

# PLANUNGSHILFE MESSPRINZIPIEN UND -METHODEN ZUM MONITORING VON BODEN- BAUM-WASSER

EIN AUSZUG AUS DER  
TOOLBOX BLUEGREENSTREETS 2.0  
„ESSENTIALS FÜR DIE UMSETZUNG“  
DEZEMBER 2024

ANNETTE ESCHENBACH  
PHILIPP LAU  
INES NOFZ  
MICHAEL RICHTER



## 7.2 PLANUNGSHILFE MESSPRINZIPIEN UND -METHODEN ZUM MONITORING VON BODEN-BAUM-WASSER

### EINFÜHRUNG

Unterschiedliche Typen von Baumstandorten mit Regenwasserbewirtschaftung wirken sich auf den Wasser- und Gashaushalt am Standort und somit auf die Vitalität der Bäume aus und können so den urbanen Wasserhaushalt bis hin zum Stadtklima beeinflussen. Diese sind bislang nur unzureichend erforscht und nicht langfristig nachvollzogen. Um diese Wissenslücke in Zukunft schließen zu können, werden langfristige Messungen an Pilotprojekten sowie Feld- und Laborversuche benötigt. Die Vergleichbarkeit solcher Untersuchungen ist wichtig, um Erkenntnisse verallgemeinern und auf andere geographische Räume und Standortbedingungen übertragen zu können.

In dieser Planungshilfe werden beispielhaft Prinzipien des Monitorings von Wasser- und Lufthaushalt dargestellt bzw. vorgeschlagen, und die praktische Anwendung an Beispielen dargestellt. Die vorgestellten Verfahren sind in Forschung und der Praxis erprobt und etabliert und sollten als Grundlage für eine Systembeschreibung dienen. Darüber hinaus sind umfassendere Messverfahren zur Erforschung spezifischer Fragestellungen möglich. Als Beispiel für die Darstellung eines umfassenden Monitorings von optimierten Baumstandorten wird hier die Skizze einer Struktursubstrat-Monitoringstelle der Bundesanstalt für Wasserwirtschaft dargestellt (Abb. 77).

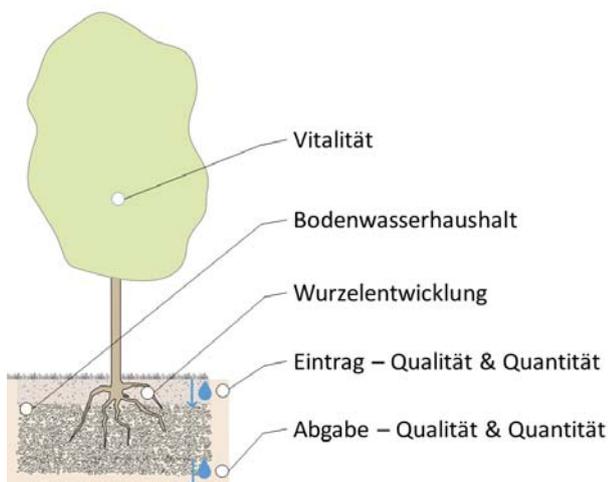


Abb.: 76 Parameter zur messtechnischen Erfassung der Wirkung von Baumstandorten (BGS, HCU)

### EFFEKTE UND PARAMETER

Um am Baumstandort die Effekte der Regenwasserbewirtschaftung zu erfassen, müssen Wasserhaushaltsdynamik im Boden und die Baumvitalität gemessen und bewertet werden. In den folgenden Ausführungen werden Parameter beschrieben bzw. vorgeschlagen, um mögliche Effekte an Standorten datenbasiert nachzuweisen (siehe auch Abb. 76).

#### VITALITÄT

Die Messung von Auswirkungen unterschiedlicher Bauweisen auf die Baumvitalität ist ein zentrales Anliegen. Die Vitalität beschreibt den Zustand von Pflanzen in einem Gebiet und lässt sich durch verschiedene biophysikalische Indikatoren bestimmen. Die GALK definiert die Vitalität eines Baumes als die Lebenstüchtigkeit, die sowohl durch genetische Anlagen als auch den Umweltbedingungen geprägt ist. Vitalität äußert sich insbesondere im Gesundheitszustand des Baumes, seiner Leistungsfähigkeit in Wachstum, Entwicklung und Fortpflanzung, seiner Anpassungsfähigkeit an Umweltveränderungen, seiner Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten und Schädlinge sowie seiner Regenerationsfähigkeit (GALK Empfehlungen zur Beurteilung von Stadtbäumen) <https://galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/empfehlungen-zur-beurteilung-von-baumen-in-der-stadt/>.

#### BODENWASSERHAUSHALT

Der Bodenwasserhaushalt von Baumstandorten wird durch die klimatische Wasserbilanz bedingt und setzt sich aus der Dynamik der Zufuhr bzw. Zuleitung von Wasser (Niederschlag, Bewässerung, Grundwasser), der Aufnahme von Wasser (Infiltration), der Versickerung und lateralen Verteilung, der Verdunstung und Ableitung (Drainage) zusammen. Eine detaillierte Differenzierung der

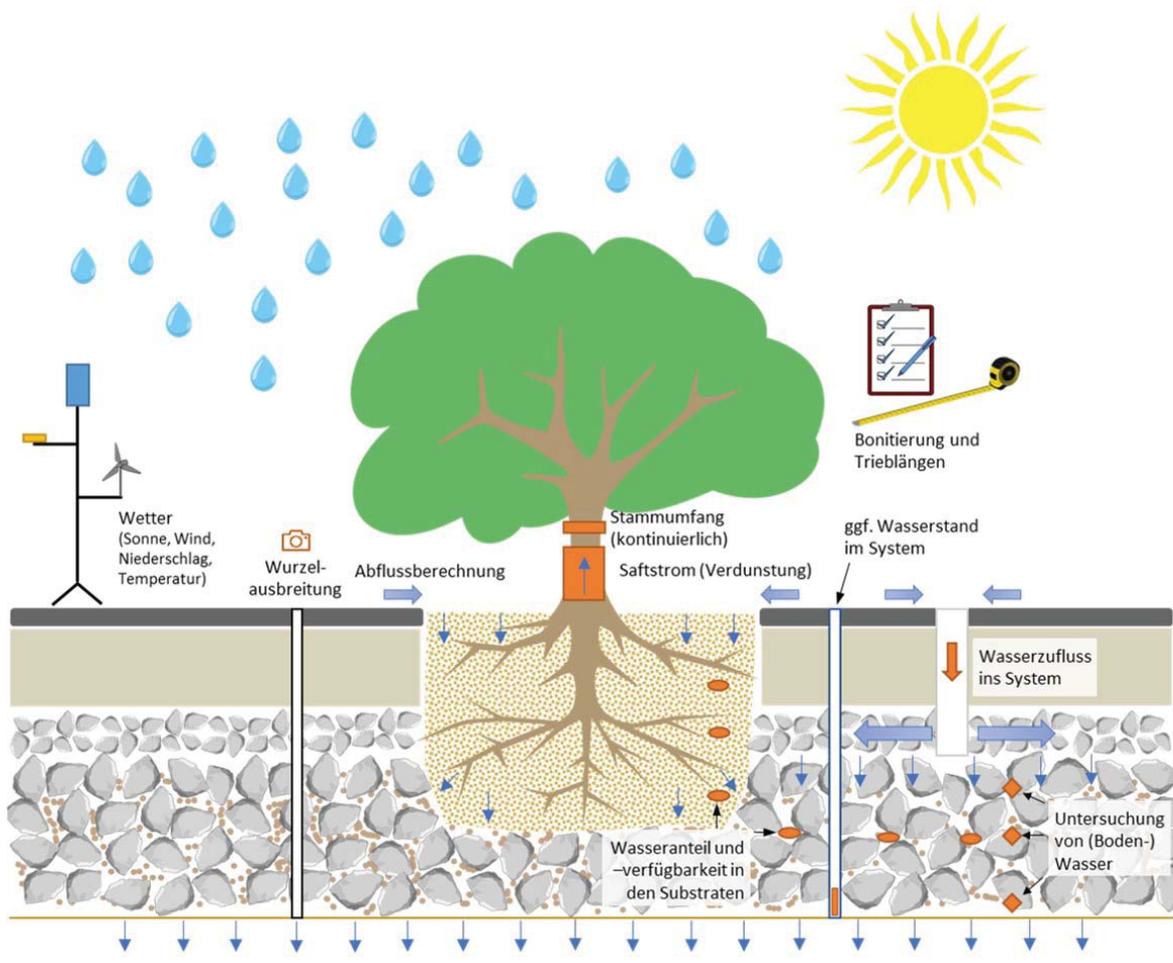


Abb.: 77 Skizze eines umfassenden Monitoringsystems von Baumstandorten in Struktursubstratstandorten (Anna Zeiser, BAW)

möglichen Komponenten bzw. Wasserflüsse ist in Abb. 78 am Beispiel des Schwammstadtprinzips für Stadtbäume dargestellt (aus Zeiser et al. 2023). Zielsetzung für den Bodenwasserhaushalt bei der Regenwasserbewirtschaftung an Baumstandorten ist grundsätzlich einerseits möglichst viel Wasser über längere Zeit pflanzenverfügbar zu speichern (hohe nutzbare Feldkapazität des Substrates), um die Bäume insbesondere in Trockenzeiten mit Wasser zu versorgen. Andererseits muss das Substrat durchlässig genug sein, um bei starken Regenfällen oder Zufuhr eine schnelle Versickerung des Wassers zu ermöglichen und damit Staunässe zu verhindern. Staunässe führt dazu, dass es aufgrund von O<sub>2</sub>-Reduktion und CO<sub>2</sub>-Anreicherung in der Bodenluft zur Mangelversorgung der Baumwurzeln kommt. Diese kann zur Beeinträchtigung der Wurzelaktivität und der Baumvitalität führen.

## WURZELENTWICKLUNG

Die Messung der Wurzelentwicklung kann Aufschluss geben, wie schnell und in welche Bereiche sich Wurzeln ausbreiten bzw. ob die Ausbreitung der Wurzeln in dafür vorgesehen Bereiche im Untergrund erfolgt (Wurzellenkung).

## EINTRAG – QUALITÄT & QUANTITÄT

Um die Wirksamkeit der Baumstandorte im Hinblick auf die Wasserdarbietung für die Bäume und die Wirkung zur Überflutungsvorsorge abzuschätzen, ist eine Ermittlung der eingebrachten Wassermengen durchzuführen. Falls das Risiko von Schadstoffeinträgen besteht, etwa durch Einleitung von Niederschlagswasser von Verkehrsflächen, ist auch eine qualitative Analyse vorzusehen.

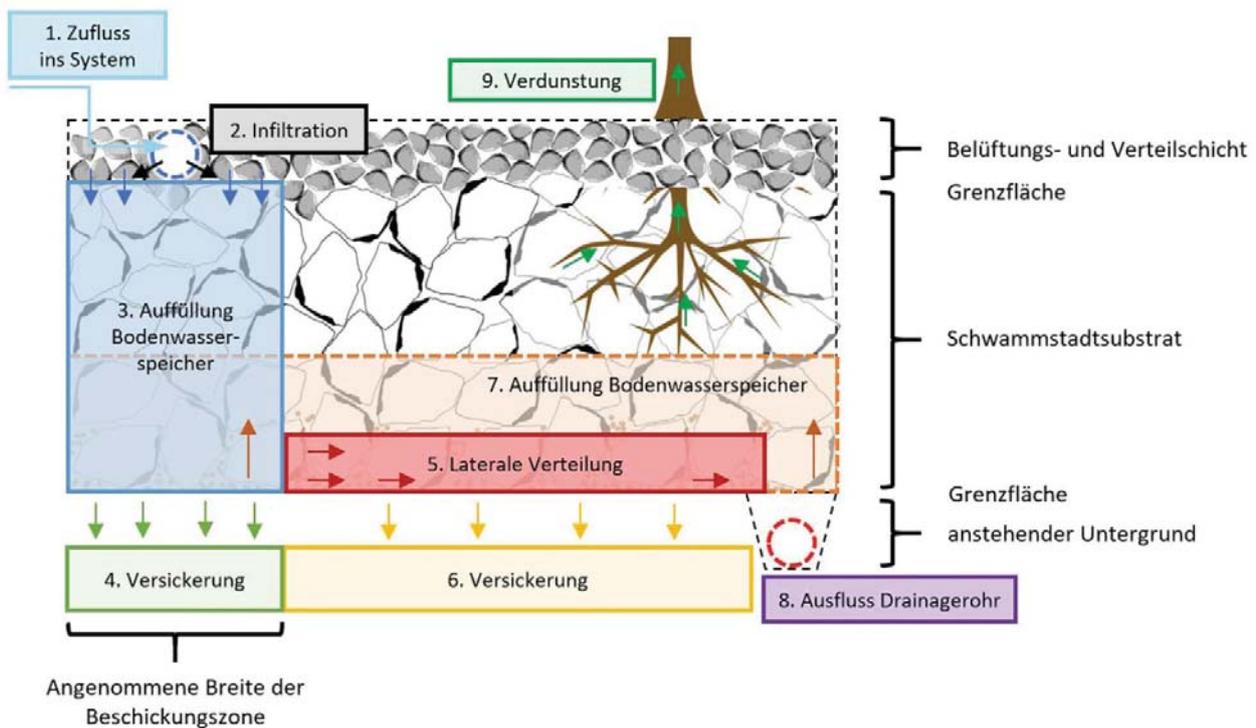


Abb.: 78 Schematische Darstellung der Wasserflüsse im System Schwammstadt für Stadtbäume (aus Zeiser et al. 2023)

## ABGABE – QUALITÄT & QUANTITÄT

Durch die Ermittlung von aus den Baumstandorten abgegebenen Wassermengen (Versickerung, Verdunstung, Drainage) können Aussagen darüber getroffen werden, wie viel Wasser kurz- oder langfristig im Baumstandort bzw. Substrat gespeichert wird und ggf. wie viel über den Baum verdunstet wird. Eine qualitative Analyse von Ablauf- bzw. Sickerwasser kann Aufschluss darüber geben, ob eine Grundwassergefährdung besteht.

## MESSTMETHODEN

### VITALITÄT

Um die Vitalität von Stadtbäumen zu bestimmen, können die aus der Baumkontrolle bekannten Bonitur-Verfahren verwendet werden, die mit geringem Bedarf an technischen Geräten durchgeführt werden. Die allgemeine Beurteilung des Zustands von Bäumen in der Stadt kann z. B. über die 5-stufige Schadstufen-Bestimmung der GALK durchgeführt werden (Abb. 79, <https://galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuuebersicht/empfehlungen-zur-beurteilung-von-baeumen-in-der-stadt/>).

Nach einem erweiterten Boniturschlüssel aus dem Projekt Stadtgrün 2021 (Boniturschlüssel „Neue Stadtbaumarten“, siehe [https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflge/dateien/stadtgruen2021\\_boniturschluessel.pdf](https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflge/dateien/stadtgruen2021_boniturschluessel.pdf)) werden jährlich Frühjahrs- und Herbstbonituren zu Frost- und Trockenschäden, Kronenvitalität, Schädlingsbefall, Erkrankungen und Zuwachsleistungen der Bäume durchgeführt. Die Messung der Zuwachsleistungen sollte folgende Parameter erfassen:

- Messung Stammdurchmesser in Brusthöhe (1,30 m)
- Messung Triebzuwächse (Bestimmung der Trieblänge von der Spitzenknospe bis zur letzten Triebbasisnarbe)
- Messung Baumhöhe (z. B. mittels Stab oder „Förderdreieck“)

Bei geeigneten Standorten ist ebenfalls der Einsatz von Dendrometern, die kontinuierliche Änderungen des Stammumfangs aufzeichnen und somit zusätzliche Rückschlüsse, z. B. auf Zuwächse in Trockenperioden liefern, möglich.

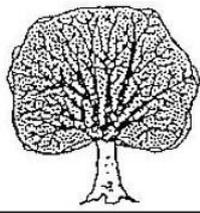
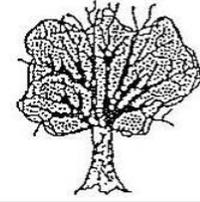
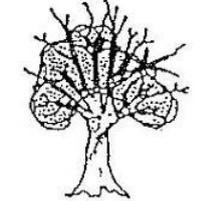
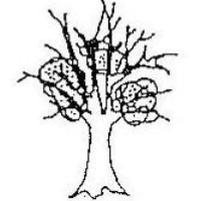
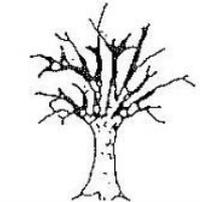
Schad- stufe	Schädi- gungs- grad	Zeichen	
0 gesund bis leicht geschädigt	0 -10 [%]		
1 leicht bis mittelstark geschädigt	>10 - 25 [%]		
2 mittelstark bis stark geschädigt	>25 - 60 [%]		
3 stark bis sehr stark geschädigt	>60 - 90 [%]		
4 sehr stark geschädigt bis absterbend/ tot	>90 -100 [%]		

Abb.: 79 Schadstufen für die Beurteilung von Bäumen in der Stadt (GALK)

### BODENWASSERHAUSHALT

Zur Erfassung des Bodenwasserhaushalts und der Abschätzung der Pflanzenverfügbarkeit von Wasser sind kontinuierliche Messungen von volumetrischen Wassergehalten und der Bodenwasserspannung bzw. des Matrix-Potenzials nötig. Damit können Aussagen zur räumlichen Verteilung des Wassers, zu möglichen Trockenphasen und der Wurzelverbreitung getroffen werden. Mit der Messung des Wassergehalts im Boden bzw. in Substraten können nur begrenzte Aussagen zur tatsächlichen Verfügbarkeit des Wassers für Pflanzen getroffen werden. Die Verfügbarkeit bzw. nutzbare Feldkapazität ist von der Poren-

größenverteilung abhängig und kann in der Praxis nur über die Bodenwasserspannung bewertet werden (u. a. Eschenbach et al. 2023, Borgmann gen. Brüser & Riehl, 2020). Um die Bodenwasserdynamik für den gesamten Baumstandort repräsentativ und 3-dimensional abzubilden, wird empfohlen, Sensoren in verschiedenen Tiefen, Abständen und Richtungen von der Stammachse einzubringen (siehe z. B. Schütt et al. 2022). Um die potenzielle Wasserversorgung von Bäumen bzw. die Durchfeuchtung von Baumstandorten nach Regenereignissen auch in unterschiedlichen Tiefen nachzuvollziehen und Hinweise auf Ausbreitung der Wurzeln in einzelne Tiefenbereiche zu erhalten, wird empfohlen mindestens je einen Wassergehalts- und Bodenwasserspannungssensor in das den Ballen umgebende Substrat (ca. - 0,4 m Tiefe) sowie in das darunterliegende Substrat in -0,8 und 1,2 m Tiefe einzubringen. Zusätzlich ist auch je ein Sensor im Pflanzballen hilfreich (wenn nicht wurzelnackt gepflanzt wurde), um auch den Unterschied der Dynamik zwischen Ballen und Substrat zu kennzeichnen.

### BODENGASHAUSHALT

Zur Erfassung des Bodengashaushalts (O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Bodenluft) und der Abschätzung des möglichen O<sub>2</sub>-Mangels (Einschränkung der Wurzelaktivität) und der CO<sub>2</sub>-Anreicherung ist die diskontinuierliche (mindestens monatliche) Messung der O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mithilfe von Gaslanzen oder Gasschläuchen in denselben Tiefen wie die Wasserspannungs- und Wassergehaltssensoren sinnvoll. Dadurch können Effekte von Starkregenereignissen, auftretende Staunässe oder verursacht durch Respirationprozesse innerhalb der Vegetationsperiode erfasst werden.

### WURZELENTWICKLUNG

Die Aufzeichnung der Wurzelentwicklung kann durch den Einbau von Plexiglasrohren („Rohr-Rhizotron“) und Bildgebungsverfahren, also durch spezielle Kameras, erfolgen. Die Plexiglasrohre von z. B. 60 mm Durchmesser können in unterschiedlichen Abständen von der Stammachse eingebaut

## ERGEBNISSE BGS-MONITORING

werden, um die Ausbreitung der Wurzeln zu beobachten. Beim Einbau der transparenten Rohre in die Baumgrube ist darauf zu achten, dass diese nicht zerkratzen, sie sollten also z. B. zunächst mit anderen Rohren umhüllt sein, die nach dem Einbau herausgezogen werden können.

### EINTRAG – QUALITÄT & QUANTITÄT

Der Eintrag bzw. die in die Baumgrube zugeführte Menge von Niederschlagswasser kann direkt oder indirekt bestimmt werden.

Indirekte Bestimmung: Berechnung der zugeführten Niederschlagsmenge über einen Abflussbeiwertansatz. Der Zufluss zu einer Baumgrube während einer bestimmten Zeit kann bei Vernachlässigung von Interzeption und Verzögerungseffekten durch den Abflusskonzentrationsprozess durch folgende Gleichung bestimmt werden:

$$Q_{zu} = r * (A_u + A_b)$$

$Q_{zu}$  Zufluss zur Baumgrube [l]

$r$  Regenmenge während der definierten Zeit [mm]

$A_u$  Abflusswirksame Fläche (alle befestigten Teilflächen, von denen Niederschlagswasser in die Baumgrube geleitet wird, multipliziert mit deren Abflussbeiwert  $C$ ) [m<sup>2</sup>]

$A_b$  Überregnete Fläche des Baumstandorts (i. d. R. Baumkrone + Baumscheibe) [m<sup>2</sup>]

Die Erfassung von Regenmengen am Standort bzw. in unmittelbarer Nähe vom Standort kann über Regenmesser erfolgen. Satellitendaten (z. B. RADOLAN) können auch genutzt werden, wobei diese für die Betrachtung kleinräumiger Effekte von Regenereignissen über eine zu geringe Auflösung verfügen.

Direkte Bestimmung: Zur direkten kontinuierlichen Aufzeichnung von Zuläufen eignen sich unterschiedliche Messverfahren. Direkte Messungen

bedingen Zulaufbauwerke bzw. Rohre, in denen Wassermengen gemessen werden können. Durch die Messung von Pegelständen in Schächten und zugehörige Durchflusshöhen in Zuläufen zu Baumgruben kann durch eine Wasserstands-Durchfluss-Beziehung eine kontinuierliche Zulaufmenge berechnet werden. Um Zulaufmengen in Rohren zu messen kann z. B. über eine vorherige Bestimmung der Wasserstands-Durchfluss Beziehung auch über die Messung von Wasserstandshöhen mit Ultraschallsensoren (Zeiser et al. 2024) oder weiteren Messverfahren (z. B. Magnetisch-Induktives Durchflussmessung) bestimmt werden.

Qualitative Analysen von zugeleitetem Niederschlagswasser sollten zur Sicherung der Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben durch Probenahme der Wässer und anschließende Laboranalysen nach ausgewählten Parametern (z. B. Schwermetalle, AFS, PAK, BSB-5, Chlorid, Phosphor, Ammonium) durchgeführt werden. Die Probenahme kann kontinuierlich über automatisierte Probensammler oder diskontinuierlich (manuell) zu bestimmten Zeitpunkten erfolgen. Um den zeitlichen Verlauf der Belastungen während eines Regenereignisses zu erfassen, eignen sich insbesondere automatische Probenahmegeräte, die mit einer Messsonde gekoppelt, ereignisgesteuerte Probenahmen ermöglichen.

Zur Abschätzung des Eintrags der stofflichen Belastungen können Kehrrichtanalysen durchgeführt werden, anhand derer sich Depositionsfrachten auf den abflusswirksamen Flächen im Zulauf eines Baumstandortes bestimmen lassen. Dazu sind in regelmäßigen Abständen an definierten Stellen Proben zu entnehmen. Laboranalysen der Kehrrichtproben können zusätzlich Hinweise auf die Qualität der stofflichen Belastungen geben und das Verschmutzungspotenzial der Oberflächen bestimmen.

### ABGABE – QUALITÄT & QUANTITÄT

Die Art und Weise der Messung der Qualität und Quantität von abgegebenen Wassermengen (Versickerung, Verdunstung, Drainage) hängt vor allem von der Bauweise der Anlagen ab. Bei abgedichte-

ten Bauweisen und eine Abgabe von überschüssigem Wasser über eine Drainage kann dort z. B. im Rohr oder durch ein installiertes Pegelrohr als auch Verteilerschacht die abgegebene Menge erfasst werden. Wenn die Baumgrube nicht abgedichtet ist und die Abgabe von Wasser über Versickerung und Verdunstung erfolgt, ist eine direkte Messung nur schwer möglich. Die Versickerungsleistung kann indirekt z. B. über eine Bilanzierung von eingeleiteter Wassermenge, Bodenwassergehalten in der Baumgrube und der Verdunstung angenähert werden. Eine vorherige Bestimmung der Infiltrationsleistung des umgebenden Bodens (z. B. Infiltrationsmessung) ist für eine Verifizierung empfehlenswert. Die Verdunstung der Bäume kann entweder messtechnisch bestimmt werden, z. B. über Saftflussmessungen (z. B. Bach et al. 2024, Zeiser et al. 2024, Wessolek & Kluge 2021), oder mittels Tools wie iTree (<https://www.itreetools.org/>) oder STADTBAUM ET (Kluge & Wessolek 2024), die standortabhängige Verdunstungsmengen für verschiedenen Baumarten berechnen können.

Aussagen über den Austrag von Schadstoffen aus Baumgruben können durch direkte Probenahmen vor Ort und anschließende Laboranalysen erfolgen. Abschätzungen zur Reinigung der Zulaufwässer der Baumstandorte durch Adsorptions- oder Filtersysteme kann in Säulen- oder Lysimeterversuchen erfolgen. Vor Ort-Probenahmen können ggf. über eingebaute Filterrohre oder Saugkerzen erfolgen. Über standardisierte Säulen- oder auch Schachtversuche können unterschiedliche Substratmischungen bezüglich ihres Schadstoffrückhalts beurteilt werden (siehe z. B. Burkhardt & Patrick 2024, Rath 2023).

## LITERATUR

Bach, P.; Bauer, T.; Burkhardt, M. 2024: „Cool-Green D&D“: Ein gläsernes Rigolensystem zur Demonstration und Digitalisierung von Schwammstadt-Bausteinen. Konferenz Papier der Aqua Urbanica 2024, 22.-24.09.2024, Graz: Urbanes Niederschlagswassermanagement: Herausforderungen – Möglichkeiten – Grenzen, Scientific Board der Aqua Urbanica, S. V23-1 – V23-11. <https://doi.org/10.3217/0q0yp-6d032>

Borgmann gen. Brüser, A.; Riehl, A. 2020: Bewertung der Wasserverfügbarkeit an Baumstandorten mittels Sensortechnik. ProBaum (3): 16 – 20. Link: <https://www.arbor-revital.de/wp-content/uploads/2021/01/Artikel-ProBaum-03-2020-web.pdf>

Burkhardt, M.; Patrick, Michael. 2024: Schadstoffrückhalt von Substraten - Untersuchung von Substraten für Baumrigolen und Sickerbeläge aus Zürich und Basel-Stadt. Aqua & Gas 10. 30-38.

Eschenbach, A.; Schütt, A.; Becker J.N. (2023) Urbane Böden: Leistungen und zukünftige Herausforderungen für Stadtbäume. In: Dujesiefken, D.; Streckenbach, M.: Jahrbuch der Baumpflege 2023, Braunschweig, Haymarket Media

Kluge, B.; Wessolek, G. 2024: Berechnungsverfahren und App zur Ermittlung von Verdunstung (ET) und Trockenstress von Stadtbäumen (STADTBAUM ET). In: Transformation urbaner linearer Infrastrukturlandschaften. S. 107-122. Hrsg. Stefan Kreutz (Hrsg.), Antje Stokman (Hrsg.) Oekom Verlag. DOI: doi.org/10.14512/9783987263187

Rath, S. 2023: Labormethoden zur bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Untersuchung des Schwammstadtsubstrats für Stadtbäume. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.

Schütt, A.; Becker, J.N.; Gröngröft, A.; Schaaf-Titel, S.; Eschenbach, A. 2022: Soil water stress at young urban street-tree sites in response to meteorology and site parameters. Urban Forestry & Urban

Greening (75), 127692. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127692>

Wessolek, G.; Kluge, B. 2021: Predicting Water Supply and Evapotranspiration of Street Trees Using Hydro-Pedo-Transfer Functions (HPTFs). Forests 12 (8): 1010. <https://doi.org/10.3390/f12081010>

Zeiser, A.; Rath, S.; Grimm, K.; Schmidt, S.; Klammler, G.; Zimmermann, D.; Murer, E.; Roth, T.; Strauss, P.; Weninger, T. 2023: Überlegungen zur Dimensionierung und Ausführung des Systems Schwammstadt für Bäume. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 75, 449–462. <https://doi.org/10.1007/s00506-023-00962-0>

Zeiser, A.; Weninger, T.; Zimmermann, D.; Roth, T.; Schmidt, S.; Rath, S.; Strauss, P. 2024: Zwei Jahre Schwammstadt für Bäume in Graz - Erste Ergebnisse aus dem Monitoring. Konferenz Papier der Aqua Urbanica 2024, 22.-24.09.2024, Graz: Urbanes Niederschlagswassermanagement: Herausforderungen – Möglichkeiten – Grenzen, Scientific Board der Aqua Urbanica, S. V09-1 – V09-14. <https://doi.org/10.3217/8dwkx-60e91>

## AUTOR:INNEN

Annette Eschenbach, Universität Hamburg  
Philipp Lau, Technische Universität Berlin  
Ines Nofz, Universität Hamburg  
Michael Richter, HafenCity Universität

