbesserung des Stadtklimas beiträgt. Dafür braucht es vor allem mehr Flächen und einen höheren Anteil an schattenspendenden Bäumen. Baumrigolen, Mulden und Regengärten sind vor allem dann stadtklimatisch wirksam, wenn sie einen Grossteil des zugeführten Regenwassers verdunsten und nicht dem Grundwasser zuführen.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Back, Y. et al. (2024): Role of Surface Energy Fluxes in Urban Overheating Under Buoyancy-Driven Atmospheric Conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129, e2023JD039723
- [2] Almaaitah, T. et al. (2021): The potential of Blue-Green infrastructure as a climate change adaptation strategy: a systematic literature review. *Blue-Green Systems*, 3, 223–248
- [3] Hauser, M. et al. (Under Review): Assessing combined sewer overflow performance under climate projections and urban development with respect to European Urban Wastewater Treatment Directive and Austrian regulations. *Journal of Hydrology*
- [4] Haslinger, K. et al. (2025): Increasing hourly heavy rainfall in Austria reflected in flood changes. *Nature*, 639, 667–672
- [5] Büntgen, U. et al. (2021): Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience*, 14, 190–196
- [6] Back, Y. et al. (2025): Current Interventions Are Inadequate to Maintain Cities' Resilience During Concurrent Drought and Excessive Heat. *Earth's Future*, 13, e2024EF005208
- [7] Rybka, H. et al. (2023): Convection-permitting climate simulations with COSMO-CLM for Germany: Analysis of present and future daily and sub-daily extreme precipitation. *Meteorologische Zeitschrift*, 32(2), 91–111. <https://doi.org/10.1127/metz/2022/1147>
- [8] 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
- [9] Jamali, B. et al. (2019): A Cellular Automata Fast Flood Evaluation (CA-ffé) Model. *Water Resources Research*, 55, 4936–4953
- [10] Hörschemeyer, B. et al. (2021): Swmm-urbaneva: A model for the evapotranspiration of urban vegetation. *Water (Switzerland)*, 13
- [11] Back, Y. et al. (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>
- [12] ESRI (2019): ArcGIS Desktop: Release 10. [Software]. Redlands, California.: Available: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources>

DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist Teil des Projekts *BlueGreenCities* (Nr. KR21KB0K00001), das vom Österreichischen Klima- und Energiefonds zwischen Oktober 2022 und September 2025 gefördert wurde.

WASSER ▼ BODEN ▼ LUFT
Analytische Untersuchungen und Beratung

envilab

ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT

ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
T 062 745 70 50, www.envilab.ch