

## Das Hitzeminderungspotenzial von blau-grüner Infrastruktur zur Regenwasserbewirtschaftung hängt von Bodenart und Wasserverfügbarkeit ab

Giovan Battista Cavadini<sup>1,2</sup>, Gabriele Manoli<sup>3</sup> & Lauren M. Cook<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siedlungsentwässerung Abteilung, EAWAG, Dübendorf, Schweiz

<sup>2</sup> Institut für Umweltingenieurwissenschaften, ETH Zürich, Schweiz

<sup>3</sup> Laboratoire des Systèmes Urbains et Environnementaux, EPFL Lausanne, Schweiz

**Kurzfassung:** Städte setzen vermehrt auf blau-grüne Infrastrukturen (BGI), um den Herausforderungen extremer Niederschläge und steigender Temperaturen infolge des Klimawandels zu begegnen. Während BGI im Regenwassermanagement gut erforscht sind, ist ihr kühlender Effekt weniger untersucht und quantifiziert. Diese Studie untersucht das Hitzeminderungspotenzial von drei BGI-Elementen – Versickerungsflächen, sickerfähigen Belägen und Rückhalteteichen – in Fehraltorf, Kanton Zürich, unter historischem und zukünftigem Klima. Die mittels eines Mikroklimamodells simulierten Ergebnisse weisen auf eine Senkung des medianen Universal Thermal Climate Index (UTCI) um 0,2 bis 0,5 °C (je nach BGI-Element), mit maximalen Abkühlungseffekten von bis zu 2,7 °C hin. Die Wirksamkeit hängt jedoch stark vom BGI-Element, der ersetzten Fläche und der Wasserverfügbarkeit ab. Die Bodenart spielt eine zentrale Rolle: tonreiche Böden speichern mehr Wasser und kühlen stärker, während sandige Böden besser versickern, aber schneller austrocknen. Daraus ergibt sich ein potenziell Zielkonflikt zwischen Hitzeminderung und Regenwasserbewirtschaftung, der bei der BGI-Planung berücksichtigt werden sollte.

**Key-Words:** Naturbasierte Lösungen, Städtisches Mikroklima, Verdunstungskühlung, Versickerungsflächen, Sickerfähige Beläge, Rückhalteteiche

### 1 Einleitung

Städte setzen zunehmend auf blau-grüne Infrastrukturen (BGI, auch bekannt als Schwammstadt-Konzept) [1], um den Herausforderungen des Klimawandels und der Urbanisierung [2], wie Starkregen [3] und steigenden Temperaturen [4], zu begegnen. BGI kombinieren technische und naturnahe Elemente – wie Versickerungsflächen, Rückhalteteiche oder sickerfähige Beläge – um Regenwasser zu versickern und gleichzeitig das Mikroklima (das lokal vorherrschende Klima in unmittelbarer Umgebung) zu kühlen [5]. Die Fähigkeit dieser BGI-Elemente Regenwasser zu

versickern ist gut dokumentiert [6]. Ihr Beitrag zur lokalen Hitzeminderung durch Verdunstungskühlung hingegen wird zwar häufig angenommen, ist jedoch bislang weniger erforscht [7]. Verdunstungskühlung in BGI hängt stark von der Wasserverfügbarkeit ab [8]: während Teiche eine kontinuierliche Wasserversorgung bieten und dadurch tagsüber starke Kühlung ermöglichen, können sie aufgrund von Wärmespeicherung zugleich zu höheren Nachttemperaturen führen [9]. Versickerungsflächen und sickerfähige Beläge hingegen kühlen ohne diesen Nachteil [10], sind jedoch bei niedriger Bodenfeuchte weniger wirksam. Um die Wirksamkeit und potenziellen Zielkonflikte dieser Systeme besser zu verstehen – insbesondere unter künftig heisseren und trockeneren Klimabedingungen – sind direkte Vergleiche notwendig. Zudem besteht ein potenzieller Zielkonflikt zwischen der hydrologischen und thermischen Wirkung von BGI, der bislang wenig erforscht ist: Böden mit hoher Infiltrationskapazität fördern zwar die Versickerung und damit das Regenwassermanagement, speichern jedoch weniger Wasser (geringe Feldkapazität), was die Verdunstung und somit die Kühlleistung einschränken könnte [11]. Ziel dieser Studie ist es, das Hitzeminderungspotenzial von drei BGI-Elementen–Versickerungsflächen, Rückhalteteichen und sickerfähigen Beläge- zu quantifizieren. Mithilfe des Mikromodells Urban Tethys-Chloris (UT&C) [12], simulieren wir die Wirkung auf das Komfortmass UTCI (Universal Thermal Climate Index [13]) in drei Quartieren in Fehraltorf (eine Gemeinde in der Nähe von Zürich) sowohl unter heutigen als auch unter zukünftigen Klimabedingungen. Dabei werden auch unterschiedliche Bodenarten – von sandreichen bis tonreichen Böden – analysiert, da sie für Versickerung, Retention und Verdunstung eine zentrale Rolle spielen. Die vollständige Studie (eingereicht bei «Sustainable Cities and Society», derzeit in Begutachtung [14]) liefert eine Grundlage für die Planung von Klimaanpassungsmassnahmen, die sowohl Starkregen als auch Hitze berücksichtigt.

## 2 Methoden

### 2.1 UT&C Modell Beschreibung

Das Urban Tethys-Chloris Modell (UT&C) ist ein öko-hydrologisches Modell zur Simulation des Mikroklimas in städtischen Strassenschluchten [15]. Es berechnet die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und den thermischen Komfort (Universal Thermal Climate Index, UTCI) auf Basis der Energie- und Wasserbilanz [15]. Die Strassenfläche wird in drei Kategorien unterteilt: versiegelt, unversiegelt (ohne Vegetation) und begrünt (mit Vegetation). Das UT&C Modell eignet sich gut für die Bewertung von BGI, da es Bodenfeuchte, Versickerung und Verdunstung abbildet – wichtige Prozesse für Regenwassermanagement und Hitzeminderung. In dieser Studie wurde das Modell erweitert, um auch Oberflächengewässer, wie Rückhalteteiche, abzubilden. Zudem wurden Oberflächenabfluss sowie eine Unterscheidung zwischen unbegrüntem und begrüntem Boden integriert [14].

## 2.2 Parametrisierung und BGI-Umsetzung

Fehraltorf, eine Gemeinde 15 km östlich von Zürich (181,5 ha, ca. 6'900 Einwohner in 2024), wurde aufgrund umfangreicher Daten und früherer Forschung zu BGI als Fallstudie ausgewählt [16]. Um verschiedene Strassenschluchten und Bebauungstypen abzubilden, wurde das UT&C-Modell auf drei verschiedene Quartiere angewendet: ein Industriegebiet, ein städtisches Gebiet und ein Wohngebiet. Das Baseline-Szenario stellt die bestehende Strassenschlucht ohne BGI dar. In dieser Studie wird dann angenommen, dass die BGI-Elemente einen bestimmten Anteil der Bodenfläche in der Strassenschlucht ersetzen (BGI-Szenarien), dabei aber die bestehende Nutzung möglichst wenig beeinträchtigen [17]. Versickerungsflächen werden entweder auf bestehenden Grünflächen (VF-Grün) oder durch Ersatz von versiegelten Flächen (VF-Grau), z. B. auf Parkplätzen, umgesetzt. Sie verfügen über Boden- und Vegetationseigenschaften, die für Versickerung und Verdunstung optimiert sind und sich von der bestehenden Konfiguration (Baseline) unterscheiden. Sickerfähige Beläge (SB) ersetzen versiegelte Flächen und werden als unversiegelter Boden ohne Vegetation modelliert. Rückhalteteiche (RT) ersetzen bestehende Grünflächen. Die in dieser Studie betrachteten BGI-Szenarien gehen davon aus, dass die BGI-Elemente 50 % der zugewiesenen Bodenfläche ersetzen. Beispielsweise entspricht die Breite eines Rückhalteteichs 50 % der begrüneten Fläche der Baseline. Eine vollständige Übersicht der verwendeten Parameter findet sich in der Publikation [14].

## 2.3 Modell Validierung

Das Modell der Baseline wurde für jedes Quartier mit Messdaten (Juli-September 2024) validiert [14]. Die Validierung basierte auf Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, und Oberflächentemperatur der Bodenvegetation. Die Modellgüte wurde mittels RMSE, NSE und  $r^2$  bestimmt. Die Simulationen stimmen insgesamt gut mit den Beobachtungen überein, insbesondere bei der Lufttemperatur, wobei es in den heissesten Stunden zu leichten Überschätzungen kommt. Detaillierte Informationen zur Validierung finden sich in Studie [14].

## 2.4 Klimadaten und Simulationskennwerte

Das Modell wurde für aktuelle und zukünftige Klimabedingungen simuliert, mit einem Basisszenario und Szenarien mit einzelnen BGI-Elementen. Die Simulationen umfassen 6 Jahre für das historische Klima (2019–2024) und 10 Jahre für das zukünftige Klima (2079–2088), mit stündlichem Zeitintervall. Die zukünftige Periode geht von den Annahmen des RCP (Representative Concentration Pathway) 8.5 aus, wobei keine Reduktion der Treibhausgasemissionen stattfinden und die stärksten Temperaturanstiege prognostiziert werden [18]. Weitere Informationen zu den Klimadaten finden sich in diesen Publikationen [14, 19]. Die Ergebnisse der UTCI in 2 Metern Höhe werden von Juni bis August für alle drei Quartiere aggregiert. UTCI wird verwendet, da dieser ein umfassendes Mass des thermischen Komforts ist, inklusive

Faktoren wie Luftfeuchtigkeit und Strahlungstemperatur, die durch BGI beeinflusst werden [13].

### 3 Resultate

#### 3.1 Der Einfluss der Umsetzung von BGI auf die UTCI-Variationen

Das Hitzeminderungspotenzial hängt stark vom BGI-Element, der Tageszeit und der zu ersetzenden Oberfläche ab (Abb. 1). Während der heissesten Tagesstunden kühlt der Rückhalteteich (RT) am stärksten (bis zu 2,7 °C, Median: 0,5 °C). Die Kühlung beruht auf kontinuierlicher Verdunstung, da das Wasserreservoir im Modell nie austrocknet. Nachts wird die gespeicherte Wärme wieder abgeben, was zu leicht höheren Temperaturen führen kann (ein bekannter Effekt [9]). Sickerfähige Beläge (SB) zeigen eine abgeschwächte Hitzeminderung am Tag, nachts gleichen sie sich mit der Temperatur von versiegelten Flächen an. Versickerungsflächen auf versiegelten Fläche (VF-Grau) zeigen am Tag deutlichere Abkühlungseffekte (bis zu 2,1 °C, Median: 0,3 °C), wobei nachts eine leichte Abkühlung verbleibt. Werden jedoch bestehende Grünflächen durch VF ersetzt (VF-Grün), kann es tagsüber sogar wärmer werden, da die neu eingebrachten Böden (mit hoher Versickerung, aber geringer Wasserspeicherung) weniger Verdunstung ermöglichen als die ursprüngliche Vegetation. Der grösste Kühlungseffekt tritt auf, wenn versiegelte Flächen durch BGI ersetzt werden – durch die Kombination von Versickerung und Transpiration der Pflanzen.

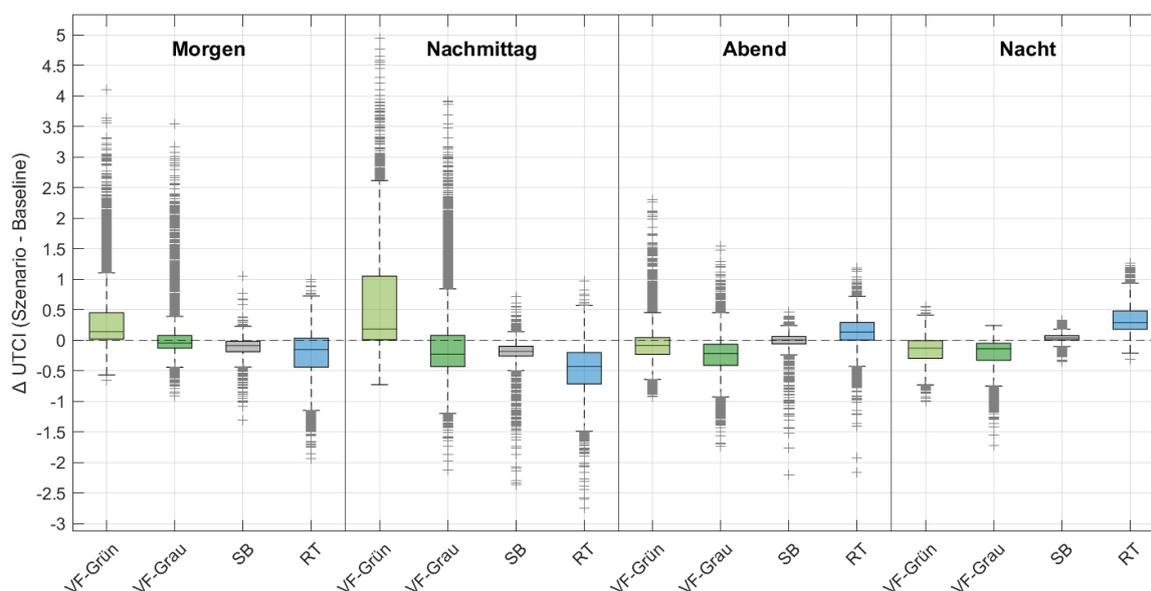


Abbildung 1:  $\Delta$ UTCI zwischen BGI- und Baseline-Szenario (ohne BGI) nach Tageszeit: Morgen (06-11 Uhr), Nachmittag (12-17 Uhr), Abend (18-23 Uhr) und Nacht (00-05 Uhr) für Sommer 2019-2024. VF-Grün: Versickerungsfläche auf begrünter Fläche, VF-Grau:

Versickerungsfläche auf versiegelter Fläche, SB: sickerfähige Beläge, RT: Rückhalteteiche. Eigene Darstellung nach [14].

### 3.2 Der Einfluss der Klimavariabilität auf das Hitzeminderungspotenzial

Da VF-Grau zeitweise Temperaturanstiege zeigt, wurden verschiedene Bodenarten getestet [20], um durch höhere Wasserspeicherung (Feldkapazität) die Transpiration und Kühlwirkung zu verbessern. Zwischen sandigen (sandigem Lehm) und tonreichen Böden (schluffigem Lehm) ist ein deutlicher Unterschied erkennbar (Abb. 2). Die Kühlleistung von Versickerungsflächen hängt stark von der Bodenfeuchte ab, welche wiederum durch Niederschlagsmenge und Bodenart beeinflusst wird. Bei sandigen Böden (Abb. 2a), korrelieren Monate mit geringer Kühlung oder sogar Erwärmung (UTCI-Erhöhen) stark mit trockenen Sommern. Liegt die gesamte Sommerniederschlagsmenge unter 100 mm, bleibt die Bodenfeuchte für etwa zwei Drittel der Zeit unter dem Welkepunkt. In diesem Bereich steht den Pflanzen kein Wasser mehr zur Verfügung, sodass die Verdunstungskühlung nicht mehr möglich ist. Dieses Phänomen wird in einem zukünftigen Klima noch deutlicher (leere Marker). Tonreiche Böden (Abb. 2b) speichern dagegen mehr Wasser im Boden und sind weniger stark auf Niederschlagsmenge angewiesen. Wenn genug Wasser verfügbar ist, steigt die Hitzeminderung mit zunehmender Temperatur. Dennoch zeigt sich klar: nicht die steigenden Temperaturen, sondern abnehmende Sommerniederschlagsmengen und zu geringe Bodenwasserhaltekapazität sind der entscheidende Faktor für die Wirksamkeit von BGI. Ohne Massnahmen zur Sicherung der Wasserverfügbarkeit – wie z. B. Zwischenspeicherung, gezielte Bewässerung, oder angepasste Bodenartwahl – ist ihre langfristige Hitzeminderung gefährdet.

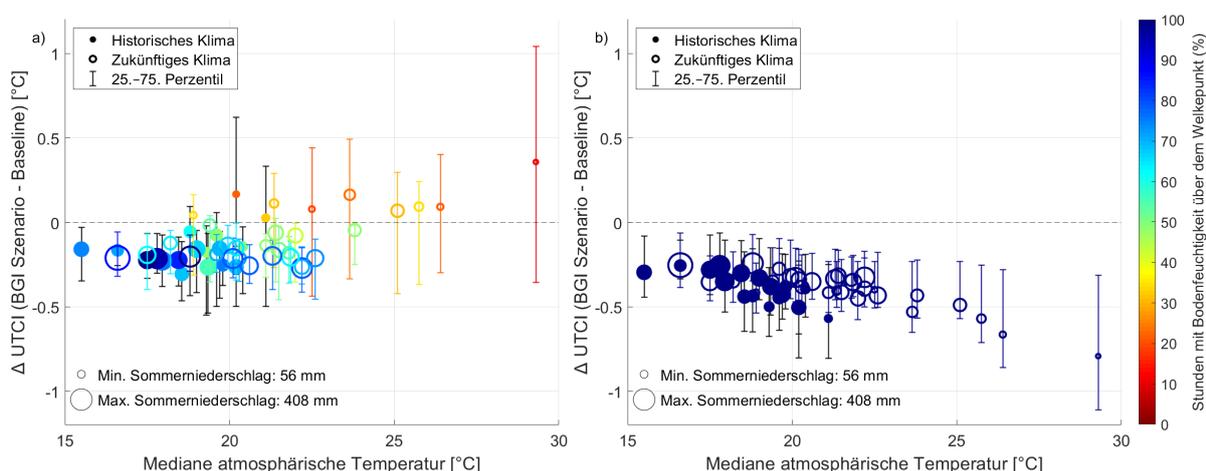


Abbildung 2: Monatlich aggregierte  $\Delta$  UTCI vs. Median-Lufttemperatur für Versickerungsflächen auf versiegelten Flächen mit (a) sandigem und (b) schluffigem Lehm. Markengrösse: Sommerniederschlag; Farbe: Anteil Stunden mit Bodenfeuchtigkeit > Welkepunkt. Marker: Median (Fehlerbalken: 25./75. Perzentil); gefüllte Marker: historischen Klimas, leere: zukünftiger Klimaprojektionen. Eigene Darstellung nach [14].

## 4 Fazit

Diese Studie untersucht das Hitzeminderungspotenzial von drei BGI-Elementen zur Regenwasserbewirtschaftung – Versickerungsflächen, sickerfähige Beläge und Rückhalteteiche – in einer Siedlung nahe Zürich. Die Ergebnisse zeigen, dass das Kühlleistungspotenzial von mehreren Faktoren abhängt: dem BGI-Element, der Tageszeit sowie den Eigenschaften der ersetzten Flächen. Rückhalteteiche bieten die stärkste Kühlwirkung tagsüber (bis zu  $-2,7\text{ °C}$  UTCI), erhöhen jedoch nachts die Temperatur. Versickerungsflächen erreichen ebenfalls eine deutliche Abkühlung (bis zu  $-2,1\text{ °C}$ ), jedoch nur, wenn sie versiegelte Flächen ersetzen. Sickerfähige Beläge bieten nur geringe Median-Kühlung, da ihre Verdunstung begrenzt ist. Entscheidend für die Kühlleistung ist die Bodenfeuchtigkeit, insbesondere bei Versickerungsflächen. Sandige Böden begünstigen die Infiltration, speichern aber weniger Wasser. Tonreiche Böden verbessern die Verdunstungskühlung, erzeugen jedoch mehr Oberflächenabfluss. Es besteht möglicherweise ein Zielkonflikt zwischen Kühlung und Regenwasserbewirtschaftung, der weiterer Forschung bedarf. Künftige Klimabedingungen, vor allem trockenere Sommer, könnten die Leistung von Versickerungsflächen einschränken. Böden mit höherem Wasserspeichervermögen könnten helfen, die Kühlung auch in Trockenphasen aufrechtzuerhalten. Diese Studie simulierte drei Strassenschluchten, doch weitere Untersuchungen, insbesondere experimentelle Studien in grösseren Städten und trockeneren Klimazonen, sind erforderlich, um die Ergebnisse verallgemeinern zu können. Insgesamt liefert diese Studie wichtige Erkenntnisse für die Gestaltung klimaangepasster, multifunktionaler BGI, die sowohl den Hitzeausgleich fördern als auch die Regenwasserbewirtschaftung verbessern.

## 5 Literatur

- [1] O'Donnell E, Netusil N, Chan F, et al. International Perceptions of Urban Blue-Green Infrastructure: A Comparison across Four Cities. *Water* 2021; 13: 544.
- [2] Environment UN. Cities and climate change | UNEP - UN Environment Programme, <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities-and-climate-change> (2017, accessed 5 August 2025).
- [3] Nodine TG, Conley G, Riihimaki CA, et al. Modeling the impact of future rainfall changes on the effectiveness of urban stormwater control measures. *Sci Rep* 2024; 14: 4082.
- [4] Oleson KW, Monaghan A, Wilhelmi O, et al. Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. *Climatic Change* 2015; 129: 525–541.
- [5] Almaaitah T, Appleby M, Rosenblat H, et al. The potential of Blue-Green infrastructure as a climate change adaptation strategy: a systematic literature review. *Blue-Green Systems* 2021; 3: 223–248.
- [6] Montoya-Coronado VA, Tedoldi D, Lenormand E, et al. Combined sewer overflow mitigation through SUDS - A review on modelling practices, scenario elaboration, and related performances. *Journal of Environmental Management* 2024; 362: 121073.

- [7] Cook LM, Good KD, Moretti M, et al. Towards the intentional multifunctionality of urban green infrastructure: a paradox of choice? *npj Urban Sustain* 2024; 4: 1–13.
- [8] Gobatti L, Bach PM, Maurer M, et al. Impact of soil moisture content on urban tree evaporative cooling and human thermal comfort. *npj Urban Sustain* 2025; 5: 1–16.
- [9] Yao L, Sailor DJ, Zhang X, et al. Diurnal pattern and driving mechanisms of the thermal effects of an urban pond. *Sustainable Cities and Society* 2023; 91: 104407.
- [10] Probst N, Bach PM, Cook LM, et al. Blue Green Systems for urban heat mitigation: mechanisms, effectiveness and research directions. *Blue-Green Systems* 2022; 4: 348–376.
- [11] Cuthbert MO, Rau GC, Ekström M, et al. Global climate-driven trade-offs between the water retention and cooling benefits of urban greening. *Nat Commun* 2022; 13: 518.
- [12] Meili N, Zheng X, Takane Y, et al. Modeling the Effect of Trees on Energy Demand for Indoor Cooling and Dehumidification Across Cities and Climates. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 2025; 17: e2024MS004590.
- [13] Fiala D, Havenith G, Bröde P, et al. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int J Biometeorol* 2012; 56: 429–441.
- [14] Cavadini GB, Manoli G, Cook L. Cooling Potential of Stormwater Blue-Green Infrastructure Depends on Soil Type and Water Availability. Epub ahead of print 22 July 2025. DOI: 10.2139/ssrn.5360890.
- [15] Meili N, Manoli G, Burlando P, et al. An urban ecohydrological model to quantify the effect of vegetation on urban climate and hydrology (UT&C v1.0). *Geoscientific Model Development* 2020; 13: 335–362.
- [16] Blumensaat F, Bloem S, Ebi C, et al. The UWO dataset – long-term observations from a full-scale field laboratory to better understand urban hydrology at small spatio-temporal scales. *Earth System Science Data Discussions* 2025; 1–31.
- [17] Cavadini GB, Rodriguez M, Cook LM. Connecting blue-green infrastructure elements to reduce combined sewer overflows. *Journal of Environmental Management* 2024; 365: 121465.
- [18] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (2014).
- [19] Nguyen T, Velasquez P, Dietzel A, et al. Bias Correction of Precipitation from Convection-Permitting Models at the Point Scale: A Case Study in Switzerland. Epub ahead of print 11 October 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4757565/v1.
- [20] Saxton KE, Rawls WJ. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 2006; 70: 1569–1578.

**Korrespondenz an:**

Lauren Cook

EAWAG, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Schweiz

Telefon: +41 58 765 5474

E-Mail: [lauren.cook@eawag.ch](mailto:lauren.cook@eawag.ch)