

DIE ROLLE VON WASSER IN DER KLIMASENSIBLEN STADT

THE ROLE OF WATER IN THE CLIMATE-SENSITIVE CITY

Yannick Back & Manfred Kleidorfer (Universität Innsbruck)

KEYWORDS

Wasser; Wasserinfrastruktur; klimasensible Stadt; blau-grüne Infrastruktur; Klimawandel; Wärmestrom; Bowen-Verhältnis.

KURZFASSUNG

Ein durch den Klimawandel verstärkter globaler Wasserkreislauf verändert die Temperatur sowie Niederschlagsmuster und erhöht die Wahrscheinlichkeit länger anhaltender lokaler Trockenperioden. Durch Entsiegelung und Begrünung unserer Städte lassen sich die Auswirkungen erhöhter Temperaturen und – bis zu einer gewissen jährlichen Wiederkehrzeit – häufiger auftretender Starkniederschläge dämpfen. Eine intensive Begrünung bedeutet jedoch, dass ausreichend Wasser zur Bewässerung der Grünflächen und Bäume zur Verfügung stehen muss. Allein durch den Niederschlag kann die Wasserversorgung aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels in Mitteleuropa zumindest nicht durchgängig gewährleistet werden. Neben der Aufrechterhaltung der Wasserversorgung von Agrarflächen zur Sicherstellung der Nahrungsmittelversorgung wird auch eine Gewährleistung konstanter Wasserverfügbarkeit zur Bewässerung der grünen Infrastruktur immer wichtiger. Anhand eines theoretischen Beispiels für den Wasserverbrauch und die Wasserverfügbarkeit in der Stadt Innsbruck wurden die Auswirkungen von gleichzeitig auftretenden Trocken- und Hitzeereignissen sowie von nicht nachhaltiger Bewässerung städtischer Grünflächen auf die lokalen Wasserressourcen aufgezeigt. Unter

Berücksichtigung der getätigten Annahmen kann auch ein zukünftiger, stark steigender Wasserverbrauch der Bevölkerung abgedeckt werden. Eine vollständige Bewässerung von Grünflächen mit der derzeitigen Infrastruktur wird in Zukunft jedoch kaum realisierbar sein. Innovative Lösungsansätze wie die Wasserwiederaufbereitung, die verstärkte Grundwasseranreicherung sowie die Kombination mehrerer Versorgungsmöglichkeiten zu einem ganzheitlichen und flexiblen Versorgungsnetz müssen angestrebt werden. Die Rolle des Wassers muss ins Zentrum der Stadtplanung rücken, damit unsere Städte resistent gegenüber den zukünftigen Herausforderungen gestaltet werden können.

ABSTRACT

The climate change is accelerating the global water cycle, altering temperature and precipitation patterns, and is increasing the frequency and intensity of prolonged local droughts. Decreasing the degree of surface sealing and increasing the amount of green infrastructure in our cities can mitigate the effects of higher temperatures and, up to a certain annual return period, more frequent and extreme precipitation extremes. However, intensive greening means that sufficient water must be available to irrigate the green spaces in cities. Due to the effects of climate change, the water supply in Central Europe cannot be guaranteed by precipitation alone, at least not continuously. In addition to maintaining the water supply for agricultural areas to ensure food supply, it is beco-



Abbildung 1: Mögliche Klimawandelanpassungsmaßnahmen und deren Mehrfachnutzen. Diese Abbildung wurde mit Biorender.com generiert

ming increasingly important to ensure a constant availability of water for irrigation of green infrastructure. A theoretical example of water consumption and availability in the city of Innsbruck was used to demonstrate the effects of compound drought and heat events and unsustainable irrigation of urban green spaces on local water resources. Under the assumptions made, a future increase in water consumption by the population can be accommodated, but complete irrigation of green spaces with the current infrastructure is unlikely to be feasible in the future. Innovative solutions such as water recycling, increased groundwater recharge and the combination of different supply options to create a holistic and flexible supply network must be pursued. The role of water needs to be strengthened in order to design our cities more resilient in the face of future challenges.

1. EINLEITUNG

Unsere kontinuierlich wachsenden Städte nehmen immer mehr Fläche in Anspruch, während die bereits bestehende Bausubstanz immer dichter besiedelt wird.¹ Aus Daten des Umweltbundesamts, auf Basis der Zahlen des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen, geht hervor, dass der jährliche Zuwachs der Flächeninanspruchnahme in Österreich seit 2018 bei knapp über 40 km² unverändert bleibt, der Anteil der versiegelten Flächeninanspruchnahme sogar weiter zunimmt.² Stark versiegelte und dicht bebaute Gebiete steigern die Überflutungsgefahr bei Starkniederschlagsereignissen³ und fördern die Hitzebelastung, insbesondere in der Nacht.⁴ Durch die Erderwärmung verändern sich Temperatur- und Niederschlagsmuster und es kommt vermehrt zu extremer Hitze und Starkniederschlagsereignissen.⁵ Um der extremen Hitze und den Schäden durch mögliche Überflutungen in den Städten entgegen zu wirken bedient sich die Stadtplanung naturbasierter Lösungsansätze, sogenannter Blaugrüner Infrastruktur.⁶ Durch die Entsiegelung der Flä-

chen und einer dezentralen Niederschlagswasserbehandlung wird das Entwässerungssystem entlastet und die Hitze in der Stadt durch die Steigerung der Verdunstungskühlung gemindert (siehe Abbildung 1). Durch eine zusammenhängende Implementierung Blaugrüner Infrastruktur in der Stadt sind weitere Mehrfachnutzen, wie die Steigerung der Biodiversität, möglich.⁷

Das Entscheidende bei der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels ist, dass durch die gesetzten Maßnahmen die Energie- und Wasserbilanz an der Oberfläche eines bestimmten Gebiets verbessert, im Idealfall wieder einem natürlichen Zustand angenähert, werden. Die Wasserbilanz an der Oberfläche setzt sich aus den Komponenten Evapotranspiration (Verdunstung), Abfluss und Versickerung zusammen, welche in Summe der Niederschlagsmenge entsprechen müssen. Die Energiebilanz an der Oberfläche setzt sich aus dem latenten Wärmestrom, dem sensiblen Wärmestrom und dem Bodenwärmestrom zusammen, welche in Summe der Nettogesamtstrahlung entsprechen müssen. Der latente Wärmestrom begünstigt die Verdunstung und somit einen Kühleffekt in der bodennahen Luftschicht. Über die Verdunstung, bzw. den latenten Wärmestrom sind Energie- und Wasserbilanz direkt miteinander verbunden. Der sensible Wärmestrom und der Bodenwärmestrom fördern den Wärmeaustausch zwischen dem Boden, der Oberfläche und der darüber liegenden Atmosphäre und steuern somit den Wärmeeffekt im Boden und in der bodennahen Luftschicht. Im interagierenden System Boden-Atmosphäre beeinflussen die Oberflächeneigenschaften, genauer die Gestaltung der Oberfläche (z.B. asphaltierte Straße, Wiesenfläche, Wassergebundene Wegedecke, begrüntes Dach), den Energie- und Wasseraustausch zwischen der Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre.⁸ Die Aufteilung der Oberflächenenergieströme, bestehend aus latentem Wärmestrom, sensiblem Wärmestrom und dem Bodenwärmestrom, nimmt demnach auf die klimatischen Bedingungen in Bodennähe, sowie auf das gesamte Stadtklima entscheidenden Einfluss.⁹

Auf Basis der Energie- und Wasserbilanz an der Oberfläche zeigen wir in diesem Beitrag auf, dass Städte in Österreich durch eine Steigerung der Entsiegelungsstrategie und Be-

1 Heilig, World Urbanization Prospects: The 2011 Revision United Nations (2012) abrufbar unter https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/WUP2011_Report.pdf (Zugriff am 11.3.2024).

2 Umweltbundesamt, Flächeninanspruchnahme (2021) abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/boden/flaecheninanspruchnahme> (Zugriff am 11.3.2024).

3 Doan et al., Increased Risk of Extreme Precipitation Over an Urban Agglomeration With Future Global Warming, Earth's Future 2022, <https://doi.org/10.1029/2021EF002563>.

4 Oke, The energetic basis of the urban heat island, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108/1982, 1.

5 Arnbjerg-Nielsen et al., Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: A review, Water Science and Technology 2013, 16; Fischer/Sippel/Knutti, Increasing probability of record-shattering climate extremes, Nature Climate Change 2021, 689.

6 Almaaitah et al., The potential of Blue-Green infrastructure as a climate change adaptation strategy: a systematic literature review, Blue-Green Systems 2021, 223.

7 Donati et al., Reconciling cities with nature: Identifying local Blue-Green Infrastructure interventions for regional biodiversity enhancement, Journal of Environmental Management 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115254>.

8 Mahmood et al., Land cover changes and their biogeophysical effects on climate, International Journal of Climatology 2014, 929.

9 Mahmood et al., International Journal of Climatology 2014, 929; Schwingshackl/Hirschi/Seneviratne, Quantifying Spatiotemporal Variations of Soil Moisture Control on Surface Energy Balance and Near-Surface Air Temperature, Journal of Climate 2017, 7105.

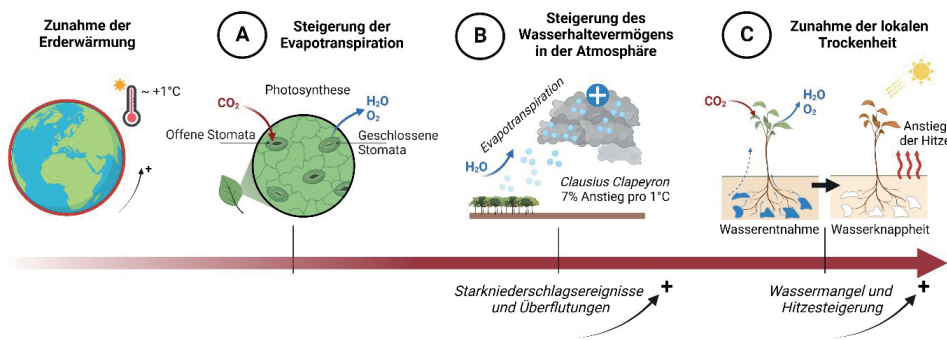


Abbildung 2: Auswirkungen der globalen Temperaturzunahme auf die regionalen Niederschlagsmuster und die lokale Wasserverfügbarkeit. Diese Abbildung wurde mit Biorender.com generiert

grünungsoffensive auf Änderungen der Temperatur und der Niederschlagsmuster reagieren und die Auswirkungen dämpfen können. Um der steigenden Variabilität der Wasserverfügbarkeit, insbesondere der Wasserknappheit durch länger anhaltende Trockenperioden und der damit einhergehenden Steigerung der Hitzebelastung, entgegenzuwirken braucht es jedoch innovativere Lösungsansätze.

In diesem Artikel werden die Ergebnisse aus den Modellierungen der Stadt Innsbruck präsentiert. Innsbruck, die Hauptstadt Tirols, liegt auf 574 m über dem Meeresspiegel mitten in den Alpen. Die Stadt wird im Norden und Süden durch Gebirgszüge begrenzt und öffnet sich nach Westen und Osten entlang des Inntals. In den Alpen gelegen, sieht sich die Stadt Innsbruck bereits jetzt mit den Auswirkungen des Klimawandels verstärkt konfrontiert.¹⁰ Die Bestandserhebung des Innsbrucker Klimas im Jahr 2020¹¹ und die 2023 erschienene Stadtklimaanalyse¹² zeigten bereits die bevorstehenden Herausforderungen, sowie innerstädtische Hotspots auf. Obwohl sich die Untersuchungen in dieser Arbeit auf die Stadt Innsbruck beziehen, sind die Erkenntnisse überregional und auf andere Städte übertragbar.

2. GLOBALE ÄNDERUNGEN DES WASSERKREISLAUFS MIT LOKALEN FOLGEN

Global gesehen verstärkt sich der Wasserkreislauf aufgrund der Erderwärmung,¹³ was sich auf die Verfügbarkeit von Oberflächenwasser (Niederschlag minus Verdunstung) sowie auf die Rückkopplungen zwischen der Bodenfeuchtigkeit und der Atmosphäre auswirkt.¹⁴ Eine Verstärkung des globalen Wasserkreislaufs bedeutet, dass sich die Wasserverfügbarkeit im Boden, an der Oberfläche und in der Atmosphäre ändert. Aufgrund der steigenden Temperaturen dauert die Vegetationsperiode länger¹⁵ und die Verdunstungsrate über dem Land nimmt zu¹⁶ (siehe Abbildung 2, A). Die Atmosphäre kann zudem aufgrund der höheren Temperaturen, wie durch die Clausius-Clapeyron-

Beziehung definiert,¹⁷ mehr Wasser aufnehmen (siehe Abbildung 2, B). Der gesteigerte Entzug von Wasser aus dem Boden durch die Verdunstung und das erhöhte Wasserhaltevermögen der Atmosphäre verändern die regionalen Niederschlagsmuster, begünstigen das Auftreten von Starkniederschlagsereignissen und führen über die Zeit zu einer Zunahme der lokalen Trockenheit¹⁸ (siehe Abbildung 2, C). Somit ist weniger Wasser im Boden und an der Oberfläche, die Mengenzunahme in der Atmosphäre wird lokal als Starkniederschlag von der Atmosphäre abgegeben. Übersättigte oder auch zu trockene Böden und vor allem versiegelte Flächen können diese Mengen nicht aufnehmen, wodurch sich der Abfluss erhöht und das Wasser nicht gespeichert werden kann.

In der jüngeren Vergangenheit konnten bereits vermehrt auftretende und länger anhaltende Hitzewellen¹⁹ und länger anhaltende Trockenperioden, wie jene zwischen 2018 und 2020²⁰ in Europa, beobachtet werden. Lokal führt das bereits in weiten Teilen Europas zu ausgetrockneten Böden und Wasserknappheit. Eine im Jahr 2019 erschienene Studie, die den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Dürreperioden im Alpenraum und großräumigen Wettersystemen der Nordhalbkugel untersuchte, bestätigt die Zunahme von Trockenperioden auch im Alpenraum.²¹

3. STEIGERUNG DES GRÜNANTEILS ZUR MINDERUNG DER STÄDTISCHEN HITZE

Unter Verwendung eines gekoppelten Geoinformationssystem-Computational-Fluid-Dynamics-Ansatzes (GIS-CFD-Ansatz)²² zur Modellierung mikro- und bioklimatischer Bedingungen sowie der Interaktionen zwischen dem Boden, der Oberfläche und der Atmosphäre wurden die Änderungen der quantitativen Werte der drei Energieströme der Oberflächenenergiebilanz mit unterschiedlicher Bodenbede-

10 *Smiattek/Kunstmann/Senatore*, EURO-CORDEX regional climate model analysis for the Greater Alpine Region: Performance and expected future change, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2016, 7710; *Gobiet et al.*, 21st century climate change in the European Alps – A review, *Science of The Total Environment* 2014, 1138.

11 *ZAMG*, Bestandsaufnahme des Klimas in Innsbruck (2020).

12 *Weatherpark*, Stadtklimaanalyse Innsbruck (2022).

13 *Huntington*, Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis, *Journal of Hydrology* 2006, 83.

14 *Zhou et al.*, Soil moisture-atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands, *Nature Climate Change* 2021, 38.

15 *Xu et al.*, Earlier leaf-out warms air in the north, *Nature Climate Change* 2020, 370.

16 *Wang et al.*, Recent increase in the observation-derived land evapotranspiration due to global warming, *Environmental Research Letters* 2022, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac4291> (Zugriff am 11.3.2024).

17 *O’Gorman/Schneider*, The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2009, 14773.

18 *Berg et al.*, Land-atmosphere feedbacks amplify aridity increase over land under global warming, *Nature Climate Change* 2016, 869.

19 *Sousa et al.*, Distinct influences of large-scale circulation and regional feedbacks in two exceptional 2019 European heatwaves, *Communications Earth & Environment* 2020, 48; *Xu et al.*, The record-breaking heat wave of June 2019 in Central Europe, *Atmospheric Science Letters* 2020, e964.

20 *Rakovec et al.*, The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe; *Earth’s Future* 2022, <https://doi.org/10.1029/2021EF002394> (Zugriff am 11.3.2024); *Teuling*, A hot future for European droughts, *Nature Climate Change* 2018, 364.

21 *Haslinger et al.*, Disentangling Drivers of Meteorological Droughts in the European Greater Alpine Region During the Last Two Centuries, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2019, 12404.

22 *Back et al.*, Integrating CFD-GIS modelling to refine urban heat and thermal comfort assessment, *Science of The Total Environment* 2023, 159729.

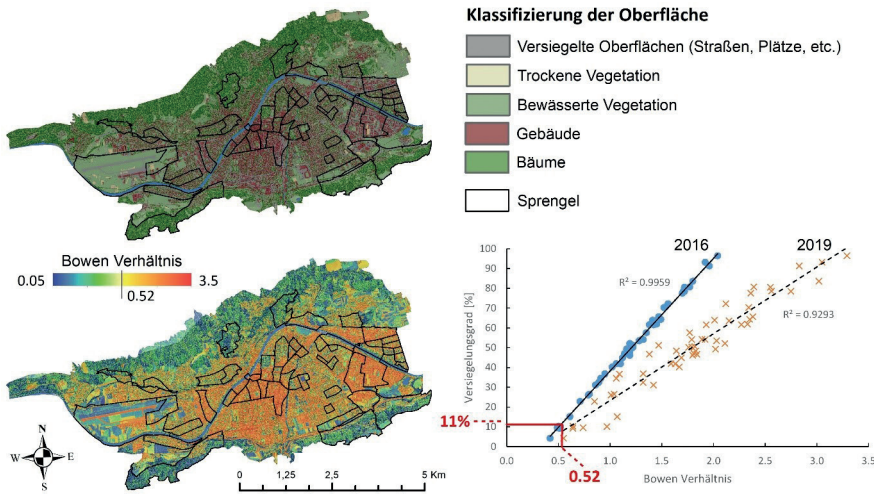


Abbildung 3: Korrelation zwischen dem Bowen-Verhältnis und dem Grad der Versiegelung auf Basis der Oberflächenklassifizierung für die Stadt Innsbruck und 52 Sprengel; Abbildung übernommen und verändert nach *Back, The role of urban water management in accelerating climate resilient cities* (PhD Thesis 2023).

ckung und deren Beziehungen untereinander sowie zu den meteorologischen Bedingungen, Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur analysiert. Anhand der Analysen aus dem CFD-GIS-gekoppelten Modell konnte eine Korrelation zwischen dem Bowen-Verhältnis und den Oberflächenenergieströmen hergestellt werden.

Das sogenannte Bowen-Verhältnis (β) beschreibt das Verhältnis zwischen sensiblem und latentem Wärmestrom. Ist dieses Verhältnis hoch ($\beta \geq 1$) und überwiegt der sensible Wärmestrom, deutet das auf eine geringe Bodenfeuchtigkeit hin. Dies führt zu einem Anstieg der Oberflächentemperatur. Konvektiver Wärmeaustausch wird dadurch verstärkt und die nahe der Oberfläche liegende Lufttemperatur steigt.²³ Umgekehrt signalisiert ein niedrigeres Bowen-Verhältnis ($\beta < 1$), bei dem der latente Wärmestrom dominiert, eine hohe Bodenfeuchtigkeit.²⁴ Dies resultiert in einer kühleren Oberflächentemperatur, einem stärker durch Verdunstung getriebenen Kühleffekt und einer Abnahme der Lufttemperatur in Bodennähe.²⁵

Da auch der Bodenwärmestrom eine sehr wichtige Rolle für das Stadtklima spielt, stellen wir nun den sensiblen Wärmestrom und den Bodenwärmestrom dem latenten Wärmestrom gegenüber und nutzen das Bowen-Verhältnis als Träger zur Bestimmung eines spezifischen Werts. Daraus ergibt sich ein Schwellenwert, der den oberflächeninduzierten Kühleffekt (höherer Anteil des latenten Wärmestroms führt zur Erhöhung der Verdunstungskühlung) vom Wärmeeffekt (höherer Anteil der Summe aus sensiblem Wärmestrom und Bodenwärmestrom führt zur Erhöhung der Wärmeübertragung zwischen dem Boden, der Oberfläche und der Atmosphäre) trennt. Dieser Schwellenwert liegt bei einem Bowen-Verhältnis von 0,52.²⁶ Soll also ein ganzheitlicher Kühleffekt an der Oberfläche erzielt werden, muss das Bowen-Verhältnis nicht nur unter 1 liegen (demnach wäre der latente Wärmestrom dominant gegenüber dem sensiblen Wärmestrom), sondern darf einen Wert von 0,52 nicht überschreiten. Nur dann ist der latente Wärmestrom dominant gegenüber dem sensiblen Wärmestrom und dem Bodenwärmestrom.

Diesen Schwellenwert haben wir in weiterer Folge mit dem Versiegelungsgrad in Verbindung gebracht, um festzustellen, wie hoch der Grünanteil eines bestimmten Gebiets sein muss, damit der Wert von 0,52 nicht überschritten wird. Somit kann festgestellt werden, wie hoch der Versiegelungsgrad maximal sein darf, damit in diesem Gebiet der oberflächeninduzierte Kühleffekt, unter Berücksichtigung ausreichender Wasserverfügbarkeit, dominiert. Um dies zu bestimmen, wurde mittels eines Ansatzes zur Modellierung der Oberflächenklassifizierung nach *Hiscock/Back/Kleidorfer/Urlich*²⁷ der Versiegelungsgrad und mittels des oben beschriebenen Ansatzes das Bowen-Verhältnis von insgesamt 53 Sprengeln in der Stadt Innsbruck ermittelt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich das Bowen-Verhältnis im Tagesverlauf ändern kann. In dieser Arbeit wurde das Bowen-Verhältnis zu einem bestimmten Zeitpunkt Ende August 2016 und 2019 bestimmt. Die Datengrundlage ist jeweils ein vom Land Tirol zur Verfügung gestelltes Falschfarbeninfrarotbild. Dieses wurde zu einem bestimmten Zeitpunkt per Überflug erstellt. Die beiden Jahre stellen jeweils unterschiedliche meteorologische Vorbedingungen dar. Im Sommer 2016 (Juni bis September) lag die Niederschlagssumme mit 490 mm über dem Mittel (Vergleich 1961 bis 1990), während der Sommer 2019 mit 269 mm deutlich zu trocken war. Die lineare Korrelation zwischen dem Bowen-Verhältnis und dem Versiegelungsgrad ist in Abbildung 3 dargestellt.

Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass ein Versiegelungsgrad von maximal 11 % innerhalb eines bestimmten Gebiets anzustreben ist, damit ein Bowen-Verhältnis unter 0,52 erreicht werden kann. Dies unter der Voraussetzung, dass der Grünanteil in diesem Gebiet ausreichend mit Wasser versorgt wird. Dies bekräftigt die Wichtigkeit der Entsiegelung und zugleich der Begrünung unserer Städte. Um diese Zahl in Relation zu setzen, wurde ein bestimmtes Gebiet in Innsbruck künstlich begrünt. Abbildung 4 zeigt dieses Gebiet in der aktuellen Situation (links) und unter einer intensiven Begrünung (rechts). Nach der Begrünung bleiben 30 % der ursprünglich versiegelten Fläche bestehen. Das Gebiet wird durch die verbliebenen Straßenzüge in zwei Blöcke unterteilt. Auffällig ist, dass alle Dächer begrünt werden müssen, um diesen bestimmten Wert zu erreichen.

23 *Schwingshackl/Hirschi/Seneviratne, Journal of Climate* 2017, 7105.

24 *Mahmood et al., International Journal of Climatology* 2014, 929.

25 *Li et al., Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? Science* 2019, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aau4299> (Zugriff am 11.3.2024).

26 *Back et al., Science of The Total Environment* 2023, 159729.

27 *Hiscock/Back/Kleidorfer/Urlich, A GIS-based Land Cover Classification Approach Suitable for Fine-scale Urban Water Management, Water Resources Management* 2021, 1339.

Wenn auch sehr optimistisch gedacht, ein solches Vorgehen wird in Städten zum Teil bereits durchgeführt und ist unter dem Namen „Barcelona Superblock“ geläufig.²⁸ Dieses Konzept lässt motorisierte Straßenzüge innerhalb von Häuserblöcken auf, wodurch neue Freiflächen für Fußgänger und Radfahrer, aber auch für neue Gestaltungsmöglichkeiten wie die Implementierung blau-grüner Infrastruktur entstehen. Das Beispiel aus Innsbruck zeigt, dass, wenn auch nur mit einer sehr intensiven Begrünung, das Ziel, den Versiegelungsgrad in bestimmten Gebieten unter 11 % zu senken und dennoch ausreichend Straßenzüge zur Verfügung zu haben, theoretisch machbar ist oder zumindest als Diskussionsgrundlage für zukünftige Stadtentwicklung verwendet werden kann.

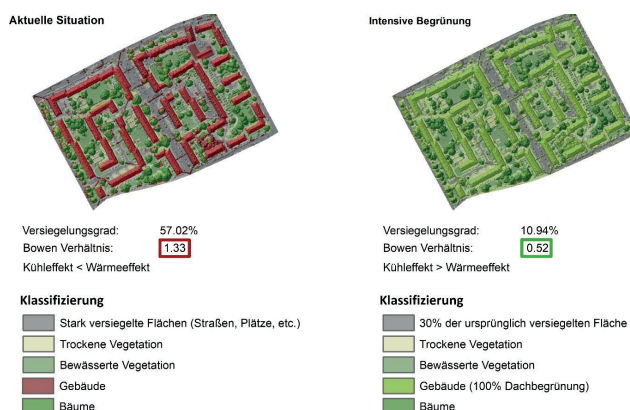


Abbildung 4: Potenzielle Darstellung einer Entsiegelung und Begrünung eines bestimmten Gebiets in Innsbruck; Abbildung übernommen und verändert nach Back, Urban water management (2023)

4. STEIGENDER WASSERBEDARF ALS NEGATIVE RÜCKKOPPLUNG

Eine intensive Begrünung, wie sie in Abbildung 4 dargestellt wird, bedeutet, dass ausreichend Wasser zur Bewässerung der Grünflächen und Bäume zur Verfügung stehen muss. Allein durch den Niederschlag kann das mit dem sich verstärkenden Klimawandel zumindest nicht durchgängig gewährleistet werden. Kommt es zu länger anhaltenden Trockenperioden, kann eine Unterversorgung für die Pflanzen bedrohlich werden. Die Verdunstungskühlung wird eingestellt und die Pflanzen fangen an, zu verwelken. Somit sollte spätestens nach Erreichen des Welkepunkts der Boden bewässert und die Pflanze mit Wasser versorgt werden.

Durch die Intensivierung des globalen Wasserkreislaufs, wie oben beschrieben, steigt die Variabilität der Wasserverfügbarkeit an. Neben der Aufrechterhaltung der Wasserversorgung der Agrarflächen zur Sicherstellung der Nahrungsmittelversorgung wird auch eine Gewährleistung konstanter Wasserverfügbarkeit zur Bewässerung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen (z.B. blau-grüne Infrastruktur) immer wichtiger. Nur so können die pflanzlich geprägten Anpassungsmaßnahmen auch weiterhin zur Verdunstungskühlung beitragen und den steigenden Temperaturen entgegenwirken.

Im Folgenden wird anhand eines theoretischen Rechenbeispiels des Wasserverbrauchs und der Wasserverfügbarkeit

der Stadt Innsbruck die negative Rückkopplung eines Anstiegs begrünter Flächen während anhaltender Trockenheit und höheren Temperaturen dargestellt. Die verwendeten Zahlen sind als Richtwerte zu verstehen und können sich durch mehrere Faktoren je nach Stadt und Region ändern.

Neunteufel/Richard/Perfler²⁹ geben an, dass der Durchschnittswasserverbrauch einer Person in Österreich pro Tag im Sommer bei 150 l, im Winter bei 120 l und im Jahresdurchschnitt bei 135 l liegt. Zudem geben die Autoren an, dass sich der Wasserverbrauch pro Person und Tag mit steigenden Temperaturen und länger anhaltenden Trockenperioden ändert. Ab Temperaturen über 20 °C und Trockenperioden, die länger als zehn Tage andauern, kann der Verbrauch auf 174 % ansteigen.³⁰ Im Sommer würde der Wasserverbrauch damit bei 261 l pro Person und Tag liegen. Die Innsbrucker Kommunalbetriebe (IKB) versorgen 150.077 Einwohner und rechnen mit einem Wasserverbrauch pro Einwohner und Tag von 110,4 l.³¹ Das Wasserwerk Innsbruck fördert mit seinen zwölf Quellen und zwei Brunnen etwa 33.000 m³ Wasser pro Tag,³² um die Einwohner mit Trinkwasser zu versorgen.

Unter der Annahme vermehrt auftretender Hitzetage und generell wärmerer Temperaturen sowie länger anhaltender Trockenperioden kann also auch davon ausgegangen werden, dass die Anzahl an Tagen mit einem Wasserverbrauch weit über den Durchschnitt steigt. Geht man, wie oben vorgerechnet, vom Extremfall aus und der Verbrauch erhöht sich auf 174 %, so beläuft sich der Wasserverbrauch auf 191,4 l pro Person und Tag. Auf die gesamte Stadt Innsbruck (150.077 Einwohner) berechnet, hätte dies einen Gesamtverbrauch von 28.725 m³ pro Tag zur Folge. Diese Menge könnte vom Wasserwerk Innsbruck gedeckt werden.

Neunteufel/Richard/Perfler³³ berücksichtigen beim Jahresdurchschnitt des Wasserverbrauchs pro Person und Tag einen Verbrauch zur Bewässerung privater Gärten von 12 l pro Person und Tag. Wird dieser Betrag in der Berechnung des Gesamtwasserverbrauchs der Einwohner Innsbrucks abgezogen, ergibt sich ein Wasserverbrauch von 26.924 m³ pro Tag ohne Bewässerung. Somit überschreitet das Wasserdargebot den Wasserbedarf um ca. 6.000 m³ Trinkwasser pro Tag durchschnittlich, dies allerdings ohne jegliche Bewässerung.

Zur Abschätzung des Wasserverbrauchs zur Bewässerung für die drei Kategorien Gärten, Freizeitflächen und Äcker, Wiesen und Weiden im Dauersiedlungsraum Bezirk Innsbruck-Stadt, entnehmen wir die Fläche der jeweiligen Kategorie dem Tirol-Atlas aus dem Jahr 2021,³⁴ der sich auf Daten des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen bezieht. Demnach nehmen Gärten eine Fläche von 873 ha, Freizeitflächen eine Fläche von 91 ha sowie Äcker, Wiesen und Weiden eine Fläche von 686 ha im Dauersiedlungsraum Bezirk Innsbruck-Stadt in Anspruch. Unter Berücksichtigung

29 Neunteufel/Richard/Perfler, Water demand: the Austrian end-use study and conclusions for the future, Water Supply 2014, 205.

30 Neunteufel/Richard/Perfler, Water Supply 2014, 205.

31 IKB, Innsbrucker Wasser (2023) abrufbar unter <https://www.ikb.at/wasserqualitaet-innsbruck> (Zugriff am 11.3.2024).

32 ÖVGW, Wasserwerk Innsbruck (2023) abrufbar unter <https://wasserwerk.at/home/wasserwerke/innsbruck> (Zugriff am 11.3.2024).

33 Neunteufel/Richard/Perfler, Water Supply 2014, 205.

34 Tirol-Atlas, Flächennutzung im Dauersiedlungsraum – Bezirk Innsbruck-Stadt (2021) abrufbar unter <https://tirolatlas.uibk.ac.at/topics/territory/reginfo/data/details> (Zugriff am 11.3.2024).

28 Eggimann, The potential of implementing superblocks for multifunctional street use in cities, Nature Sustainability 2022, 406.

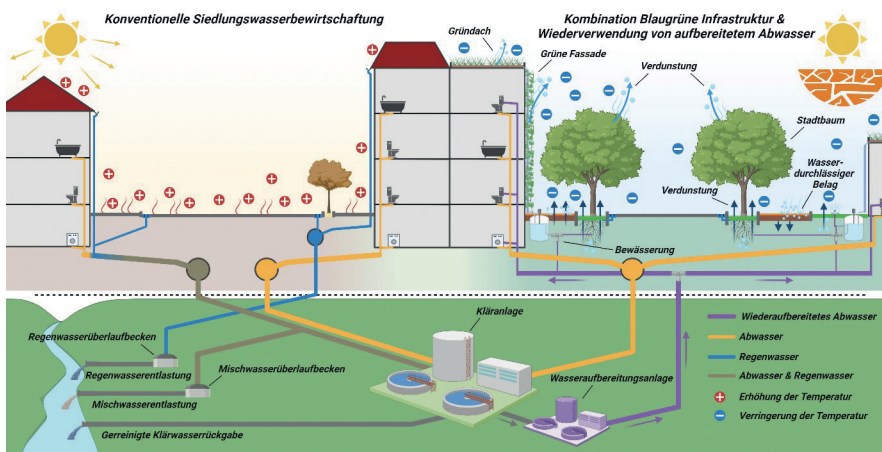


Abbildung 5: Schematische Abbildung der Kombination blaugrüner Infrastruktur und Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser zur Bewässerung. Diese Abbildung wurde mit Biorender.com generiert

einer hohen Variabilität des Wasserverbrauchs zur Bewässerung je nach Pflanzenart, Bodenart sowie meteorologischer und klimatischer Bedingungen, nehmen wir in Anlehnung an *Reyes-Paecke et al.*³⁵ und die Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern³⁶ einen täglichen Bewässerungsbedarf von 1 l/m² für alle Flächen an. Dies entspricht einer Schätzung des täglichen Wasserbedarfs einer Grünfläche in der Stadt unter erhöhten Temperaturen und trockenen Bedingungen. In Summe für alle Flächen der drei Kategorien entspricht dies einem täglichen Bewässerungsbedarf von 16.500 m³. Dafür wäre aktuell die Wasserverfügbarkeit nicht gegeben.

Bei erhöhten Temperaturen und anhaltender Trockenheit kann die Trinkwasserversorgung in Innsbruck aufrechterhalten werden. Zur Bewässerung der Grünflächen und Aufrechterhaltung des Kühleffekts durch die Verdunstung in der Stadt müssen jedoch andere Quellen zur Verfügung stehen. Geht man nun zudem von einem Anstieg an begrünter Fläche im Stadtgebiet, durch die vermehrte Implementierung Blaugrüner Infrastruktur, aus, steigt auch der Wasserbedarf über die hier berechneten Werte. Einer Begrünungsoffensive in der Stadt muss also auch eine nachhaltige und sichere Wasserversorgung zur Bewässerung einhergehen.

5. ALTERNATIVE WASSERRESSOURCEN ZUR STEIGERUNG DER RESILIENZ

Um dieser Unsicherheit entgegenzuwirken, muss ein erneuter Paradigmenwechsel in der Siedlungswasserwirtschaft stattfinden und Letztere zudem einen erhöhten Stellenwert in der Stadtplanung einnehmen. Neben der Trinkwasserversorgung, der Abwasserentsorgung und der dezentralen Niederschlagswasserbehandlung muss sich die Siedlungswasserwirtschaft verstärkt mit der Thematik alternativer Wasserressourcen zur Bewässerung blau-grüner Infrastrukturen auseinandersetzen. Weiters braucht es ganzheitliche und flexiblere Versorgungssysteme sowohl für die blau-grüne Infrastruktur als auch für die Landwirtschaft in und außerhalb der Stadt.

³⁵ *Reyes-Paecke et al.*, Irrigation of green spaces and residential gardens in a Mediterranean metropolis: Gaps and opportunities for climate change adaptation, *Landscape and Urban Planning* 2019, 34.

³⁶ *ALB Bayern*, Bewässernachregeln – Wasserbedarf urbaner Grünflächen (2020) abrufbar unter <https://www.alb-bayern.de/media/files/0004/bb.bef7-gr-nfl-chenurban-20200629.pdf>/PDFBrowserview (Zugriff am 11.3.2024).

Die Bewässerung der städtischen Vegetation und – wo möglich – auch der blauen Infrastruktur (Brunnen, Teiche etc.) unter Berücksichtigung hygienischer Vorschriften sollte in Zukunft nicht nur direkt über das Trinkwasser erfolgen, sondern muss auch über vermehrte Kreislaufwirtschaft (Regenwasserspeicherung, Nutzung von gereinigtem Abwasser) nachgedacht werden. Weltweit gibt es bereits unterschiedliche Ansätze, das Wasser nach der Reinigung in der Kläranlage weiter aufzubereiten und für Bewässerungszwecke wiederzuverwenden.³⁷ Dadurch können die Wasserressourcen geschont und kann auch das Grundwasser, wo nötig, aufgefüllt werden.

Neben der Entsiegelung und Begrünung unserer Städte muss auch die Wasserversorgung gewährleistet sein, damit die Wasserbilanz wieder einem natürlichen Zustand angenähert werden kann und die Verdunstungskühlung gewährleistet ist (siehe Abbildung 5). Hinzu kommt, dass die Speicherung von Wasser in niederschlagsreichen Zeiten zur Versorgung in niederschlagsarmen Zeiten nur über eine gewisse Spannweite zwischen den beiden Perioden und in Abhängigkeit der Größe des Speichervolumens funktionieren kann. Eine dezentrale Niederschlagswasserspeicherung, insbesondere auf privaten Grundstücken, ist also in ihrer Funktionsweise zeitlich begrenzt. Eine Möglichkeit, diese Problematik zu bewältigen, besteht im Ansatz, die Grundwasserreserven gezielt während niederschlagsreichen Zeiten aufzufüllen. Auf Basis des eingespeisten Volumens besteht dann die Möglichkeit, dasselbe Volumen dem Grundwasser während niederschlagsarmen Zeiten für Bewässerungszwecke wieder zu entziehen. Ein solcher Ansatz wird auf internationaler Ebene bereits diskutiert.³⁸

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Wasser wird in Zukunft für klimaresistente Städte eine tragende Rolle spielen. Durch den Klimawandel verändern sich Temperatur und Niederschlagsmuster, ein zunehmend verstärkter globaler Wasserkreislauf erhöht die Wahrscheinlichkeit länger anhaltender lokaler Trockenperioden. Durch Entsiegelung und Begrünung unserer Städte lassen sich die

³⁷ *Li et al.*, *Science* 2019, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aau4299>; *Sun et al.*, Assessing and Managing Large-Scale Geochemical Impacts From Groundwater Replenishment With Highly Treated Reclaimed Wastewater, *Water Resources Research* 2020, <https://doi.org/10.1029/2020WR028066> (Zugriff am 11.3.2024).

³⁸ *Bresinsky et al.*, Managing climate change impacts on the Western Mountain Aquifer: Implications for Mediterranean karst groundwater resources, *Journal of Hydrology X* 2023, 100153.

Auswirkungen erhöhter Temperaturen und, bis zu einer gewissen jährlichen Wiederkehrzeit, häufiger auftretender Starkniederschläge dämpfen. Damit eine Verdunstungskühlung durch die blau-grüne Infrastruktur aufrechterhalten werden kann, muss die Vegetation jedoch ausreichend mit Wasser versorgt werden.

Am Beispiel der Stadt Innsbruck wurden die potenziellen Probleme in der Wasserversorgung für die Bewässerung theoretisch aufgeführt. Zwar kann mit den getätigten Annahmen auch ein zukünftiger stark steigender Wasserverbrauch der Bevölkerung abgedeckt werden, jedoch ist eine vollständige Bewässerung von Grünflächen nicht mehr möglich. Je nach geografischer Lage der Stadt und mit Voranschreiten des Klimawandels kann sich diese Situation deutlich verschärfen. Daher funktioniert die blau-grüne Infrastruktur nur mit einem strategischen Wassermanagement, das für eine ausreichende Wasserverfügbarkeit zur Unterstützung der ökologischen Systeme und Aufrechterhaltung des Kühleffekts sorgt.

Um den erhöhten Wasserbedarf, der durch die Begrünungsoffensive, aber auch bedingt durch die steigenden Temperaturen entsteht, zu decken, müssen Städte auf alternative Wasserressourcen umsteigen. Innovative Lösungsansätze wie die Wasserwiederaufbereitung, die verstärkte Grundwasseranreicherung und die Kombination mehrerer Versorgungsmöglichkeiten zu einem ganzheitlichen und flexiblen Versorgungsnetz sind anzustreben. Um unsere Städte resilient gegenüber den zukünftigen Herausforderungen zu gestalten, muss die Rolle des Wassers in das Zentrum der Stadtplanung rücken.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist Teil des vom Österreichischen Klima- und Energiefonds geförderten Projekts BlueGreenCities (Projektnummer KR21KB0K00001; Förderzeitraum Oktober 2022 bis September 2025) und des durch die IKB-Forschungsförderung (Innsbrucker Kommunalbetriebe) geförderten Projekts OptiClim (Förderzeitraum Juni 2022 bis Mai 2023).

AUTOREN

Dr. **Yannick Back**

Postdoctoral Researcher am Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Umwelttechnik

Universität Innsbruck

Technikerstraße 13

6020 Innsbruck

yannick.back@uibk.ac.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Manfred Kleidorfer**

Studiendekan der Fakultät für Technische Wissenschaften

Professor für nachhaltige Entwicklung urbaner Wasserinfrastruktur

Universität Innsbruck

Technikerstraße 13

6020 Innsbruck

manfred.kleidorfer@uibk.ac.at

