

Falko Feldmann<sup>1,4</sup>, Georg Henkel<sup>2</sup>, Hartmut Balder<sup>3</sup>, Mona Quambusch<sup>1</sup>, Ute Vogler<sup>1</sup>

## Wurzeln und Wasser – Gesunde Pflanzen in der Schwammstadt: Bericht über die VIII. Urbane Pflanzen Konferenz „Wie funktioniert Stadtgrün besser?“, 25. September 2023, Universität Göttingen

"Roots and Water – Healthy Plants in the Sponge City" Report on the VIII Urban Plants Conference "How Does Urban Greenery Work Better?" on September 25, 2023, at the University of Göttingen

### Affiliationen

<sup>1</sup>Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und urbanem Grün, Braunschweig.

<sup>2</sup>Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, Abteilung Pflanzenbau, Pflanzenschutz, Umwelt, Fachbereich Pflanzenschutz, Ellerhoop.

<sup>3</sup>Institut für Stadtgrün, Falkensee.

<sup>4</sup>Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig.

### Kontaktanschrift

Dr. Falko Feldmann, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und urbanem Grün, Messeweg 11-12, 38104 Braunschweig, E-Mail: falko.feldmann@julius-kuehn.de

## Zusammenfassung

Ein Weg, Städte an den Klimawandel anzupassen, ist die Umsetzung des Prinzips der „Schwammstadt“. Überflutungen durch Starkregen und Trockenheit durch Hitzeperioden soll durch phytotechnische und naturbasierte Maßnahmen entgegengewirkt werden. Die Stadt soll die Fähigkeit bekommen, große Mengen an plötzlich auftretendem Wasser aufzusaugen, dieses Wasser zu speichern und es dann durch Verdunstung und gezielte Bewässerung wieder abzugeben. Doch wie reagieren Pflanzen, wenn ihre Wurzeln überstaut werden? Wie lange darf ein solcher Zustand währen? Wie sollte die Kontaktzone zwischen Wurzelraum und gespeichertem Wasser gestaltet werden? Fördert man durch die Schwammstadt bodenbürtige Schaderreger der Wurzeln? Wie wirken sich Schadstofffrachten im Wasser auf die Pflanzengesundheit aus? Müssen wir besondere Pflanzen auswählen, die an den Wechsel von einem Zuviel zu einem Zuwenig an Wasser angepasst sind? Diesen Fragen ging die Tagung in Vorträgen und gemeinsamem Austausch nach.

## Stichwörter

Schwammstadt, Pflanzenschäden, Wurzelraum

## Abstract

One way to adapt cities to climate change is to implement the "sponge city" principle. Floods caused by heavy rainfall and droughts resulting from heatwaves is intended to be mitigated through phytotechnical and nature-based measures. The city should acquire the ability to absorb large amounts of sud-

den water, store it, and then release it through evaporation and targeted irrigation. But how do plants react when their roots are waterlogged? How long can such a condition last? How should the contact zone between the root zone and the stored water be designed? Does the sponge city promote soil-borne root pathogens? How does water pollution affect plant health? Do we need to select specific plants that are adapted to frequent changes from excess to insufficient water? These questions were addressed during the conference through presentations and joint discussions.

## Keywords

Sponge city, plant damage, root space

## Die Schwammstadt als Strategie im Klimawandel

In einer Zeit, in der die städtischen Bevölkerungen weltweit exponentiell wachsen, treten Fragen zur Nachhaltigkeit, Effizienz und Umweltverträglichkeit von Städten immer stärker in den Vordergrund. **Dr. Ute Vogler**, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und urbanem Grün, Julius Kühn-Institut, **Dr. Falko Feldmann**, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und urbanem Grün, Julius Kühn-Institut, und zugleich Vertreter des Mitveranstalters Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft e. V., **Philipp Sattler**, Vertreter des diesjährigen Tagungspartners Stiftung Die Grüne Stadt, sowie **Dr. Gregor Langenbrinck**, Urbanizers, hoben die Bedeutung der Konzeption von "Schwammstädten" in diesem Zusammenhang hervor, da sie innovative Ansätze zur Bewältigung dieser Herausforderungen bieten. Diese Konzeption, die auf dem Prinzip



des "Schwammes" basiert, halte nicht nur Lösungen für viele der heutigen urbanen Probleme einschließlich des urbanen Grüns bereit, sondern auch eine Vision für die Städte der Zukunft.

Der Begriff "Schwammstadt" wurde geprägt, um eine Stadt zu beschreiben, die in der Lage ist, Wasser auf eine Weise aufzunehmen, zu speichern, zu reinigen und zu nutzen, die ähnlich effizient und flexibel sei wie ein Schwamm. Die Idee hinter einer Schwammstadt bestehe darin, die Infrastruktur und die städtische Umgebung so zu gestalten, dass sie Wasser in all seinen Formen – Regenwasser, Abwasser und Oberflächenwasser – bewirtschaftet und nutzt. Diese Konzeption gehe über herkömmliche städtische Wassermanagementsysteme hinaus und integriere Grünflächen, natürliche Elemente und technologische Innovationen, um ein nachhaltiges Wasserkreislaufsystem zu schaffen.

Merkmale einer Schwammstadt sind (Zevenbergen et al., 2018; Sieker, 2022):

- Schwammstädte sind darauf ausgelegt, Oberflächen zu haben, die Wasser absorbieren können, anstatt es abzuleiten. Pflastersteine, begrünte Dächer, durchlässige Betonoberflächen und begrünte Flächen werden verwendet, um Regenwasser aufzunehmen und es in den Boden zu leiten.
- Der Einsatz modernster Technologien spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Von intelligenter Wassernutzung bis hin zu fortschrittlichen Klärtechniken werden Technologien genutzt, um die Effizienz des Wassermanagements weiter zu verbessern.
- Parks, Grünstreifen, vertikale Gärten und städtische Landwirtschaft sind integrale Bestandteile einer Schwammstadt. Diese grünen Bereiche tragen nicht nur zur Ästhetik bei, sondern fördern auch die Wasseraufnahme und dienen als natürliche Filter für verschmutztes Wasser.
- Ein Schlüsselaspekt einer Schwammstadt ist das Sammeln und Nutzen von Regenwasser. Die Stadtinfrastruktur umfasst Zisternen und Auffangsysteme, die das Regenwasser sammeln und für Zwecke wie Bewässerung, Toilettenspülung und Straßenreinigung verwenden.
- Statt üblicher Abflusssysteme setzt eine Schwammstadt auf geologische Charakteristika (Wang et al., 2019), natürliche Rückhaltebecken wie Gräben, Mulden, Teiche, Feuchtgebiete oder umgestaltete Flussufer, um Wasser zurückzuhalten, zu versickern, wieder zu nutzen, aber auch zu reinigen und die Wasserqualität zu verbessern.

In Schwammstädten sind besonders Bäume in der grünen Infrastruktur von Bedeutung, da sie und ihre Standorte verschiedene Funktionen im Rahmen des Schwammstadt-Konzepts erfüllen können (Feldmann et al., 2023). Bäume können dazu beitragen, Regenwasser aufzufangen, zu absorbieren und durch Transpiration wieder in den Wasserkreislauf zurück zu führen. Durch das Pflanzen von Bäumen entlang der Straßen und das Schaffen von Baumgruben oder speziellen Baumscheiben kann Regenwasser effektiv gesammelt und in den Boden geleitet werden, anstatt einfach in die Kanalisation abzulaufen. Dies trägt zur Reduzierung von Oberflächenabfluss und zur Grundwasseranreicherung bei. Die Platzierung von Straßenbäumen kann in Kombination mit anderen

Schwammstadt-Elementen erfolgen, z. B. durch die Anlage von Grünstreifen, die Nutzung von durchlässigen Oberflächenmaterialien rund um die Baumwurzeln oder die Implementierung von Baumgruben, die als Regenwasserspeicher dienen können. Bäume spielen also eine wesentliche Rolle bei der Integration des Schwammstadtgedankens insgesamt, da sie nicht nur ökologische Vorteile bieten, sondern auch zum effizienten Wassermanagement und zur Schaffung eines gesundheitsförderlichen städtischen Umfelds beitragen. Durch die gezielte Planung, Auswahl geeigneter Baumarten und angemessene Pflege können Straßenbäume zu einem integralen Bestandteil der grünen Infrastruktur in Schwammstädten werden und somit zur Nachhaltigkeit und Lebensqualität in urbanen Gebieten beitragen. Die Weiterentwicklung der Schwammstadt müsse interdisziplinär und partizipativ erfolgen und so eine breite gesellschaftliche Basis finden.

Das Schwammstadtkonzept müsse zwei klimabedingt immer häufiger auftretende Phänomene adressieren: Phasen der Trockenheit und Starkregenereignisse verbunden mit anschließender lang andauernder Überstauung der baumbestandenen Flächen. Vor diesem Hintergrund suchte die Konferenz nach Wegen zur Gesunderhaltung besonders von Bäumen in der Schwammstadt.

## Wurzeln im Wasser

### Wurzeln suchen Wasser

**Prof. Dr. habil. Hartmut Balder**, Institut für Stadtgrün, forderte in seinem Beitrag, sich wieder verstärkt mit der Biologie und Ökologie von Bäumen zu beschäftigen. Er stellte heraus, dass die Bäume grundsätzlich unterschiedliche Wurzeltypen hätten (Pfahl-, Herz- und Senkerwurzeln), die bei ihrer Ausprägung zum Wurzelsystem ganz wesentlich durch die örtlichen Rahmenbedingungen beeinflusst würden. Zu den beeinflussenden Faktoren der Wurzelentwicklung gehörten die Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Bodenluft, Nährstoffe, Bodenzusammensetzung, Schadstoffe, Windeinwirkung, Wurzel-Spross-Relation und Symbionten.

Vor diesem Hintergrund seien die urbanen Wachstumsbedingungen vielfach unzureichend: Bodenverdichtungen und -versiegelungen, gestörter Wasser- und Luftaushalt, begrenzter ober- und unterirdischer Raum, Stressbelastungen (abiotisch/biotisch), mangelnde Pflege und mangelnde Schutzmaßnahmen führten nicht selten zu Schadsymptomen an den Pflanzen, unerwünschten Beeinträchtigungen der Verkehrssicherheit und Schäden an technischer Infrastruktur (Balder, 1998). Die Klimawandelfolgen verschärften viele dieser Phänomene durch Verstärkung der Trockenheit oder durch lange Überstauungszeiten der Wurzeln.

Die Etablierung von Bäumen mit vitalen Wurzelsystemen in einer optimierten blau-grünen urbanen Infrastruktur im Zusammenhang mit dem Schwammstadtkonzept könne insbesondere durch den Umstand, dass Wurzeln Wasser aufgrund ihres Hydrotropismus aktiv suchten (Balder et al., 2018), mit folgenden phytotechnischen Maßnahmen gelingen, die zu „Mini-Ökosystemen“ mit einem solitären Baum im Zentrum führten:

- Bodenverbesserung: Gut durchlässige Böden fördern das Wachstum gesunder Wurzelsysteme; die Bodenqualität kann durch Zugabe von organischen Materialien wie Kompost verbessert werden.
- Belüftung des Bodens: Kompaktierter Boden kann den Sauerstofffluss zu den Wurzeln einschränken. Hier können Lockerungen des Bodens oder der Einbau von Kunstsubstraten weiterhelfen, um die Sauerstoffversorgung der Wurzeln zu verbessern.
- Mulchen: Gemulchter Boden kann Feuchtigkeit bewahren und die Temperatur regulieren. Ein geeignetes Mulchmaterial schafft auch eine günstige Umgebung für das Wurzelwachstum.
- Bewässerung: Eine konsistente Bewässerung fördert ein gesundes Wurzelwachstum. Hierdurch könnten auch die Wurzeln in die Tiefe geleitet werden und so an natürliche Ressourcen heranreichen.
- Baumgruben-Design: Größere, gut gestaltete Baumgruben ermöglichen es den Wurzeln, sich frei auszubreiten. Wurzelbarrieren können das Wachstum der Wurzeln in unerwünschte Bereiche hinein steuern und Schäden an Gehwegen oder Fundamenten vermeiden helfen.
- Baumverträgliche Oberflächen: Baumfreundliche Oberflächenmaterialien, die Wasser und Luft durchlassen, können Wurzelwachstum unterstützen.
- Pflege zur Baumgesundheit: Regelmäßige Überprüfung auf Anzeichen von Krankheiten oder Schädlingen und die entsprechende Pflege fördern die Gesundheit des Baumes und seines Wurzelsystems.
- Biotechnische Stabilisierung: Biotechnische Stabilisierungstechniken wie Erosionsschutznetze und -matten, stabilisieren den Boden um den Baum und fördern das Wurzelwachstum.
- Mykorrhiza-Behandlungen: Symbiotische Mykorrhizapilze können die Wurzelgesundheit fördern und die Nährstoffaufnahme verbessern.
- Baumpflegepraktiken: Praktiken wie regelmäßiger Baumschnitt können dazu beitragen, die Gesundheit und Struktur auch des Wurzelsystems zu erhalten.

Bei der Auswahl von Maßnahmen sollten die spezifischen Bedürfnisse der Baumart, lokale Umweltbedingungen und die städtische Infrastruktur berücksichtigt werden. Ein umfassender Ansatz, der Boden, Bewässerung, Pflege und Umgebung berücksichtigt, sei entscheidend für die Förderung vitaler Wurzelsysteme bei Stadtbäumen. Für die Schwammstadt sei von größter Bedeutung herauszufinden, welche Pflanzenart welche Dauer der Trockenheit und Überstauung unbeschadet überstehen könne. Daten dazu lägen vielfältig und seit langem vor (Lyr et al., 1992; Levinsson et al., 2024).

Unabhängig von diesen physiologischen Voraussetzungen der Pflanzen könne aber durch die Bewertung der Pflanzenvitalität folgendes zusammengefasst werden:

- Es fände eine Wuchsförderung von Jung- und Altbäumen statt, wenn sie im richtigen Abstand zu Mulden gepflanzt seien. Baumpflanzungen in Muldenmitte führen zur Wurzelorientierung hin zur Muldenmitte, dem Unterwuchs seitlicher Gewerke und zur oberflächennahen Entwicklung; Pflanzung auf Podesten ergäbe Probleme beim Anwachsen, verzögerte Ausbreitung und Tiefenentwicklung;

seitliche Platzierung in Parkstreifen führe zu großflächiger Ausbreitung der Wurzeln, Unterwuchs seitlicher Gewerke und ungezügelter Entwicklung.

- Gruppenpflanzungen von Bäumen ohne kleine Baumgruppen und ohne Bodenversiegelung und mit besserer Pflege wirkten sich positiv aus.
- Einbindung von Bodendeckern, Gräsern, Stauden und Sträuchern wirke sich positiv aus.

### Wurzeln unter Wasser- und Trockenstress

**Dr. Mona Quambusch**, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und urbanem Grün, Julius Kühn-Institut, gab eine Übersicht über die physiologischen Reaktionen von Pflanzen unter Trockenheit und Überstauung.

Trockenheit stelle einen multidimensionalen Stress für Pflanzen dar. Trockenheit beeinträchtigt das normale Wachstum, störe die Wasserrelationen und verringere die Wassernutzungseffizienz bei Pflanzen. Pflanzen zeigten eine Vielzahl von physiologischen und biochemischen Reaktionen auf zellulärer und organischer Ebene, was es zu einem komplexen Phänomen mache. Die Rate der Photosynthese werde hauptsächlich durch Stomaverschluss, Membranschäden und gestörte Aktivität verschiedener Enzyme, insbesondere solcher, die an der ATP-Synthese beteiligt seien, reduziert. Pflanzen zeigten eine Reihe von Mechanismen, um Trockenheit standzuhalten, wie z. B. reduzierter Wasserverlust durch erhöhten diffusiven Widerstand, erhöhte Wasseraufnahme mit weiten und tiefen Wurzelsystemen sowie kleinere und saftige Blätter zur Verringerung des transpirativen Verlusts. Niedermolekulare Osmolyte, einschließlich Glycinbetain, Prolin und anderen Aminosäuren, organischen Säuren und Polyolen, spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung zellulärer Funktionen unter Trockenheit. Pflanzenwachstumsstoffe wie Salicylsäure, Auxine, Gibberelline, Cytokinine und Abscisinsäure beeinflussen die Reaktionen von Pflanzen auf Trockenheit. Polyamine, Citrullin und mehrere Enzyme wirken als Antioxidantien und verringerten die nachteiligen Auswirkungen von Wassermangel. Pflanzen-Trockenstress-Toleranz könne durch Gewöhnungseffekte bereits bei der Produktion von Pflanzen unabhängig von der Sortenwahl unterstützt werden (mehr Details s. Übersichtsarbeiten von Aroca, 2012; Farooq et al., 2012).

Die Überstauung von Standorten sei eine weitere abiotische Belastung. Unter Überstauungsstress litten Pflanzen unter oxidativem Stress, Schwermetalltoxizität und Energiemangel, was zu Stoffwechselstörungen und Wachstumshemmungen führe. Andererseits hätten Pflanzen überstauungstolerante oder adaptive Mechanismen entwickelt, darunter morphologische Veränderungen, die Alternation von Atmungswegen, antioxidativen Schutz und Regulation endogener Hormone (Details s. Übersichtsarbeit von Xu et al., 2023).

Die Stressermittlung bei Stadtbäumen erfolge in der Praxis für beide Stresssituationen durch die visuelle Bauminspektion (GALK, 2023). Es würden genetische Unterschiede sowohl in der Trockentoleranz als auch in der Überstauungstoleranz zwischen Pflanzenarten und Genotypen innerhalb einer Art festgestellt, die Ausgangspunkt für Selektionen geeigneter Pflanzen in der Schwammstadt seien.

### Wurzeln können im Wasser erkranken

**Georg Henkel**, Fachbereich Pflanzenschutz der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, zeigte auf, dass das regelmäßige Vorhandensein von Wasser um Bäume herum in einer Schwammstadt sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die Bäume haben kann. Während Bäume generell Wasser benötigen, um zu wachsen und zu gedeihen, könnten übermäßige Feuchtigkeit und ständige Nässe um ihre Wurzeln herum auch verschiedene Nachteile und Probleme verursachen:

- Stehendes Wasser um die Wurzeln herum: Dies könne zu Wurzelfäule und Sauerstoffmangel führen. Ohne ausreichenden Sauerstoff könnten die Wurzeln beschädigt werden und die Fähigkeit des Baumes, Wasser und Nährstoffe aufzunehmen, werde beeinträchtigt. Entscheidend sei die Dauer der Wassereinwirkung: Nach eigenen Beobachtungen hätten Apfelbäume, deren Wurzeln fünf Wochen im Frühjahr überstaut gewesen seien, trotzdem gute Erträge gehabt.
- Feuchte Bedingungen: Dadurch sei die Anfälligkeit von Bäumen für verschiedene Krankheiten und Schädlinge erhöht. Ein dauerhaft feuchtes Umfeld könne das Wachstum von Pilzen und pathogenen Organismen fördern, die Bäume infizieren und schwächen. Bodenbürtige Pilzkrankheiten (*Fusarium spp.*, *Phytophthora spp.*, *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Cylindrocladium scoparium*, *Verticillium spp.*, *Pythium spp.*) seien oft die Ursache von oberirdischen Schadsymptomen.
- Wachstumsstörungen und Verrottung: Übermäßige Feuchtigkeit könne zu Wachstumsstörungen führen und das normale Wurzel- und Stammwachstum beeinträchtigen. Dies könne dazu führen, dass der Baum instabil wird und seine strukturelle Integrität verliert. Die Rinde könne aufgrund ständiger Feuchtigkeit verrotten, was die Gesundheit des Baumes beeinträchtigt (z. B. Brand-Krustenpilz (*Kretzschmaria deusta*) an Rosskastanie).

Langanhaltende Feuchtigkeit könne auch dazu führen, dass Nährstoffe aus dem Boden ausgewaschen werden, was zu einem Verlust an wichtigen Nährstoffen für den Baum führt. Darüber hinaus könne das Wasser den Boden um die Wurzeln verdichten, was die Bodenstruktur verschlechtern und das Wurzelwachstum behindern könne.

In extremen Fällen könnten Bäume, die ständig in Wasser stehen, Schwierigkeiten haben, sich zu erholen oder weiter zu wachsen. Dies könne zu einem stagnierenden Wachstum oder im schlimmsten Fall zum Absterben des Baumes führen.

Um diese potenziellen Probleme zu minimieren, sei eine angemessene Planung und Pflege von entscheidender Bedeutung. Maßnahmen wie die Verwendung von durchlässigen Böden, die Installation von Drainagesystemen und die richtige Gestaltung von Baumgruben könnten dazu beitragen, dass Bäume in Schwammstädten die Vorteile des Wassermanagements genießen, ohne den negativen Auswirkungen von überschüssiger Feuchtigkeit ausgesetzt zu sein. Die Auswahl geeigneter Baumarten, die an feuchte Bedingungen angepasst sind, sowie eine angemessene Bewässerung und Entwässerung seien ebenfalls wichtige Faktoren, um das Wohlergehen der Bäume zu gewährleisten.

### Den Wasserkreislauf in der Schwammstadt beschreiben

Eine generelle Schwierigkeit bei der nachhaltigen Transformation von Pflanzenstandorten in der Schwammstadt ist die Feststellung, woher Bäume ihr Wasser beziehen und in welche Reservoirs im Boden Wasser geleitet werden könnte, um es zu speichern und wieder pflanzenverfügbar zu machen. Die Klärung dieser Fragen könnte wichtiger Ausgangspunkt für die Anpassung von Standorten sein. Die Isotopenanalyse ist eine fortschrittliche Methode zur Bestimmung der Herkunft von Wasser in Pflanzen, während geophysikalische Methoden in der Lage sind, wasserhaltende Bodenschichten effizient zu eruieren.

### Prüfen, woher Bäume ihr Wasser beziehen

**Prof. Dr. Matthias Beyer** und Kolleg:innen, Isodrones, TU Braunschweig, und Climax Project, Julius Kühn-Institut, stellen ihren innovativen Ansatz der Verwendung der Isotopenanalyse, die auf stabile Isotope des Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) aufbaut, dar.

Die verwendeten Isotope seien  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  und  $^3\text{H}$  für Wasserstoff sowie  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  und  $^{18}\text{O}$  für Sauerstoff, die auf unterschiedliche Weise gekoppelt zu unterschiedlich schweren Wassermolekülen ( $\text{H}_2\text{O}$ ) führten. Gemessen werde das Verhältnis von schweren und leichten Wassermolekülen in der entsprechenden Wasserprobe. Wenn man als Ausgangswert das Isotopenverhältnis der aus direkter Beprobung ermittelten Quelle kenne, könne man in den unterschiedlichsten Baumkompartimenten bestimmen, woher der Baum das Wasser bezogen habe (Beyer et al., 2020) und welchen Weg das Wasser vom Boden in die Atmosphäre nähme (Kühnhammer et al., 2023).

Die Methode sei in Braunschweig an drei Baumarten in versiegeltem und nicht-versiegeltem Boden getestet worden. Diese Bäume hätten die Hauptmenge des erforderlichen Wassers aus den oberen 50 cm des Bodens bezogen und seien deshalb im Sommer abhängig von Bewässerung gewesen. Dies habe an der geringen Haltefähigkeit für Wasser der tieferen Bodenschichten gelegen. Sehr viel sinnvoller sei es aber, den tieferen Boden so zu gestalten, dass die Wurzeln auch in größeren Tiefen noch an Wasser heranreichten oder sogar Kontakt zum Grundwasser hätten. Insgesamt seien die Standorte individuell sehr unterschiedlich gewesen.

### Wasserreservoirs für Wurzeln eruieren

**Johannes Hoppenbrock**, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und urbanem Grün, Julius-Kühn-Institut, und **Prof. Dr. Matthias Bücker**, Institut für Geophysik und Extraterrestrische Physik, TU Braunschweig, präsentierten geophysikalische Methoden und Feuchtesensoren für die Untersuchung von Bodeneigenschaften und insbesondere des Bodenfeuchtigkeitsgehalts. Jede Methode habe ihre eigenen Vorteile und Einschränkungen.

Während Bodenfeuchtesensoren geeignet seien, um punktuell zu messen, könnten räumliche Variationen der Bodenfeuchte damit nicht erfasst werden. Geophysikalische Metho-

den könnten hingegen Informationen über einen größeren Raumumfang liefern, da sie nicht auf einen einzelnen Punkt beschränkt seien. Sie ermöglichten eine räumlich ausgedehnte Kartierung und das Monitoring von Bodeneigenschaften, einschließlich der Verteilung der Bodenfeuchtigkeit. Messung physikalischer Parameter (z. B. elektrische/mechanische Eigenschaften, Dichte) und die Korrelation der Bodenfeuchte mit Materialeigenschaften seien Einsatzbereiche.

In ihrem Forschungsprojekt brächten sie Geophysik in Verbindung mit der Pflanzenhydrologie. Der Untergrund an Pflanzenstandorten könne so zerstörungsfrei charakterisiert werden, indem Information über die Wassersättigung, Geologie und hydraulische Leitfähigkeit gesammelt würden. Eingesetzt würden dazu geophysikalische Methoden wie die Gleichstromgeoelektrik (GG), Spektrale induzierte Polarisation (SIP), Georadar (GPR) und Seismik.

Dadurch, dass einige geophysikalische Methoden tief in den Boden eindringen könnten, würden Informationen über den Feuchtigkeitsgehalt in tieferen Bodenschichten, wasserleitende Strukturen sichtbar oder Veränderungen der Bodenfeuchte über einen längeren Zeitraum beobachtbar. Dies sei besonders wichtig für die Untersuchung von dynamischen Prozessen wie Wasserbewegungen im Boden. Aber auch das Auffinden unterirdischer Infrastruktur, wie von Rohren, seien Anwendungsgebiete, die sie mit Erfolg getestet hätten. Die Auswertung der Aufzeichnungen ermögliche darüber hinaus, 3D-Informationen über die Verteilung der Bodenfeuchtigkeit bereitzustellen. Dies erlaube eine detaillierte Charakterisierung des Feuchtigkeitsgehalts im Raum und damit eine Einbeziehung der Daten in die Planung der Bepflanzung (Mehr Information zum Thema s. Bucker, 2024).

## Die blau-grüne Infrastruktur in der Schwammstadt planen und bauen

In den vorangegangenen Beiträgen war deutlich geworden, dass ein Standort für Pflanzen in der Schwammstadt, die einerseits Wasser verteilen, versickern und halten muss, andererseits vermeiden muss, dass Pflanzen durch Trockenheit und Überstauung irreparable Schäden bekommen, ein anspruchsvolles Design erfordert, um die Extreme auszugleichen. Gleichzeitig gilt es, Pflanzen auszuwählen, die wichtige Ökosystemleistungen, die durch die Wasserdynamiken in der Schwammstadt genutzt werden können, effektiv zu erbringen. Dazu gehört ihre Reinigungswirkung bei Eintrag von Schadstoffen.

### Pflanzenstandorte wasserwirtschaftlich integrieren

**Dr. Harald Sommer**, Sieker Regenwasserexperten, berichtete über das Projekt „Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere“, in dem die BlueGreenStreets Toolbox entwickelt wurde (Dickhaut, 2022) und beschrieb die Methodik ihres Zustandekommens anhand der Schadstofffrachten im Regenwassermanagement.

Die Toolbox sei eine praxisorientierte Planungshilfe, die sich auf die Umgestaltung bestehender, urbaner Straßen konzen-

triere. Sie stelle Instrumente und planerische Anleitungen für die Gestaltung von Straßenräumen zur Verfügung, die auch Pflanzenstandorte wasserwirtschaftlich integrieren helfen. Die Toolbox richte sich an alle Beteiligten, die für die Konzeption, Planung und Umgestaltung von Straßenräumen verantwortlich seien. Wasserspeicherung in Pflanzgruben und Baumrigolen stünden im Mittelpunkt, um eine Verbesserung der Verdunstungseffekte und des Mikroklimas zu erzielen. Weitere Module beträfen die Stoffströme (einschließlich der Schadstofffrachten von Regenwasser) und das Straßensanierungsmanagement.

In mehrjährigen Versuchen und Praxistests seien „Blau-grüne Elemente“ charakterisiert und zu Elementgruppen zusammengefasst worden:

- Vitale Baumstandorte: hydrologisch optimierter Baumstandort (Bestand, Neubau) und Baumrigolen (ohne Speicher, mit Speicher),
- Elemente der Verdunstung: abgedichtetes Verdunstungsbecken (baulich eingefasst), abgedichtetes Verdunstungsbeet (natürlich eingefasst), Fassadenbegrünung (bodengebunden, wandgebunden), Pergolen, grüne Wände (Lärmschutzwände/Verdunstungswände),
- Elemente der Versickerung: Versickerungsmulden (ohne Rigole, mit Rigole), Tiefbeete (ohne Rigole, mit Rigole), wasserdurchlässige Bodenbeläge,
- Elemente der Wassernutzung: Zisterne zur Niederschlagswasserspeicherung,
- Elemente der Starkregenvorsorge: Rückhaltung im Freiraum, Blue Streets — Rückhaltung und/oder Ableitung (Notwasserweg) im Straßenraum,
- Elemente der Wasserreinigung: Filterbeete,
- Prinzipien und Ausstattungsmerkmale der lebendigen Straßenraumgestaltung: abwechslungsreiche Bepflanzung, Baumbesatz, Materialwahl, Flächen für Mobiliar Bewegung, Aufenthalt und Spielen, Angebote für klimafreundliche Mobilität.

Die Erfahrungen und Erkenntnisse dieses Projektes sollten letztlich in Regelwerke von DWA, FLL und FGSV einfließen. Mit der Toolbox werde es möglich, vitale Baumstandorte auf der Grundlage wissenschaftlicher Standardisierung und Typentwicklung für die Gestaltung der Schwammstadt auszuwählen und erfolgreich zu etablieren.

### Staudenauswahl für die Wasserversickerung und Wasserreinigung

**Prof. Dr. Swantje Duthweiler**, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, stellte heraus, dass Versickerungsanlagen in Deutschland gewöhnlich so gebaut würden, dass ein Einstau von Regenwasser von maximal 30 cm erfolgen könne. Die Anforderung an die Zusammensetzung der bewachsenen Bodenzone sei, dass eine Entleerungszeit bei einem Abstand zum mittleren Grundwasser von mindestens 1 m von weniger als 84 h zustande komme (DWA-A, 2020).

In solchen oder vergleichbaren, aber auch davon abweichenden Versickerungsanlagen habe man z. B. in Dänemark und den Niederlanden seit Jahren Pflanzenmischungen angelegt, die sich erfolgreich hätten etablieren können und aus denen

empfehlenswerte Pflanzenzusammensetzungen für Versickerungsmulden abgeleitet werden könnten:

Malmö:

- *Phragmites australis* (Schilfrohr), *Carex remota* (Winkel-Segge), *Lythrum salicifolia* (Blutweiderich)
- *Sorbus aucuparia* (Vogelbeerbaum), *Ligustrum vulgare*-Hecke (Gewöhnlicher Liguster), *Phragmites australis* (Schilfrohr), *Carex pendula* (Hänge-Segge), *Lythrum salicifolia* (Blutweiderich)

Kopenhagen:

- *Prunus padus* (Gewöhnliche Traubenkirsche), *Malus baccata* (Beeren-Apfel), *Luzula sylvatica* (Wald-Hainsimse), *Geranium phaeum* (Brauner Storchschnabel), *Geranium sanguineum* (Blutroter Storchschnabel), *Polypodium interjectum* (Mittlerer Tüpfelfarn)

Amsterdam:

- *Sesleria autumnalis* (Herbst-Blaugras), *Aster amellus* (Berg-Aster), *Salvia nemorosa* 'Blauhügel' (Steppen-Salbei), *Sedum telephium* 'Matrona' (Herbst-Fetthenne), *Euphorbia polychroma*/syn. *E. epitymoides* (Vielfarbige Wolfsmilch), *Stachys officinalis* (Echter Ziest), *Limonium latifolium* (Blauer Strandflieder)
- *Hemerocallis* × *hybr.* (Taglilien versch. Sorten), *Acorus gramineus* 'Ogon' (Weißgestreifter Kalmus, wirkt gelbgrün), *Carex morrowii* 'JS Mosten' (Japan-Segge)
- *Betula nigra* (Schwarz-Birke, Fluss-Birke), *Hydrangea quercifolia* (Eichenblättrige Hortensie), *Rodgersia sambucifolia* (Holunderblättriges Schaublatt), *Brunnera macrophylla* 'Jack Frost' (Kaukasisches Vergissmeinnicht), *Liriope muscari* (Schmale Lilientraube), *Carex morrowii* 'JS Mosten' (Japan-Segge), *Luzula nivea* (Schneeweiße Hainsimse), *Carex plantaginea* (Immergrüne Breitblatt-Segge)
- *Betula nigra* (Schwarz-Birke, Fluss-Birke), *Quercus palustris* (Sumpf-Eiche), *Hydrangea quercifolia* (Eichenblättrige Hortensie), *Brunnera macrophylla* 'Jack Frost' (Kaukasisches Vergissmeinnicht), *Liriope muscari* (Schmale Lilientraube), *Carex morrowii* 'JS Mosten' (Japan-Segge), *Luzula nivea* (Schneeweiße Hainsimse), *Carex plantaginea* (Immergrüne Breitblatt-Segge)
- *Quercus phellos* (Weidenblättrige Eiche), *Quercus palustris* (Sumpf-Eiche), *Kirengeshoma palmata*, (Japanische Wachsglocke), *Brunnera macrophylla* 'Jack Frost' (Kaukasisches Vergissmeinnicht), *Tiarella wherryi* (Amerikanische Schaumblüte), *Liriope muscari* (Schmale Lilientraube), *Carex morrowii* 'JS Mosten' (Japan-Segge), *Luzula nivea* (Schneeweiße Hainsimse), *Carex plantaginea* (Immergrüne Breitblatt-Segge)
- *Carex remota* (Winkel-Segge), *Carex grayi* (Morgenstern Segge), *Rodgersia sambucifolia* (Holunderblättriges Schaublatt), *Ligularia stenocephala* (Kerzen-Goldkolben)

Rotterdam:

- *Digitalis purpurea* (Roter Fingerhut), *Bistorta amplexicaulis* (Kerzen-Knöterich), *Bistorta officinalis* (Wiesen-Knöterich), *Iris pseudacorus* (Sumpf-Schwertlilie), *Geranium macrorrhizum* 'Ingwersen' (Balkan-Storchschnabel), *Aquilegia vulgaris* (Gemeine Akelei)

Derzeit würden in Deutschland Ansätze für die multifunktionale Gestaltung von Versickerungsmulden gesucht. So sei der Umgang mit Schadstoffen im Niederschlagswasser ein wichtiges Thema, indem man vor allem nach einheimischen Pflanzen suche, die Wasser reinigen könnten.

Schwermetalle machten einen beachtlichen Anteil an Boden- und Wasserkontaminationen in der Stadt aus. Für die Sanierung kontaminierter Böden gelte die Phytoremediation als umweltfreundliche und nachhaltige Praxis. Die Umsetzung im Feld erfordere jedoch eine sorgfältige Pflanzenauswahl und umfassendes Wissen über den Einfluss verschiedener Umweltfaktoren. Daher wurde eine quantitative Auswertung von 330 Studien mittels eines meta-analytischen Ansatzes durchgeführt (Eben et al., 2024). Die systematische Bewertung umfasste die Berechnung von Bioakkumulationsfaktoren für Wurzeln und Sprossen sowie Translokationsfaktoren von 48 krautigen Arten. Es wurden auch die wichtigsten Boden- und Pflanzenfaktoren identifiziert, die die Aufnahme von Schwermetallen in Pflanzengewebe regulieren. Die Ergebnisse zeigten erhebliche Variationen in der Schwermetallaufnahmekapazität von Wurzeln und Sprossen bei verschiedenen Pflanzenarten. Die Aufnahme variierte auch je nach Art des Schwermetalls. Insgesamt bilde diese Studie eine Grundlage für die Mindestakkumulationskapazitäten verschiedener Arten und leiste somit einen wesentlichen Beitrag zur Planung und praktischen Anwendung von Phytoremediationsprojekten in Versickerungsanlagen und zur Selektion angepasster Arten.

Schon heute könne festgestellt werden, dass sich besondere Pflanzenarten für bestimmte Aufgaben in Versickerungsmulden eignen (Duthweiler & Eben, 2021, 2022):

Phytoremediation: *Iris germanica*, *Festuca ovina*, *Medicago falcata*

Kupferdach: *Achillea millefolium*, *Allium sphaerocephalon*, *Nepeta cataria*, *Hypericum perforatum*

Verkehrsflächen: *Centaurea scabiosa*, *Euphorbia cyparissias*, *Stachys recta*, *Cichorium intybus*, *Silene vulgaris*, *Trifolium rubens*

Kalk-Magerrasen: *Scabiosa ochroleuca*, *Euphorbia seguieriana* ssp. *niciana*, *Ajuga genevensis*, *Stipa capillata*, *Salvia pratensis*, *Linum flavum*, *Linum perenne*, *stipa pennata*, *Gentiana cruciata*, *Dianthus carthusianorum*, *Galium verum*, *Prunella grandiflora*,

Stickstoffkrautfluren: *Artemisia absinthium*, *Linaria vulgaris*, *Marrubium vulgare*

Mähwiesen- und Weidegesellschaft: *Leucanthemum vulgare*, *Knautia arvensis*, *Betonica officinalis*

Eichen- und Buchen-Mischwälder: *Tanacetum corymbosum*, *Calamintha nepeta*, *Inula hirta*, *Campanula trachelium*, *Melittis melissophyllum*, *Centaurea montana*, *Scilla bifolia*

Lockere Sand- und Felsenrasen: *Achillea nobilis*, *Lactuca perennis*, *Koeleria glauca*, *Melica ciliata*, *Alyssum montanum*, *Petrorhagia saxifrage*

Die Veröffentlichung aktueller Forschungsergebnisse zu diesen Themen stehe unmittelbar bevor.

## Diskussion

In der Abschlussdiskussion mit dem Publikum stimmte man überein, dass der Umbau der Stadt zur Schwammstadt zu den drängendsten Fragen der Grünentwicklung zähle. Werkzeugkästen wie die dargestellten wären deshalb von größter Bedeutung. Zudem wären übergeordnete Empfehlungen, wie von Seiten der Städte bei der Transformation der Grünflächen vorgegangen werden könne, gern gesehen – auch wenn mehrfach darauf hingewiesen wurde, dass jeder Pflanzenstandort spezielle Anpassungen von Lösungen erfordere.

In der Praxis gäbe es auch bürokratische Schlüsselfaktoren, die den effizienten Umbau behinderten: so wäre die vereinbarte Regel, eine Versickerung in Mulden in weniger als 84 h sicherstellen zu müssen, nicht geeignet, um Wasser wirklich zu speichern. Mulden seien dadurch oftmals sogar zu trocken. Dringend erforderlich sei es, solche Regeln anzupassen und in die Regelwerke verändert aufzunehmen.

Erfahrungswerte nutzbar für jeden zu machen, wurde für besonders bedeutsam gehalten. Dies betreffe die Pflanzenwahl im Besonderen. Bei den Bäumen solle die hier geforderten Eignungskriterien in die Diskussion der „Zukunftsbäume“ mit aufgenommen werden. Der Hinweis, die Biologie der Pflanzen, ihre genetischen, epigenetischen Voraussetzungen inklusive ihrer phänotypischen Plastizität stärker bei der Pflanzenwahl zu berücksichtigen, wurde allgemein begrüßt.

In diesem Zusammenhang wurden neueste Forschungsergebnisse als sehr bedeutsam erachtet: So untersuchten Levinsson et al. (2024), wie verschiedene Baumarten in städtischen Regenwassermanagementsystemen funktionieren. Das sei wichtig, da Baumgruben – wie dargestellt – ein temporäres Reservoir für Regenwasser bieten können und Bäume das Potenzial haben, den Abfluss von Regenwasser aktiv durch Transpiration zu reduzieren. Während städtische Baumpflanzgruben zunehmend für die kurzfristige Speicherung von Wasser während Starkregenereignissen genutzt werden, können sich negative Auswirkungen auf die Vitalität der Bäume ergeben, da Stress durch Überstauung u. a. zu Stomatenschließung führt. Die Empfindlichkeit gegenüber Wassermangel, aber auch Überstauung variiert jedoch je nach der Pflanzenart. Daher sei es wichtig festzustellen, welche Baumarten langfristig Vitalität und kontinuierliche Transpiration unter Überstauungsbedingungen und auch unter Wassermangel aufrechterhalten können und somit für solche Standorte geeignet sind. In einem Gewächshausversuch wurde untersucht, wie neun verschiedene Baumarten, die sich in der erwarteten Toleranz gegenüber Wassermangel unterscheiden, von kurzfristiger und saisonaler Überstauung betroffen waren. Die Sämlinge (*Magnolia × loebneri*, *Tilia tomentosa* und *Sorbus torminalis* – geringe Überstauungstoleranz; *Cercidiphyllum japonicum*, *Rhamnus cathartica* und *Fraxinus ornus* – mittlere Überstauungstoleranz; *Quercus palustris*, *Acer saccharinum* und *Fraxinus pennsylvanica* – hohe Überstauungstoleranz) wurden zwei Tage, fünf Tage und saisonaler Überstauung ausgesetzt. Die Behandlungen spiegelten bewährte Praxis (optimal), suboptimale Bedingungen und völliges Fehlen der Entwässerung der Baumgrube wider, unter Verwendung schwedischer Standards. Die stomatare Leitfähigkeit und das Blattwasserpoten-

tial wurden über einen Zeitraum von 71 Tagen regelmäßig bestimmt, und morphologische Anpassungen wurden erfasst. Vier der Arten waren bereits nach zwei Tagen Überstauung betroffen, mit reduzierter stomatärer Leitfähigkeit entweder während der Überstauung oder sofort danach, und nur die am besten gegen Überstauung tolerante Art war unbeeinträchtigt von der fünftägigen Behandlung. Alle Pflanzen überlebten jedoch fast 30 Tage Überstauung, bevor bei einigen Pflanzen dauerhaftes Welken eintrat. Vor diesem Hintergrund schlugen Levinsson et al. (2024) vor, dass die Auswahl der Baumart für Regenwassermanagementsysteme die Fähigkeit der Art berücksichtigen sollte, während der Überstauung eine hohe stomatare Leitfähigkeit aufrechtzuerhalten, da es klare Unterschiede zwischen den Arten gab. Die Wirksamkeit der ausgewählten Arten könnte einen wichtigen Einfluss auf die Regenwassermanagementkapazität von Städten sowie auf andere Aspekte der Bereitstellung von Ökosystemdienstleistungen durch städtische Bäume haben.

Die in der Tagung vorgestellten Monitoringmethoden für Wasser und Wasserdynamik wurden sehr begrüßt. Angezweifelt wurde allerdings, dass eine Praxisreife der Methoden vorläge und die Geräte unproblematisch von Grünflächenämtern genutzt werden könnten. Hier gelte es, entsprechende Anpassungen vorzunehmen und die allgemeine Digitalisierung im öffentlichen Raum zu nutzen.

Die Bepflanzung von Elementen der blau-grünen Infrastruktur auch vor dem Hintergrund ihrer Multifunktionalität aus Bäumen und Stauden in Mischkultur vorzunehmen, fand großen Anklang. Angeregt wurde allerdings, neben ausschließlich einheimischen Arten auch exotische mit aufzunehmen und deren Eignung mit aufzuzeichnen.

Organisatorisch empfahlen die Teilnehmenden, zukünftig Stadtgrün und Wasserbelange stets integriert vorzunehmen. Das bedeute, dass auf kommunaler und städtischer Ebene unterschiedliche Ressorts gemeinsam vorgehen müssten (z. B. Wasserwirtschaft und Grünflächenpflege). Integration der unterschiedlichen Ressorts heiße auch, dass hochwertige Baumschulware, die die besonderen Anforderungen erfüllen, frühzeitig in Auftrag gegeben werden müsste. Das sei oft aus haushaltstechnischen Gründen nicht möglich.

Die Organisator:innen der Veranstaltung bedanken sich bei den Vortragenden und den Teilnehmenden für eine sehr interessante und zukunftsweisende Tagung.

## Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autor:innen erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

## Literatur

**Aroca, R. (Hrsg.), 2012:** Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features, Heidelberg, Springer, ISBN: 978-3-642-32653-0.

**Balder, H., 1998:** Die Wurzeln der Stadtbäume: Ein Handbuch zum vorbeugenden und nachsorgenden Wurzelschutz. Stuttgart, Ulmer, ISBN: 978-3-8001-4549-2.

- Balder, H., L. Goll, D. Nickel, M. Rehfeld-Klein, 2018:** Befunde zur Verwendung von Bäumen in Muldensystemen im Rahmen der Regenwasserbewirtschaftung. *Pro Baum* **4**, 15–21.
- Beyer, M., K. Kühnhammer, M. Dubbert, 2020:** In situ measurements of soil and plant water isotopes: a review of approaches, practical considerations and a vision for the future. *Hydrology and Earth System Sciences* **24** (9), 4413–4440, DOI: 10.5194/hess-24-4413-2020.
- Bücker, M., 2024:** Publikationsverzeichnis, URL: <https://www.tu-braunschweig.de/igep/mitglieder/buecker#c675559>. Zugriff: 16. Januar 2024.
- Dickhaut, W., 2022:** BlueGreenStreets Toolbox – Teil A & B.: Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere, HafenCity Universität Hamburg, DOI: 10.34712/142.27.
- Duthweiler, S., P. Eben, 2021:** Regenwasserversickerungskonzepte mit regionalen Pflanzen. *Stadt + Grün* **9**, 17–22.
- Duthweiler, S., P. Eben, 2022:** Regenwasserversickerung mit regionalen Pflanzengemeinschaften. *Neue Landschaft* **1**, 38–43.
- DWA-A, 2020:** Arbeitsblatt DWA-A 138-1, Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. Teil 1, Planung, Bau, Betrieb. Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V, 95 S., ISBN: 9783968620183.
- Eben, P., M. Mohri, S. Pauleit, S. Duthweiler, B. Helmreich, 2024:** Phytoextraction potential of herbaceous plant species and the influence of environmental factors – A meta-analytical approach. *Ecological Engineering* **199**, 107169, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.107169.
- Farooq, M., M. Hussain, A. Wahid, K.H.M. Siddique, 2012:** Drought Stress in Plants: An Overview. In: Aroca, R. (Hrsg.). *Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features*, Heidelberg, Springer, S. 1–33, DOI: 10.1007/978-3-642-32653-0\_1.
- Feldmann, F., M. Quambusch, G. Langenbrinck, 2023:** Stadtgrün wirkt!: Aspekte der Pflanzenauswahl für eine leistungsfähige Vegetation für Klimaanpassung und Klimaschutz in der Stadt. Bonn, BBR, ISBN: 978-3-98655-042-4.
- GALK, 2023:** Empfehlungen zur Beurteilung von Stadtbäumen, URL: <https://galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/empfehlungen-zur-beurteilung-von-baeumen-in-der-stadt>. Zugriff: 16. Januar 2024.
- Kühnhammer, K., J. van Haren, A. Kübert, K. Bailey, M. Dubbert, J. Hu, S.N. Ladd, L.K. Meredith, C. Werner, M. Beyer, 2023:** Deep roots mitigate drought impacts on tropical trees despite limited quantitative contribution to transpiration. *The Science of the total environment* **893**, 164763, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164763.
- Levinsson, A., T. Emilsson, H. Sjöman, B. Wiström, 2024:** Using stomatal conductance capacity during water stress as a tool for tree species selection for urban stormwater control systems. *Urban Forestry & Urban Greening* **91**, 128164, DOI: 10.1016/j.ufug.2023.128164.
- Lyr, H., H.J. Fiedler, W. Tranquillini (Hrsg.), 1992:** Physiologie und Ökologie der Gehölze: Mit 85 Tabellen, Jena, G. Fischer, ISBN: 3334003973.
- Sieker, S., 2022:** Das Konzept der Schwammstadt (Sponge-city), URL: <https://www.sieker.de/fachinformationen/umgang-mit-regenwasser/article/das-konzept-der-schwammstadt-sponge-city-577.html>. Zugriff: 18. Februar 2022.
- WANG, J.-J., S.W. WANG, X.Y. WANG, L. SUN, 2019:** A simplified assessment model of environmental geology suitability combined with in-situ infiltration test for stormwater management and application. *Applied Ecology and Environmental Research* **17** (5), 11901–11910, DOI: 10.15666/aeer/1705\_1190111910.
- Xu, Z., L. Ye, Q. Shen, G. Zhang, 2023:** Advances in studies on waterlogging tolerance in plants. *Journal of Integrative Agriculture*, DOI: 10.1016/j.jia.2023.12.028.
- Zevenbergen, C., D. Fu, A. Pathirana (Hrsg.), 2018:** Sponge cities: Emerging approaches, challenges and opportunities, Basel, Beijing, Wuhan, Barcelona, Belgrade, MDPI.