


AQUA & GAS

05. September 2023

SCHWAMMSTADT

Umsetzung Blau-Grüner Infrastruktur weltweit

Die Umsetzung Blau-Grüner Infrastrukturen ist in allen grösseren Schweizer Städten ein äusserst aktuelles Thema. Treibende Faktoren waren meist die Förderung der Biodiversität und die Notwendigkeit von hitzemindernden Massnahmen im urbanen Raum, und weniger die Siedlungswasserwirtschaft. Ausserhalb der Schweiz hingegen wurde die Umsetzung in den vergangenen Jahrzehnten stark auch aus Sicht der Regenwasserbewirtschaftung und Sicherung der Wasserqualität in den oberflächlichen Gewässern vorangetrieben. Dieser Artikel fasst wichtige Erfahrungen und Erkenntnisse aus der weltweiten Umsetzung zusammen.

Virginia Smith, Lauren M. Cook, Silvia Oppliger, 



(Bild: © AdobeStock)

Klimawandel und Urbanisierung stellen für die städtischen Entwässerungssysteme eine wachsende Belastung dar [1-3]. Es müssen Massnahmen ergriffen werden, um das Risiko von Überschwemmungen und die Einleitung von Schadstoffen in die Gewässer, z. B. durch Mischabwasserüberläufe, zu verringern [4, 5]. Blau-Grüne Infrastrukturen (BGI) [6] wie städtische Feuchtgebiete, begrünte Dächer oder bepflanzte Rückhaltebecken werden zunehmend als kosteneffiziente Lösung für diese Probleme erkannt, da sie die Menge und Geschwindigkeit, mit der das Regenwasser in die Kanalisation gelangt, verringern können [7-9]. Obwohl es viele Definitionen gibt, definieren wir hier BGI in Anlehnung an *Ghofrani et al.* als «ein zusammenhängendes Netzwerk von natürlichen und gestalteten Landschaftskomponenten, einschliesslich Gewässern sowie Grün und Freiflächen, die mehrere Funktionen erfüllen» [6]. Mit Ursprüngen in der Landschaftsökologie und -planung [10,11] entwickelten sich die BGI für die Siedlungswasserwirtschaft aus den US-amerikanischen *Best Management Practices* (BMP) Anfang der 1980er-Jahre und dem Konzept *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), das in den 1960er-Jahren in Australien eingeführt wurde. Die BMP in den USA wurden entwickelt, um die Ziele des *National Urban Runoff Program* [12] zu erreichen: ganzheitlichere Reduzierung der Abflussmengen, Erosionsschutz und Grundwasseranreicherung [13]. Im Jahr 1994 führte Australien einen Leitfaden für wassersensible Gestaltung urbaner Räume (WSUD) ein und folgte damit seinem zuvor definierten Konzept [14].

Zu dieser Zeit entwickelten und implementierten viele Länder auf der ganzen Welt ähnliche naturbasierte Lösungen für die Regenabwasserbewirtschaftung [15]. Nachhaltige Siedlungsentwässerungssysteme (*Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS*) werden in Grossbritannien und Deutschland seit den 1990er-Jahren eingesetzt, um die Probleme der

Siedlungsentwässerung zu mildern [16]. China hat BGI später eingeführt. Im Jahr 2014 wurde das Sponge-City-Programm ins Leben gerufen, das einen umfassenden Rahmen für die Regenabwasserbewirtschaftung bietet [7]. Der Begriff Schwammstadt, der das Konzept der BGI für die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung hervorragend wiedergibt, ist heute einer der gängigsten Begriffe für BGI weltweit.

In den letzten Jahren wurden BGI weltweit für die Regenabwasserbewirtschaftung in erstaunlichem Umfang eingeführt. Die Stadt Philadelphia (USA), die vor einem Jahrzehnt das Programm «Green Cities Clean Waters» (Grüne Städte und saubere Gewässer) ins Leben gerufen hatte, um die Mischabwasserüberläufe zu verringern [17], installierte mehr als 2800 BGI-Elemente in der 370 km² grossen Stadt [18]. Ähnliches passierte in Singapur, Melbourne (Australien), Tianjin (China), Berlin (Deutschland), Neuseeland und Maryland (USA), die zu den ersten Anwendern von BGI gehörten [7, 19]. Anhand von Beobachtungen, Experimenten und Modellauswertungen dieser bestehenden Systeme gibt es immer mehr Belege dafür, dass BGI die Regenwasserabflussmenge wirksam reduzieren und die Wasserqualität verbessern können [8, 20–22]. Dennoch hat jede Art von BGI unterschiedliche Auswirkungen. Beispielsweise funktionieren städtische Feuchtgebiete und Regenwasserteiche mit zusätzlicher Einstaufunktion auf der Ebene des Einzugsgebiets. Sie sind in der Regel darauf ausgelegt, Starkregenereignisse abzuschwächen und Überschwemmungen zu reduzieren. Kleinräumige BGI, wie z. B. bepflanzte Rückhaltebecken und Gründächer, werden häufiger zur Verbesserung der lokalen Wasserqualität in den Gewässern eingesetzt, da sie bei kleinen bis mittleren Regenereignissen in der Regel 100% des Wassers und der Schadstoffe auffangen und zurückhalten [23–25].

BGI-Umsetzung in der Schweiz: Von Wegbereitend bis Nachhinkend

Trotz des weltweiten Erfolgs von BGI für die Siedlungswasserwirtschaft ist die Regenwasserbewirtschaftung in der Schweiz kein treibender Faktor für den Bau solcher Infrastrukturen. Noch immer sind andere Faktoren ausschlaggebend. Viele Schweizer Städte sind führend bei der Einführung von BGI zur Förderung der Biodiversität und der Lebensqualität. Grund dafür sind Vorschriften wie die zur Dachbegrünung in Basel [26], Zürich [27] und Lausanne [28–30] oder das Schweizer Gewässerschutzgesetz (GSchG) [31]. So erarbeitete Zürich wegen des GSchG sein «Bachöffnungskonzept» [32], in dessen Rahmen bis heute 16 km eingedolte Bäche freigelegt und revitalisiert wurden. Damit sollte unter anderem sichergestellt werden, dass der vielfältigen Flora und Fauna nicht die Lebensgrundlage entzogen wird [32]. Gleichzeitig wurden schätzungsweise 220–320 l/s Wasser von der Kläranlage ferngehalten und rund 16 Mio. Franken eingespart, indem keine neuen Rohre verlegt werden mussten [32, 33].

Obwohl diese Bemühungen bahnbrechend waren, kämpft die Schweiz immer noch damit, bodengebundene BGI, die häufig eine Versickerung von Wasser vorsehen, wie z. B. bepflanzte Rückhaltebecken, Versickerungsgräben, Mulden-Rigolen-Systeme, Rückhalteteiche und sickerfähige Beläge (*Fig. 1*), in grossem Massstab umzusetzen. Dieses Manko ist auf mehrere Gründe zurückzuführen: Erstens wird dem Grundwasserschutz eine sehr hohe Priorität eingeräumt, zudem gelten strenge Anforderungen an die Art der Versickerung [34, 35]. Zweitens wird die Versickerung von Niederschlagswasser auf privaten Grundstücken zwar vorrangig gefordert, aber oft erst im Baugenehmigungsverfahren, wenn die notwendige Fläche für den Bau von BGI bereits anderweitig genutzt wird. Auch die hohen Grundstückspreise, vor allem in städtischen Gebieten, sind nicht förderlich, um unbebaute Flächen für die BGI-Nutzung bereitzuhalten.

Im Bereich der öffentlichen Flächen wurden in den letzten zwei Jahrzehnten viele Strassenabwasserbehandlungsanlagen (SABA) als BGI für Nationalstrassen gebaut [36], aber der verbleibende Strassenraum – insbesondere in städtischen Gebieten – wurde versiegelt und entwässert, statt z. B. öffentliche Parkplätze entlang von Quartierstrassen wasserdurchlässig zu gestalten und so mit gutem Beispiel voranzugehen (*Fig. 2*). Und nicht zuletzt haben Schweizer Städte relativ milde Niederschläge im Vergleich zu Städten an den Küsten, die mit Orkanen, extremen Überschwemmungen und starken konvektiven Stürmen konfrontiert sind. Allerdings führt der Klimawandel auch hierzulande zu häufigeren extremen Wetterereignissen wie Hitze, Trockenheit und Starkregen [37]. Ingenieure, Planer und lokale Behörden müssen unbedingt zusammenarbeiten, um mit BGI die Siedlungswasserwirtschaft, besonders in Bezug auf die Regenabwasserbewirtschaftung, in der Schweiz zukunftstauglich zu gestalten.

Lessons Learned und Wissenstransfer in die Schweiz

Aufgrund der umfangreichen Umsetzung von BGI-Programmen in anderen Ländern können die Schweizer Gemeinden aus deren Erfolgen, Misserfolgen und Fortschritten lernen, speziell in Bezug auf Leistung, Betrieb und Wartung von BGI [9]. Glücklicherweise ist die Schweiz aufgrund ihrer Kultur der

Zusammenarbeit perfekt aufgestellt, um dieses Wissen zu absorbieren und miteinander über die zukunftsfähigsten Lösungen zu diskutieren. Einige der Lehren, die aus der weit verbreiteten Einführung von BGI gezogen wurden, werden im Folgenden erläutert:

- Terminologie (s. Box)
- Erfüllung der Anforderungen an den Unterhalt von BGI
- Verwaltung und gemeinsame Nutzung von Daten
- Flexible und multifunktionale Gestaltung von BGI

Anforderungen an den Unterhalt erfüllen

Die erste Generation von BGI machte deutlich, dass ein tieferes Verständnis des Unterhalts und der Kontrolle erforderlich ist, um die Funktionsfähigkeit dieser Systeme langfristig und nachhaltig zu gewährleisten [44, 45] (*Fig. 3*). So braucht es den regelmässigen Unterhalt, um sowohl die vielen Vorteile der BGI und die vorgesehenen Leistungsfähigkeiten langfristig zu erhalten als auch die der Planung zugrundeliegenden behördlichen Anforderungen jederzeit zu erfüllen [44–46]. Der Unterhalt wurde schon früh als ein Hindernis für BGI erkannt [47] und bleibt ein zentraler Problempunkt [9, 46]. Eine Herausforderung für Gemeinden, die BGI einsetzen, sind die Kosten für die oft arbeitsintensiven Unterhaltsprogramme, welche letztlich die Umsetzung behindern können [48]. Wird bei BGI-Programmen dem Unterhalt nicht genügend Aufmerksamkeit geschenkt, beginnen die Folgen aufgrund mangelnder Wartung den geplanten Nutzen der BGI zu überwiegen. In diesen Fällen ist eine umfassende Instandsetzung der BGI erforderlich, die zeit- und kostenintensiv ist [49]. Mit der Zunahme von BGI-Programmen in den USA haben mehrere Städte und Bundesstaaten wie Philadelphia und Minnesota Handbücher für den Unterhalt entwickelt [50, 51]. Diese stehen online zur freien Verfügung. Im Laufe der Zeit kann die Leistung von BGI durch die Ansammlung von Sedimenten, Schadstoffen und Abfällen, Hochwasserereignisse, die zu Erosion führen, schlechte Planung und Umsetzung oder unzureichende Wartung beeinträchtigt werden [46]. Diese Prozesse sind räumlich und zeitlich sehr variabel, und die notwendige Instandhaltung zur wirksamen Erhaltung der Funktion und Leistung von BGI ist oft schwer vorherzusagen.

BGI-Terminologie

Der Begriff Blau-Grüne Infrastruktur (BGI) wird zwar in Europa und der Schweiz häufig verwendet, ist aber relativ neu. BGI betont das «Blau» in grüner Infrastruktur. Als Begriff ist «grüne Infrastruktur» weltweit gut verbreitet und wird häufig zur Beschreibung einer Reihe von Elementen verwendet, die Wasser vor Ort versickern oder speichern, zu denen auch durchlässige Pflaster und Regentonnen gehören (beide vegetationsfrei) [38]. Andere gebräuchliche Begriffe sowie ihre Übersetzungen auf Deutsch und Französisch sind in der *Aqua & Gas Ausgabe 9/2023* als Tabelle aufgeführt.

Kontrollen nach dem Bau haben gezeigt, dass Funktion und Instandhaltung je nach Art der BGI, Bauweise und Standortbedingungen stark variieren [46]. Dies führt zu einem sehr unterschiedlichen Wartungsbedarf und letztlich zu einer unterschiedlichen Leistung im Laufe der Zeit [45, 46, 52]. Darüber hinaus erschweren verschiedene Faktoren die genaue Bestimmung des Instandhaltungsbedarfs für einzelne BGI: BGI sind meistens dezentrale Anlagen und somit über das gesamte Siedlungsgebiet weitläufig verteilt. Zudem sind viele verschiedene Eigentümer beteiligt, sowohl private wie öffentliche. Und nicht zuletzt finden in solch naturnahen Anlagen viele komplexe Prozesse statt, die je nach Anlagentyp, Einzugsgebiet, Regencharakteristika u.v.m. sehr unterschiedlich ablaufen. Um diese Hindernisse bei der Instandhaltung zu überwinden, ist ein umfassendes, anpassungsfähiges, risikobasiertes und kosteneffizientes Kontroll- und Unterhaltsprogramm erforderlich, zumal BGI-Programme eine zunehmend grössere und kritische Rolle für eine Gemeinde spielen [9].

Gemeinsame Nutzung von Daten

Um die Gestaltung von BGI weiterzuentwickeln, vernetzte Systeme zu schaffen und nachhaltige Unterhaltsprogramme zu entwickeln, sind Messdaten erforderlich [53, 54]. Derzeit bewegen sich die Gemeinden in Richtung datengestützte Planung und Wartung und verlangen immer häufiger eine Überwachung, um die Leistung ihrer Regenwasserbewirtschaftungspläne nachzuweisen (z. B. *Measure W in Los Angeles; Storm Water Grant Program 2019*, <https://safecleanwaterla.org/>). Dadurch wird eine Vielzahl von Daten erzeugt, die nur mit einem effizienten Datenmodell genutzt werden können [55]. Für Gemeinden, die Regenwasserbewirtschaftungsstrategien entwickeln, umsetzen und verwalten, können Daten den Transfer von bewährten Verfahren und Erfahrungen aus anderen Gemeinden erleichtern und so die kontinuierliche Weiterentwicklung des Stands der Technik in der Regenwasserbewirtschaftung unterstützen. Grosse Datensammlungen werden Aufschluss darüber geben, wie die naturnahe Regenwasserinfrastruktur im Laufe der Zeit funktioniert. Aber die Wissenschaft rund um die Regenwasserdatenverwaltung steckt noch in den Kinderschuhen [55].

Um diese Daten nutzen zu können, braucht es ein Format, das den Datenaustausch fördert. Die aktuelle Möglichkeit, grosse Datenmengen zu sammeln, schafft die Voraussetzung, Funktion und Leistung von BGI zu verstehen [54]. Die meisten vorhandenen Daten zur Regenwasserinfrastruktur sind nach Bewirtschaftern, Forschenden oder Gemeinden und oft nach Abteilungen innerhalb der Gemeinden gegliedert. Dies macht es schwierig, Daten und Erkenntnisse über die Gemeindegrenzen hinaus zu übertragen. Ausserdem ist die Datenbankarchitektur selbst auf regionaler und kommunaler Ebene unterschiedlich, sodass die Daten nicht nahtlos integriert werden können. Darüber hinaus sind eine kontrollierte Sprache, ein kontrolliertes Format und Metadaten in den gesammelten Daten von entscheidender Bedeutung, um uneinheitliche Systeme mit sich überschneidenden und falsch benannten Variablencodes oder falsch interpretierten Daten zu vermeiden [56, 57]. Ohne einen gemeinsamen Standard müssen die Daten bei der Übertragung zwischen Organisationen oft übersetzt oder umgewandelt werden, was einen erheblichen Zeitaufwand erfordert [58].

Dies verlangsamt die Datenabfrage und liefert Ergebnisse mit irrelevanten oder fehlenden Daten, was die gemeinsame Nutzung von Daten und eine tiefergehende Analyse einschränkt [59]. Die fehlende Kontinuität zwischen den Datensystemen schränkt die Effizienz und den Nutzen ein, der aus Daten zu Regenwasserinfrastrukturen gezogen werden kann. Angesichts der Erfahrungen in den USA wurde die Notwendigkeit eines umfassenden Rahmens für Wasserdaten auf nationaler Ebene erkannt (z. B. der vorgeschlagene *Water Data Act* (H.R. 7792) [60]) und sollte auf die Schweiz übertragen werden.

Widerstandsfähigkeit und Flexibilität von BGI-Systemen

Die Überwachung und Instandhaltung von BGI wird in Zukunft eine immer wichtigere Rolle spielen, da wir uns weiter auf eine Periode der Nichtbeständigkeit wegen des Klimawandels zubewegen. Wir können uns nicht länger auf die Annahmen der Vergangenheit verlassen, dass die Siedlungsentwässerungssysteme reagieren wie bisher [61, 62]. Dies gilt auch für BGI, die in erster Linie lebende Systeme sind, die dem Wetter und anderen Stressfaktoren wie Trockenheit, Schädlingen, Schadstoffen aus dem Strassenverkehr und schnell fliessendem Oberflächenabfluss ausgesetzt sind. BGI müssen nicht nur überwacht und gewartet werden, um ihre Leistungsfähigkeit unter Stress zu gewährleisten [63], sie müssen auch so konzipiert sein, dass sie extremen Belastungen standhalten. Zudem müssen sie flexibel sein, um im Laufe der Zeit umgestaltet und angepasst werden zu können [64] (Fig. 4).

Es mehren sich die Hinweise, dass eine grosse Vielfalt an Pflanzen und biotischen Organismen [65, 66] die Widerstandsfähigkeit von begrünten BGI-Systemen erhöht, da Redundanz und Reaktionsvielfalt des Systems gesteigert werden [67]. Mit anderen Worten: Je mehr Arten vorhanden sind, desto wahrscheinlicher ist es, dass einige von ihnen nicht durch den Stress bedroht werden und das System weiterhin funktioniert. Es ist auch wichtig, dass die Arten im Laufe der Zeit selbst zusammenfinden (und neue Arten in das System eintreten und dort gedeihen können), da dies zu einer Steigerung der Systemfunktionen und der Widerstandsfähigkeit beiträgt [66]. Das wichtigste Prinzip der Flexibilität besteht darin, vorausschauend zu planen, um die Anpassungsfähigkeit im Laufe der Zeit zu ermöglichen [64]. Ein einfacher Ansatz ist z. B., bei der Standortwahl darauf zu achten, dass das BGI-Element an der Oberfläche erweitert oder vertieft werden kann (weit genug von der Strasse, den Bäumen oder den Abwasserrohren entfernt), oder bereits alternative Standorte für zusätzliche Elemente zu identifizieren und reservieren. Ein weiterer Grundsatz der Anpassung besteht darin, die Leistung zu verfolgen, um festzustellen, ob und wann eine Anpassung erforderlich ist [63]. Dies könnte z. B. auf Vegetationsarten angewandt werden, um festzustellen, ob andere Arten für dieses BGI-Element in einem zukünftigen, heisseren und möglicherweise trockeneren Klima besser geeignet wären.

Offene Fragen und Chancen für die Zukunft

Die grossflächige Einführung von BGI birgt ein grosses Potenzial, um die mit dem Regenwassermanagement und dem Klimawandel verbundenen Herausforderungen zu bewältigen. Die BGI-Gemeinschaft steht jedoch noch vor grossen Herausforderungen und offenen Forschungsbereichen. Es ist zwar nicht möglich, alle diese Bereiche zu erwähnen, aber wir heben Themen hervor, die für die Schweiz besonders relevant sind und in der Schweiz zu den laufenden Forschungsthemen gehören:

Widerstandsfähigkeit und Anpassung

Wie können Gestaltung, Dimensionierung und Planung von BGI am besten auf ein heisseres und extremeres zukünftiges Klima abgestimmt werden?

Trotz der zahlreichen Forschungsergebnisse, die darauf hinweisen, dass BGI zur Anpassung an den Klimawandel beitragen können, werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die BGI-Elemente selbst nur begrenzt diskutiert. Die meisten Forschungsarbeiten befassen sich mit der Frage, wie BGI zur Verminderung von Oberflächenabfluss und zur Verringerung der Hitze eingesetzt werden können; BGI selbst müssen jedoch auch widerstandsfähig sein. In diesem Artikel wurden anekdotische Beispiele

angeführt, um dieses Problem zu überwinden; es sind jedoch weitere Forschungen in diesem Bereich erforderlich, um sicherzustellen, dass BGI in der Lage sind, ihre Leistung in einem zukünftigen Klima aufrechtzuerhalten.

Qualität des Regenwasser

Welche Schadstoffe sollten durch BGI zurückgehalten bzw. behandelt werden? Und wie kann die entsprechende Wirksamkeit sichergestellt werden?

Es gibt eine Reihe von Schadstoffen (von gelösten Stoffen bis hin zu Partikeln), die durch BGI zurückgehalten bzw. behandelt werden sollen. Da neue Chemikalien und Schadstoffe in die Umwelt gelangen, kann es schwierig sein, die Toxizität für den Menschen und den Verbleib dieser transportierten Stoffe zu bestimmen. Angesichts des breiten Spektrums an Schadstoffen und der verschiedenen Arten von BGI sind die Informationen über die Wirksamkeit von BGI zur Behandlung dieser Stoffe begrenzt. Eine hochaktuelle Forschungsfrage verschiedener Schweizer Fachhochschulen ist diejenige nach dem Rückhalt von Schadstoffen aus dem Strassenabwasser (Schwermetalle und Mikroplastik aus Pneuabrieb, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe [PAK] aus Asphaltbelägen usw.) in den verschiedenen Baums substraten nach *Stockholmer Modell* [68], die immer häufiger für Baumrigolen entlang von Strassen im urbanen Raum eingebaut werden [69] (*Fig. 5*).

Multifunktionalität

Wie können BGI-Elemente am besten gestaltet (und bewertet) werden, um Multifunktionalität zu gewährleisten?

Nebst dem in diesem Artikel hervorgehobenen massgebenden Nutzen von BGI für die Regenwasserbewirtschaftung in einem extremeren zukünftigen Klima können BGI eine ganze Reihe anderer Funktionen erfüllen. Naturnahe Systeme fördern die Biodiversität (*Fig. 6*), tragen zur Hitzeminderung bei, können CO₂ speichern sowie einen Beitrag zu mehr Lebensqualität und menschlicher Gesundheit leisten. Trotz koordinierter Planungsbemühungen werden einzelne BGI-Elemente oft nur für eine einzige Funktion umgesetzt, während andere Funktionen ignoriert oder passiv als gegeben vorausgesetzt werden. Angesichts der gleichzeitigen und dringenden Probleme, mit denen unsere urbanen Räume konfrontiert sind, muss jedoch sichergestellt werden, dass BGI-Elemente und grössere BGI-Systeme so konzipiert sind, dass sie mehrere Funktionen gleichzeitig erfüllen, und dass sie entsprechend überwacht werden, um sicherzustellen, dass die gewünschten Ziele mit der Zeit erreicht werden.

Regelwerke

Wie können gesetzliche Bestimmungen, Regelwerke und Vorschriften zur Gestaltung sicherstellen, dass BGI bereits in einem frühen Stadium des Planungsprozesses berücksichtigt und umgesetzt werden?

Der rechtliche Rahmen und die technischen Normen und Vorschriften stellen auch heute noch einige Hindernisse dar und entsprechen nicht immer dem aktuellen Stand der Technik. Obwohl das Gewässerschutzgesetz die Erhaltung des natürlichen Wasserkreislaufs als Ziel nennt [31], wird der Aspekt der Verdunstung, ein wichtiges Element von BGI-Infrastrukturen, stark vernachlässigt. Die Regelwerke sehen zwar die Versickerung als oberste Priorität im Umgang mit Regenwasser an, empfehlen aber in erster Linie reine, mit einer extensiven Grünlanddecke bepflanzte Mulden und für Dachwasser vor allem unterirdische Versickerungsanlagen. Damit BGI ihre volle Wirkung entfalten können, müssen sie multifunktional einsetzbar sein.

Empfehlungen oder Standards für die Gestaltung von Versickerungsmulden im Sinne der BGI zur Erfüllung weiterer Funktionen wie der Förderung der Biodiversität oder der Aufenthaltsqualität im Aussenraum fehlen heute. Zukünftige Regelwerke sollten die Nutzen einer Anlage übergreifend betrachten und damit eine Grundlage schaffen, um BGI frühzeitig und fachübergreifend im Planungsprozess gemeinsam zu entwickeln.

Daten und Unsicherheit

Wie können Daten und Unsicherheiten berücksichtigt werden, um die Planung, Dimensionierung, Gestaltung, Umsetzung und Verwaltung von BGI zu verbessern?

Das Verständnis der Funktionen von BGI ist erforderlich, um die Planung, Dimensionierung, Gestaltung und Umsetzung dieser Systeme voranzutreiben. Anhand von Beobachtungsdaten können wir Trends erkennen, wie diese Systeme im Laufe der Zeit funktionieren oder versagen, sowie die Faktoren bestimmen, welche die Leistung der BGI beeinflussen. Solche Erkenntnisse sind notwendig, um

Architekten und Planer in der risikobasierten Planung zu unterstützen, die in komplexen urbanen Räumen unabdingbar ist. Beobachtungsdaten und die Berücksichtigung von Unsicherheiten sind entscheidend, um die nachhaltige Funktion von BGI zu gewährleisten und zu fördern.

Fazit

BGI sind eine wirksame und praktikable Lösung für die Regenwasserbewirtschaftung und viele andere Herausforderungen, mit denen urbane Gebiete konfrontiert sind. Mit den Erfahrungen aus anderen Städten und Ländern, einer offenen und konstruktiven Diskussionskultur, welche die Sichtweisen der verschiedenen Akteure abholt, modernster Forschung und verfügbaren Finanzmitteln ist die Schweiz bestens gerüstet, um bei der Umsetzung von BGI für mehr klimaresiliente urbane Räume, bei der Verbesserung der Wasserqualität und der Multifunktionalität weltweit führend zu werden. Es ist an der Zeit, dies gemeinsam anzugehen.

Bibliographie

- [1] Bernhardt, E.S.; Palmer, M.A. (2007): *Restoring streams in an urbanizing world*. *Freshw. Biol.*; 52: 738–751
- [2] Arnbjerg-Nielsen, K. et al. (2013): *Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: a review*. *Water Sci Technol J Int Assoc Water Pollut Res*; 68. Publ. ahead of print 2013. DOI: 10.2166/wst.2013.251
- [3] Fowler, H.J. et al. (2021): *Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes*. *Nat. Rev. Earth Environ.*; 1–16
- [4] Montalto, F. et al. (2007): *Rapid assessment of the cost-effectiveness of low impact development for CSO control*. *Landsc. Urban Plan*; 82: 117–131
- [5] Rodriguez, M. et al. (2023): *Global resilience analysis of combined sewer systems under continuous hydrologic simulation*. *J. Environ. Manage*; 344: 118607
- [6] Ghofrani, Z. et al. (2023): *Comprehensive review of blue-green infrastructure concepts*. *Int. J. Environ. Sustain.*; 6
- [7] Li, C. et al. (2019): *Mechanisms and applications of green infrastructure practices for stormwater control: A review*. *J. Hydrol.*; 568: 626–637
- [8] Berndtsson, J.C. (2010): *Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review*. *Ecol. Eng.*; 36: 351–360
- [9] Wadzuk, B. et al. (2021): *Call for a Dynamic Approach to GSI Maintenance*. *J. Sustain. Water Built Environ.*; 7: 02521001
- [10] Grädinaru, S.R.; Hersperger, A.M. (2019): *Green infrastructure in strategic spatial plans: Evidence from European urban regions*. *Urban For Urban Green*; 40: 17–28
- [11] Grabowski, Z.J. et al. (2022): *What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning*. *Front. Ecol. Environ.*; 20: 152–160
- [12] United States Environmental Protection Agency (EPA) (1983): *Results of the Nationwide Urban Runoff Program – Executive Summary*. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/sw_nurp_exec_summary.pdf
- [13] Schueler, T.R. (1987): *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*. Metropolitan Information Center
- [14] Fletcher, T.D. et al. (2015): *SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage*. *Urban Water J.*; 12: 525–542
- [15] *Critical Review of Technical Questions Facing Low Impact Development and Green Infrastructure (2015): A Perspective from the Great Plains – Vogel – Water Environment Research – Wiley Online Library*, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2175/106143015X14362865226392?casa_token=kdwiiu8uMJEAAAAA:Ejo8fh-2q5594uzqVX8wgai1StAXyOjirWLO7Mv8GHVm1tdR-XWAPKAxLKhLWwVwF0fCV0tztpevec (accessed 28 July 2023)
- [16] Keeley, M. (2011): *The Green Area Ratio: an urban site sustainability metric*. *J. Environ. Plan Manag.*; 54: 937–958
- [17] Meng, T. (2017): *Green and smart: Perspectives of city and water agency officials in Pennsylvania toward adopting new infrastructure technologies for stormwater management*. *J. Sustain. Water Built Environ.*; 3: 05017001
- [18] *Green City Clean Waters: – Philadelphia Water Department*, <https://water.phila.gov/green-city/> (accessed 14 May 2023)
- [19] Liu, L.; Jensen, M.B. (2018): *Green infrastructure for sustainable urban water management: Practices of five forerunner cities*. *Cities*; 74: 126–133
- [20] Qin, H. (2013): *The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics*. *J. Environ. Manage*; 129: 577–585
- [21] Autixier, L. et al. (2014): *Evaluating rain gardens as a method to reduce the impact of sewer overflows in sources of drinking water*. *Sci. Total Environ.* 2014; 499: 238–247
- [22] Zhuang, Y. et al. (2016): *Current patterns and future perspectives of best management practices research: A bibliometric analysis*. *J. Soil Water Conserv.*; 71: 98A–104A
- [23] Davis, A.P. et al. (2012): *Hydrologic Performance of Bioretention Storm-Water Control Measures*. *J. Hydrol. Eng*; 17: 604–614
- [24] Bell, C.D. et al. (2016): *Hydrologic response to stormwater control measures in urban watersheds*. *J.*

[25] Pennino, M.J. et al. (2016): Watershed-scale impacts of stormwater green infrastructure on hydrology, nutrient fluxes, and combined sewer overflows in the mid-Atlantic region. *Sci. Total Environ.*; 565: 1044–1053

[26] Basel-Stadt (2022): Bau- und Planungsgesetz des Kantons Basel-Stadt. 730.100,

https://www.gesetzessammlung.bs.ch/app/de/texts_of_law/730.100

[27] Stadt Zürich (2021): Bauordnung der Stadt Zürich – Bau- und Zonenordnung. 700.100,

https://www.stadtzuerich.ch/portal/de/index/politik_u_recht/amtliche_sammlung/inhaltsverzeichnis/7/700/100.html

[28] Ville de Lausanne (2018): Directives municipales concernant l'attribution de subventions pour la réalisation de toitures végétalisées extensives sur les bâtiments propriétés de la Commune de Lausanne lors de rénovation, <https://www.lausanne.ch/vie-pratique/nature/la-nature-et-vous/la-ville-me-soutient/toitures-vegetalisees/politique-municipale.html>

[29] Ville de Lausanne (2018): Directives municipales concernant l'attribution de subventions pour la réalisation de toitures végétalisées extensives sur les bâtiments privés sur le territoire de la Commune de Lausanne, <https://www.lausanne.ch/vie-pratique/nature/la-nature-et-vous/la-ville-me-soutient/toitures-vegetalisees/politique-municipale.html>

[30] Ville de Lausanne (2018): Directives municipales concernant la réalisation de toitures végétalisées extensives sur les bâtiments propriétés de la Commune de Lausanne, <https://www.lausanne.ch/vie-pratique/nature/la-nature-et-vous/la-ville-me-soutient/toitures-vegetalisees/politique-municipale.html>

[31] Schweiz. Eidgenossenschaft (1991): Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG). SR 814.20,

https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/de

[32] ERZ (2003): Bäche in der Stadt Zürich, https://www.thomas-goettin.ch/fileadmin/goettin/pdf/Fliessgewaesser_Zuerich.pdf

[33] ERZ: Das Bachkonzept im Überblick

[34] Buwal: Wegleitung Grundwasserschutz. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald, und Landschaft

[35] VSA (2019): Richtlinie Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Glattbrugg

[36] Trocmé, M. et al. (2021): Strassenabwasser Behandlungsverfahren Stand der Technik. ASTRA 88002, Bern: ASTRA und BAFU, www.astra.admin.ch

[37] CH2018 Project Team: CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. Natl Cent Clim Serv. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.18751/Climate/Scenarios/CH2018/1.0

[38] US EPA O. (2015): What is Green Infrastructure? <https://www.epa.gov/green-infrastructure/what-green-chameleon-infrastructure> (4 January 2023)

[39] Matsler, A.M. et al. (2021): A 'green': Exploring the many disciplinary definitions, goals, and forms of «green infrastructure». *Landscape Urban Plan*; 214: 104145

[40] Nguyen, T.T. et al. (2019): Implementation of a specific urban water management – Sponge City. *Sci. Total Environ*; 652: 147–162

[41] Taguchi, V.J. et al. (2020): It is not easy being green: Recognizing unintended consequences of green stormwater infrastructure. *Water*; 12: 522

[42] Seddon, N. (2022): Harnessing the potential of nature-based solutions for mitigating and adapting to climate change. *Science*; 376: 1410–1416

[43] Chocat, B. et al. (2023): Contribution à une meilleure explicitation du vocabulaire dans le domaine des solutions dites «alternatives» de gestion des eaux pluviales urbaines. *Tech. Sci. Méthodes*

[44] Blecken, G.-T. et al. (2017): Stormwater control measure (SCM) maintenance considerations to ensure designed functionality. *Urban Water J.*; 14: 278–290

[45] Houle, J.J. et al. (2013): Comparison of Maintenance Cost, Labor Demands, and System Performance for LID and Conventional Stormwater Management. *J. Environ. Eng.*; 139: 932–938

[46] DelGrosso, Z.L. et al. (2019): Identifying Key Factors for Implementation and Maintenance of Green Stormwater Infrastructure. *J. Sustain. Water Built Environ.*; 5: 05019002

[47] US EPA (2000): Low Impact Development (LID) – A Literature Review, <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1001B6V.PDF?Dockey=P1001B6V.pdf>

[48] Meng, T. et al. (2017): Green and smart: Perspectives of city and water agency officials in Pennsylvania toward adopting new infrastructure technologies for stormwater management. *J. Sustain. Water Built Environ.*; 3: 05017001

[49] Taguchi, V.J. et al. (2020): It Is Not Easy Being Green: Recognizing Unintended Consequences of Green Stormwater Infrastructure. *Water*; 12: 522

[50] Minnesota Pollution Control Agency: Green Stormwater Infrastructure (GSI) and sustainable stormwater management – Minnesota Stormwater Manual, https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Green_Stormwater_Infrastructure_%28GSI%29_and_sustainable_stormwater_management (accessed August 2023)

[51] Philadelphia Water (2016): Green Stormwater Infrastructure Maintenance Manual, <https://water.phila.gov/pool/files/gsi-maintenancemanual.pdf>

[52] Hunt, W.F. et al. (2012): Meeting hydrologic and water quality goals through targeted bioretention design. *J. Environ. Eng.*; 138: 698–707

[53] Wadzuk, B. et al. (2021): Moving Toward Dynamic and Data-Driven GSI Maintenance. *J. Sustain. Water Built Environ.*; 7: 02521003

[54] Traver, R.G.; Ebrahimian, A. (2017): Dynamic design of green stormwater infrastructure. *Front Environ. Sci. Eng.*; 11: 15

[55] Smith, V.B. et al. (2023): A Relational Data Model for Advancing Stormwater Infrastructure Management.

- [56] Chen, Y.; Han, D. (2016): *Big data and hydroinformatics*. *J Hydroinformatics*; 18: 599–614
- [57] Choat, B. et al. (2022): *A Call to Record Stormwater Control Functions and to Share Network Data*. *J. Sustain. Water Built Environ.*; 8: 02521005
- [58] Abdallah, A.M.; Rosenberg, D.E. (2019): *A data model to manage data for water resources systems modeling*. *Environ. Model Softw.*; 115: 113–127
- [59] Beran, B.; Piasecki, M. (2009): *Engineering new paths to water data*. *Comput. Geosci.*; 35: 753–760
- [60] US Congress (2002): *Water Data Act, H.R.7792, 117th Cong.* <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/7792>
- [61] Milly, P.C.D. et al. (2008): *Stationarity Is Dead: Whither Water Management?* *Science*; 319: 573–574
- [62] Cook, L.M. et al. (2017): *Framework for Incorporating Downscaled Climate Output into Existing Engineering Methods: Application to Precipitation Frequency Curves*. *J Infrastruct Syst*; 23. Epub ahead of print 1 December 2017. doi:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000382
- [63] Coobk, L.M. et al. (2019): *Using Rainfall Measures to Evaluate Hydrologic Performance of Green Infrastructure Systems under Climate Change*. *Sustain Resilient Infrastruct*. Epub ahead of print 2019. doi: 10.1080/23789689.2019.1681819
- [64] Chester, M.V.; Allenby, B. (2019): *Toward adaptive infrastructure: flexibility and agility in a nonstationarity age*. *Sustain Resilient Infrastruct*; 4: 173–191
- [65] Nighswander, G.P. et al. (2021): *Importance of plant diversity and structure for urban garden pest resistance*. *Landsch. Urban Plan*; 215: 104211
- [66] Schrieker, D.; Farrell, C. (2021): *Trait-based green roof plant selection: water use and drought response of nine common spontaneous plants*. *Urban For Urban Green*; 65: 127368
- [67] Laliberté, E. et al. (2010): *Land-use intensification reduces functional redundancy and response diversity in plant communities*. *Ecol. Lett.*; 13: 76–86
- [68] Örjan, S. et al. (2017): *Plant beds in Stockholm city – a manual*. 3rd edition. http://www.biochar.info/docs/urban/Planting_beds_in_Stockholm_2017.pdf
- [69] Burkhardt, M. et al. (2022): *Schwammstadt im Strassenraum*. *Aqua & Gas N°10, 2022*. https://vsa.ch/wp-content/uploads/2022/11/Burkhardt-et-al_Schwammstadt-im-Strassenraum_2022.pdf