

# Entwicklung und Evaluierung von multifunktionalen Stadtbaum- standorten in Bestandsstraßen

MUFUWU–Stadtbaum – Das Schwammstadtprinzip für Bäume  
in der Bestandsstadt

D. Zimmermann, A. Zeiser,  
M. Lecko, T. Weninger, S. Rath,  
S. Schmidt, E. Murer,  
P. Knappitsch, R. Luger,  
T. Oberrauter, T. Roth

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**39/2024**

## **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren: D. Zimmermann, A. Zeiser, M. Lecko, T. Weninger, S. Rath, S. Schmidt, E. Murer, P. Knappitsch, R. Luger, T. Oberrauter, T. Roth

Wien, 2023

# Entwicklung und Evaluierung von multifunktionalen Stadtbaumstandorten in Bestandsstraßen

MUFUWU–Stadtbaum – Das Schwammstadtprinzip für Bäume in der Bestandsstadt

Daniel Zimmermann, Marek Lecko, Robert Luger, Pia Knappitsch  
3:0 Landschaftsarchitektur

Anna Zeiser, Erwin Murer  
Verein Landschaft Wasser

Thomas Weninger, Sebastian Rath  
Bundesamt für Wasserwirtschaft

Stefan Schmidt, Thomas Roth  
Österreichische Bundesgärten

T. Oberrauter

Wien, Juli 2024

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von





## **Vorbemerkung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform [www.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage</b> .....	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Projekthalt</b> .....	<b>15</b>
	4.1. Planung des Standortes / Vorgehensweise .....	15
	4.2. Baumartenwahl.....	18
	4.3. Testung von Substraten .....	19
	4.4. Bau der Schwammstädte .....	20
	4.5. Monitoring zur Beobachtung der Standortentwicklung .....	21
	4.6. Auswertung Monitoring.....	24
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>27</b>
	5.1. Eigenschaften der Substrate .....	28
	5.1.1. Vorgemischte Variante .....	30
	5.1.2. Strukturstabilität und Verlagerung.....	31
	5.1.3. Eignung für technische Richtlinien .....	32
	5.2. Baumentwicklung .....	33
	5.2.1. Beschreibung der Baumstandorte und deren Umgebung.....	36
	5.3. Wurzelausbreitung.....	37
	5.4. Wasserversorgung der Bäume.....	40
	5.5. Wasserzuflüsse und Wasserverteilung .....	47
	5.5.1. Wasserzufluss über Tiefbeet .....	47
	5.5.2. Wasserzufluss über Dachwasser .....	48
	5.5.3. Wasserzuflüsse über die Fläche.....	50
	5.5.4. Bewertung der Zuflussarten und Wasserverteilung.....	51
	5.6. Kühlungseffekt .....	52
	5.7. Grundwasserschutz.....	53
	5.7.1. Auslauf-Box.....	56
	5.8. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“ .....	56
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b> .....	<b>58</b>
	6.1. Praxisrelevante Erkenntnisse .....	58
	6.2. Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten .....	60
	6.3. Mögliche rechtliche Hürden .....	62
<b>7</b>	<b>Ausblick und Empfehlungen</b> .....	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>Verzeichnisse</b> .....	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>71</b>

9.1. Data Management Plan (DMP).....	71
9.2. Bonitierugsbogen.....	74
9.3. Vereinfachter Lageplan mit Messeinrichtungen.....	75



# 1 Kurzfassung

Das Projekt „MUFUWU Stadtbaum - Entwicklung und Evaluierung von multifunktionalen Stadtbaumstandorten in Bestandsstraßen“ hat eine messbare, nachhaltige und langfristige Verbesserung der Lebensbedingungen für Stadtbäume in bestehenden Straßenräumen von dicht verbauten Stadtbezirken als Inhalt und Ziel. Die Grundlage hierfür bietet das System Schwammstadt für Bäume, das mittlerweile zunehmende Bekanntheit in Österreich erlangt. Dieses System, das die Wirkungen eines Stadtbaums im urbanen Umfeld mit dem Wasserrückhaltepotenzial eines großen unterirdischen Auffangvolumens verbindet, wurde im Zuge des Projekts in der Bestandsstraße Leonhardgürtel in Graz gemeinsam mit einer umfassenden Monitoring-Einrichtung etabliert und über die ersten beiden Standjahre messtechnisch begleitet. Das neuartige System gibt einerseits Hoffnung auf vitaleres und langjähriges Baumwachstum und damit gekoppelt die Erfüllung zahlreicher Ökosystemleistungen im urbanen Raum und ist andererseits für die Siedlungswasserwirtschaft als dezentrale Regenwasser-Bewirtschaftungs-Maßnahme (grün-blaue Infrastruktur) von Interesse.

Obwohl das System bereits erstmals vor sechs Jahren in Österreich angewandt wurde, sind Pilotstandorte nach wie vor rar, vor allem wissenschaftlich begleitete mit Messeinrichtungen und datenbasierten Prozess- und Fehleranalysen des Systems und seiner zahlreichen Ausprägungsformen. Weiters wurde das System vor dem Start des Projekts kaum in Bestandsstädten umgesetzt, weshalb hierzu wenig Erfahrungen vorlagen. Auch die Frage des Umgangs mit bereits existierenden Bestandsbäumen trat zunehmend in den Vordergrund. Das gegenständliche Forschungsprojekt soll an all diesen Lücken an Wissen und Erfahrung ansetzen und neue Erkenntnisse liefern. Im Mittelpunkt stehen Forschungsfragen wie die nach der Dimension von Wasserrückhalt im Starkregenfall und Wasserspeicherung in Trockenperioden, nach der Baumvitalität in den verschiedenen Phasen des Baumlebens, nach einer Beurteilung der Relevanz von verschiedenen Teilen oder Teilprozessen im Gesamtsystem oder nach harten Kriterien für die Funktionsfähigkeit der Bauweise in Anbetracht der vielen Freiheitsgrade in Planung und Ausführung.

Im Zuge des Forschungsprojekts wurden die Parkflächen beidseits eines Abschnitts im Leonhardgürtel basierend auf dem Schwammstadtsystem umgeplant und neu gestaltet. Hierfür kamen drei verschiedene Baumarten für Neupflanzungen zum Einsatz, während bei vier Bestandskastanien eine Wurzelraumfreilegung und anschließende Sanierung mit Schwammstadtsubstrat und Baums substrat durchgeführt wurde. Ein Arbeitspaket diente der bodenhydrologischen Untersuchung verschiedener Feinsubstratmischungen aus Rohkomponenten mit anschließender Auswahl einer zur Umsetzung gelangenden Mischung. Eine weitere Besonderheit stellen die vielfältigen Typen von Einzugsgebietsflächen dar, deren anfallendes Oberflächenwasser auf diverse Arten in das Schwammstadtsystem eingeleitet wird. In diesem Zusammenhang wurde mittels einer im Zuge des Projekts entwickelten „Auslauf-Box“ eine Differenzierung zwischen dem ersten Spülstoß und sauberem, nachströmendem Oberflächenwasser mitgedacht und kombiniert mit Bodenfilterbecken ausgeführt, wodurch Bodenfilterbecken kleiner ausgeführt werden können. Auch die hier praktizierte direkte Einleitung von Dachwasser des benachbarten Wohnhauses ins Schwammstadtsystem ist von keinem anderen Projekt bekannt.

Neben den Besonderheiten in der Planung und Ausführung des Schwammstadtsystems an sich, ist vor allem das umfangreiche begleitende Monitoringsystem hervorzuheben, das im Zuge der Planung

ständig mitgedacht und während der Umbauarbeiten in enger Absprache mit den Ausführenden Schritt für Schritt installiert wurde. Diese installierte Mess-Sensorik zielt auf die Beobachtung der Wurzelenausbreitung, der Baumentwicklung, sowie der Dynamik des Zuflusses, der Verteilung, der Speicherung und des Abflusses des Wassers ab. Mit dem Ziel, einen überschaubaren Abschnitt des gesamten Standorts besser und höher aufgelöst zu betrachten, wurde der Südbereich des Leonhardgürtels West mit vier Bäumen als Hauptmessbereich definiert (ca. 5 x 32 m), in dem eine größere Anzahl an Sensoren zum Einsatz kam.

Nach den ersten beiden Beobachtungsjahren war bereits eine beginnende Einwurzelung der Neupflanzungen in das Schwammstadtsubstrat zu erkennen. Die Daten zeigen zudem deutlich, dass die Anwuchspflege mit regelmäßigen Gießgaben zur Befeuchtung des Pflanzballens in den ersten Jahren essenziell für ein gutes Anwachsen und die Vermeidung von Trockenstress ist. Die Neupflanzungen zeigten bereits unterschiedlich starke Stammzuwächse, wobei dies vor allem mit der direkten Ballenumgebung, wie Volumen des umgebenden Baumsubstrats zusammenhängen dürfte. Die Bestandsbäume scheinen die Wurzelfreilegung und anschließende Wurzelraumsanierung gut überstanden zu haben und beginnen bereits messbar diesen neuen und verbesserten Wurzelraum zu erschließen.

Dachwasser stellt grundsätzlich eine wertvolle Ressource für die Direkteinleitung in die Schwammstadt dar, fällt sehr rasch und der Niederschlagsganglinie folgend an und hat das Potenzial, bei einem durchdachten Verteilsystem häufig, also auch bei kleineren Niederschlagsereignissen, und in ausreichender Quantität Wasser für die Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers im Schwammstadtsubstrat zur Verfügung zu stellen. Im beobachteten Tiefbeet konnte nur bei sehr starken Niederschlagsereignissen ein messbarer Wasserstand aufgezeichnet werden. Straßenwasser hat neben dem Nachteil der stärkeren Verunreinigung auch den Nachteil, dass die Abflusswege im Straßenverkehr und möglichen Umbaumaßnahmen leicht beeinflusst und abgewandelt werden können.

Aus der Synthese all dieser Beobachtungen lassen sich wertvolle Schlüsse ziehen, welche Elemente des komplexen Gesamtsystems besonders relevant sind und in welcher Phase seiner Lebensdauer diese maßgeblich beeinflusst werden. Vor allem ein zuverlässiges Verteilsystem, welches das anfallende Niederschlagswasser in Richtung der Baumwurzeln verteilen soll, ist ein kritischer Bestandteil des Systems Schwammstadt für Bäume. Damit in Zusammenhang steht die Abstimmung des angeschlossenen Einzugsgebiets (EZG) hinsichtlich Wassermenge und -qualität mit den Kapazitäten des gebauten Systems. Letztere konnten aufgrund mangelnder Erfahrungswerte nur grob abgeschätzt werden, die Messwerte aus dem Monitoring bestätigten die Planung im Wesentlichen, belegen die Funktion jedoch mit wesentlich belastbareren Zahlen.

Somit kann festgestellt werden, dass nach der Projektlaufzeit, die nur einen kurzen Zeitraum am Anfang der hoffentlich langen Lebensdauer der neuen Baumstandorte umfasst, bereits viele Erkenntnisse im Sinne der Projektidee gewonnen wurden. Die Bäume werden nun langsam in die Etablierungsphase übergehen, in der sie das Schwammstadtsubstrat mit ihren Wurzeln erschließen. Auch diese Phase wurde bisher noch nicht im Realmaßstab wissenschaftlich begleitet, eine Weiterführung der Messungen soll vielversprechende Einblicke liefern. Aufbauende Projekte wurden bereits konzeptioniert und sollen diese Weiterführung sicherstellen. Ist dies gegeben, kann das Mess-Setup modifiziert werden, um die in der jeweiligen Phase relevantesten Teilfragen adäquat zu beantworten.

## 2 Abstract

The project titled "MUFUWU Stadtbaum – Development and Evaluation of Multifunctional Urban Tree Locations in Existing Streets" aims to achieve a measurable, sustainable, and long-term enhancement of living conditions for urban trees in existing street spaces within densely built urban districts. This objective is anchored in the Sponge City for Trees system, increasingly gaining recognition in Austria. The system, fusing the benefits of urban trees with the water retention capabilities of an expansive underground catchment basin, was implemented on Leonhardgürtel street in Graz, accompanied by a comprehensive monitoring facility. On one hand, this novel system holds promise for fostering more robust and enduring tree growth, thereby facilitating numerous ecosystem services in urban areas. On the other hand, it piques interest in urban water management as a decentralized rainwater management measure, constituting a form of blue-green infrastructure.

Despite its introduction in Austria six years ago, pilot sites with scientific measurement equipment and data-driven analyses of the system's processes and errors are scarce. Moreover, prior to the project's initiation, the system had limited implementation in existing cities, resulting in a dearth of experience. The research project aims to address these knowledge gaps, focusing on dimensions like water retention during heavy rainfall, water storage in dry periods, tree vitality across different life phases, and assessing the relevance of various components in the overall system or hard criteria for the functionality of the construction method in view of the many degrees of freedom in planning and execution.

The research project involved redesigning parking areas on both sides of a section on Leonhardgürtel using the sponge city system. New plantings featured three different tree species, while root spaces for four existing chestnuts were cleared, rehabilitated with sponge city substrate, and tree substrate. Soil hydrological investigations of various fine substrate mixtures were conducted, leading to the selection and implementation of a chosen mixture. Noteworthy was the installation of a "first flush" and cleaner downstream surface water differentiation through an "outflow box," a unique aspect not seen in other projects. Direct discharge of roof water from neighbouring buildings into the sponge city system was also a distinctive feature.

In addition to the unique planning and execution of the sponge city system, emphasis should be placed on the comprehensive monitoring system. This system, installed in consultation with project executors, aims to observe root propagation, tree development, and water dynamics. Sensors measure soil water balance, sap flow, stem growth, and inflows/outflows. Plexiglas tubes for root detection and perforated vertical tubes for quantifying sponge city substrate filling were installed. With the aim of observing a manageable section of the entire site better and at a higher resolution, the southern area of the Leonhardgürtel West with four trees was defined as the main measuring area (approx. 5 x 32 m), in which a larger number of sensors were used.

After two years of observation, signs of rooting into the sponge city substrate were evident in new plantings. Data underscored the importance of nursery care in the initial years for optimal growth and drought stress prevention. Stem growth rates varied among new plantings, influenced by factors like the volume of surrounding tree substrate. Existing trees demonstrated resilience after root clearing and rehabilitation, tapping into the improved root space.

Roof water is generally a valuable resource for direct discharge into the sponge city, accumulates very quickly and follows the rainfall hydrograph and has the potential to provide water frequently and in sufficient quantity to replenish the soil water reservoir in the sponge city substrate, even during smaller rainfall events, if a well-designed distribution system is used. Challenges included limited water level increases in vegetated filtration basins during precipitation and varied catchment area sizes due to slope conditions. Water distribution issues in the Leonhardgürtel system and full-drainage pipe installation further complicated matters.

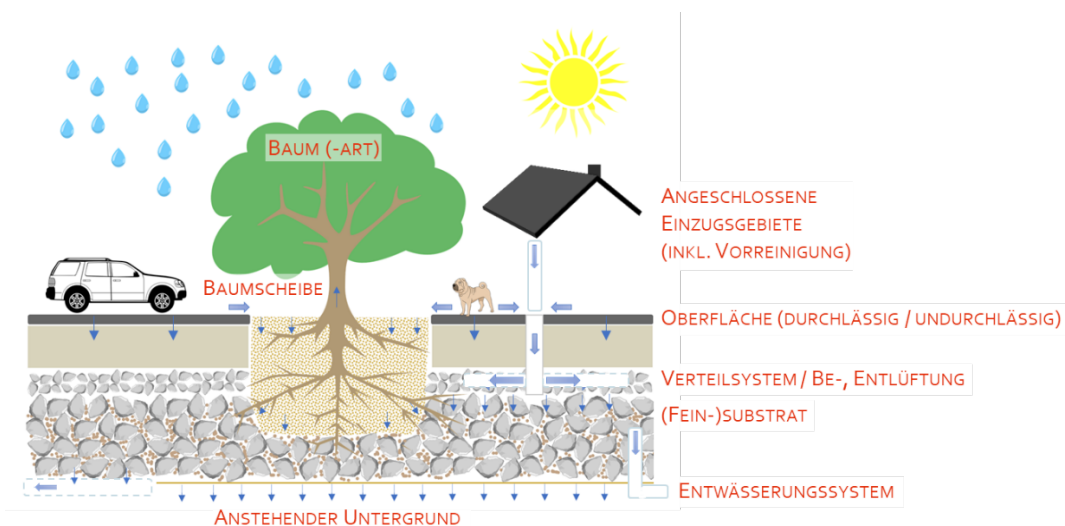
From the synthesis of all these observations, valuable conclusions can be drawn as to which elements of the complex overall system are particularly relevant and in which phase of its life cycle they are significantly influenced. Above all, a reliable distribution system, which distributes the rainwater towards the tree roots, is a critical component of the sponge city system for trees. In connection with this is the coordination of the connected catchment area in terms of water quantity and quality with the capacities of the built system. The latter could only be roughly estimated due to a lack of empirical values; the measured values from the monitoring essentially confirmed the planning but provide much more reliable figures for the function.

It can therefore be stated that after the project duration, which only covers a short period at the beginning of the hopefully long life of the new tree locations, a lot of knowledge has already been gained in terms of the project idea. The trees will now slowly move into the establishment phase, in which they grow their roots in the sponge city substrate. This phase has also not yet been scientifically monitored on a real scale, and further measurements should provide promising insights. Projects have already been conceptualized to ensure this continuation. Once this has been achieved, the measurement setup can be modified in order to adequately answer the most relevant sub-questions in the respective phase.

### 3 Ausgangslage

Bei dem Projekt MUFUWU Stadtbaum (=MULTIFunktionaler WURzelraum) handelt es sich um ein Planungs- und Umsetzungsprojekt, bei dem der Aspekt der lokalen Wasserwirtschaft eine wesentliche Rolle spielt. Es hat die Implementierung des Systems Schwammstadt für Bäume an Realstandorten in der Bestandsstadt mit wissenschaftlicher Begleitung zum Ziel. Zur Klarstellung des Begriffs „Schwammstadt für Bäume“ und Erläuterung des Systems wird an dieser Stelle auf einen Beitrag von Grimm et al. (2022) in der Zeitschrift Stadt+Grün und einen Artikel von Zeiser et al. (2023) im ÖWAV-Magazin verwiesen. Eine skizzenhafte Darstellung des Systems und notwendiger bzw. möglicher Komponenten zeigt die Abbildung 1.

Abbildung 1: Skizze zur Veranschaulichung des Systems Schwammstadt für Bäume und notwendiger, sowie möglicher Komponenten



Das Projekt wurde formal und planerisch vom Konsortium bestehend aus 3:0 Landschaftsarchitektur (Planungsbüro), dem Verein Land schafft Wasser (wissenschaftlicher Begleiter für das Monitoring) und der HBLFA für Gartenbau und Österreichische Bundesgärten in Kooperation aufgesetzt und bei der FFG im Rahmen des Förderungsprogramms Stadt der Zukunft, 6. Ausschreibung eingereicht. Motivation und Beweggründe waren die ersten Erfahrungen und Versuche mit dem Planungs- und Bauprinzip „Schwammstadt für Bäume“ auf Basis des skandinavischen Modells – vielerorts auch als „Stockholm-System“ bezeichnet - und das Fehlen von validen Daten grundsätzlich bzw. Erfahrungen im Umgang mit dem System in Bestandsstädten.

Die Bäume in unseren besiedelten und dicht verbauten Gemeinden und Städten bzw. im direkten Umfeld von Versiegelungen haben mit einer zunehmenden Anzahl und Intensität an Stressfaktoren zu kämpfen, worunter die Vitalität und Langlebigkeit stark leiden (Czaja, Kolton und Muras, 2020). Die durchschnittliche Lebenserwartung eines Stadtbaumes in österreichischen Städten bewegt sich erfahrungsgemäß zwischen 20 und 30 Jahren nach der Pflanzung. Das bedeutet, dass die Umwelt- und Standortbedingungen unseren Bäumen nicht die Möglichkeit bieten, ein Alter zu erreichen, indem sie ihre wertvollen Ökodienstleistungen ausüben und den dringend benötigten Schatten für uns und unsere Siedlungsräume zur Verfügung stellen können.

Leider sind Bäume aufgrund der schlechter werdenden Lebensbedingungen (längere Trocken- und Hitzeperioden infolge der Klimaerhitzung) oft schon nach wenigen Jahrzehnten in schlechtem Zustand. So werden sie auch oft gefällt, weil sich die Gemeinden einem potentiellen Risiko der Gefährdung und damit der Haftungsfrage gegenübersehen. Um diese unwirtschaftlichen Situationen, vor allem aber auch ökonomisch, ökologisch, wie mikroklimatologisch katastrophalen Bedingungen an der Wurzel zu packen und ihnen zu begegnen, braucht es neue Herangehensweisen im Umgang mit Bäumen in Österreich.

Zusätzlich zur problematischen Situation der Bäume in Siedlungsräumen war nach Bekanntwerden des innovativen Unterbauansatzes aus Schweden rasch klar, dass dies auch für die Siedlungswasserwirtschaft von Interesse sein kann. Vor dem Beginn des gegenständlichen MUFUWU-Projekts im Jahr 2020 war die Idee der Transformation der siedlungswasserwirtschaftlichen Grundidee vom schnellen Abfluss hin zum Rückhalt in der Stadt kombiniert mit grün-blauen Infrastrukturmaßnahmen bereits aktuell. Die Kombination von Wurzelraum und Retentionsraum, in den eine direkte schwallartige Wassereinleitung möglich ist und den man unter Nebenverkehrsflächen problemlos umsetzen kann, war allerdings neu. Die interdisziplinäre Herangehensweise an das Thema Schwammstadt für Bäume, die sowohl Landschaftsarchitekten, Siedlungswasserwirtschaftler und Zuständige für den Verkehrsraum einschließt, steigert das Potenzial des Systems einerseits und bringt andererseits Interessenskonflikte und mehr Komplexität in der Systemausführung mit sich.

Die ursprüngliche Einreichung aus dem Jahr 2019 zielte auf eine Umsetzung in Wien ab, die sich allerdings im angestrebten Zeitrahmen als organisatorisch nicht durchführbar herausstellte. Alternativ konnte im Frühjahr 2020 ein geeigneter Standort in Graz gefunden werden. Die Stadt Graz, namentlich die Abteilung Grünraum und Gewässer, zeigte sich vom angewandten Mehrwert dieses planerischen F&E Projekts überzeugt und nahm es in ihr Maßnahmenprogramm „Grazer Stadtbaum“ auf, um die bauliche Umsetzung dieses F&E Projekts zu ermöglichen. Auf Grund dieser Standortsuche verschob sich der Projektstart um rund 1,5 Jahre auf September 2020. Die Herausforderung blieb trotz Standortwechsels dieselbe: die Etablierung eines innovativen Systems zur urbanen Untergrundgestaltung, das eine verbesserte und langjährigere Stadtbaumvitalität mit der erweiterten Funktionalität der Retention von Niederschlägen kombiniert. Die erzielten Ergebnisse und daraus gewonnenen Erkenntnisse sind in der Folge detailliert beschrieben.

Internationale Umsetzungen des gegenständlichen Bauprinzips Schwammstadt für Bäume waren zu Beginn des Projekts nur aus Schweden bekannt (bis auf eine paar Pilotprojekte in Österreich, die seit dem Herbst 2017 nach dieser Planungs- und Baumethode zur Umsetzung gelangten). In Stockholm wurde das Grundprinzip entwickelt und vor über 20 Jahren erstmals angewandt. Datenbasierte Untersuchungen der Funktionsweise fanden hierbei laut Kenntnis des Projektkonsortiums nicht statt. Im Laufe der dreijährigen Projektdauer begannen aber auch zunehmend andere europäische Länder das „Stockholm-System“ zu übernehmen und zum Teil adaptiert auszuprobieren (z. B. Ungarn, Spanien, Norwegen, Schweiz). In Schweden, speziell in Stockholm und Uppsala, war und ist man überzeugt davon, dass das Bauprinzip des erweiterten Wurzelraums mit lastabtragendem Stützkorn vitaleres, größeres Stadtgrün ermöglicht. Dort existieren auch bereits Bäume, die seit über 20 Jahren in solchen Systemen gedeihen und wachsen. Die Übernahme und Anwendung des Systems aus Stockholm mit identen Planungs- und Ausführungsprinzipien macht auf Grund andersartiger klimatischer, hydrologischer, geologischer, materieller, verwaltungstechnischer und vor allem auch rechtlicher Gegebenheiten in Österreich wenig Sinn bzw. ist auch nicht durchführbar. Aus diesen

Gründen war und ist es notwendig, das Prinzip bzw. die Planungs- und Bemessungsgrundsätze die diesem zu Grund liegen sollen, anzupassen und für unsere Gegebenheiten zu optimieren. Für einen solchen Optimierungsprozess sind Daten, Erfahrungen, Fehleranalysen, Versuche und eine differenzierte Betrachtung aus vielerlei Blickwinkeln und Stakeholder-übergreifend notwendig.

Vor dem Start des Projekts MUFUWU Stadtbaum lagen im Projektkonsortium zum einen erste Erfahrungen zu einzelnen Projektplanungen und -umsetzungen in Stadterweiterungsgebieten bzw. bei Neubauprojekten oder auf Plätzen vor. Andererseits gab es aus wissenschaftlicher Sicht bereits Daten der Baum-Lysimeteranlage für die erste Vegetationsperiode (Projekt im Auftrag der Stadt Wien, Auftragnehmer: Verein Land schafft Wasser, Bundesamt für Wasserwirtschaft, HBLFA für Gartenbau und Österreichische Bundesgärten), sowie erste Erfahrungen und Werte aus der bodenhydrologischen Laboruntersuchung des Substrats (in Kooperation mit dem Bundesamt für Wasserwirtschaft). Zusätzlich hat(te) der Verein Land schafft Wasser seit Herbst 2019 ein Monitoringprojekt an einer Landesstraße im Süden der Stadt Graz in Betreuung (Auftrag durch das Land Steiermark). Dieses vorhandene Wissen, das zum Teil erst durch die Verzögerung des Projektstarts von MUFUWU Stadtbaum erlangt wurde, floss in die Planung und Umsetzung des gegenständlichen Projekts ein. Zusätzlich unterschied sich das Projekt MUFUWU von den bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen maßgeblich durch einige zentrale Faktoren, wie z.B. den Standort (Bestands-Wohnstraße), die Komplexität und Vielschichtigkeit der Untersuchungen, die Art der Wassereinleitung und Verteilung des Wassers, die Gestaltung der Oberflächen und des Schichtaufbaus, die Bestandsbaumsanierung (Einbau eines Schwammstadtkörpers bei Bestandsbäumen), die enge Zusammenarbeit mit den Ausführenden und späteren Erhaltern, etc.

# 4 Projektinhalt

## 4.1. Planung des Standortes / Vorgehensweise

Bei den beiden Projektstandorten des F&E Projektes MUFUWU Stadtbaum handelt es sich um einen Bereich der westlichen Straßenseite des Leonhardgürtels sowie einen Bereich der östlichen Straßenseite mit einer Bestandskastanienbaumreihe. Der Leonhardgürtel selbst ist eine Nord-Süd-verlaufende Sackgasse im östlichen Stadtteil St. Leonhard in Graz. Mit der Auswahl des Leonhardgürtels im Stadtteil St. Leonhard wurden zwei unterschiedliche Standorttypen (gänzliche Neugestaltung mit neu gepflanzten Jungbäumen und Sanierung einer Bestandsbaumreihe) in einer Straße realisierbar. Diese Situation bot für das gesamte organisatorisch-administrative Vorgehen sowie für die späteren Bau- und Monitoringarbeiten gute und vereinfachende Grundbedingungen.

Der westliche Standort im Leonhardgürtel weist die nahezu „klassische“ Situation einer Bestandsstraße in einem Wohngebiet auf: Parkierende Pkws in Längs- und Querparkorientierung in unmittelbarer Nachbarschaft zur angrenzenden Wohnbebauung (Zeilen- und geschlossene mehrgeschossige Gebäude aus den 60er und 70er Jahren des 20. Jahrhunderts), ohne Bestandsbäume und nur teilweise mit ausgebauten Gehsteigen. Das optimale Setting, um die räumliche Transformation unter der Berücksichtigung der Integration von grün-blauer Infrastruktur durch die Pflanzung von Bäumen nach dem Schwammstadtprinzip durchzuführen.

Der östliche Straßenabschnitt in derselben Straße weist hingegen räumlich und funktional eine etwas andere Situation auf. Das Schulgebäude der Ursulinen als viergeschossiges gründerzeitliches Gebäude aus dem Jahr 1900 rückt von den Grundgrenzen zugunsten eines umgebenden Vorgartens ab und wird am Leonhardgürtel von einer Kastanienbaumreihe begleitet, die zum Teil bis zu 60 Jahre alt ist (im Baumkataster der Stadt Graz sind die Bäume tw. ohne Altersangabe angeführt, weshalb das Alter fachmännisch eingeschätzt wurde). Auf Wunsch der Stadt Graz mussten ein paar Bäume aus der Bestandssituation aus Haftungsgründen entfernt werden. Trotzdem war die räumliche Situation und die Möglichkeit im Umgang mit Bestandsbäumen bei der Implementierung des Schwammstadtprinzips gegeben, wie im ursprünglichen Antrag die Situation im 15. Wiener Gemeindebezirk, in der Pelzgasse, es vorgesehen hätte.

Der Leonhardgürtel West wurde in Form von zwei voneinander baulich getrennten Schwammstadtkörpern und der Pflanzung von insgesamt sieben Jungbäumen – drei im Nordbereich und vier im Südbereich – umgeplant und gestaltet. Beide Schwammstadtsubstratkörper wurden als eingeschlammtes System mit einer Tiefe von 60 cm realisiert. Der nördliche Teil nimmt eine Fläche von rund 5 x 19 m ein, der südliche Teil erstreckt sich über ca. 32 x 5 m. Eine Verbindung der beiden Abschnitte wird durch das durchgängige Verteilrohr realisiert, das überschüssiges Wasser aus dem nördlichen Teil in den südlichen Teil weiterleitet. Abseits von offenen Baumscheiben und Tiefbeeten ist die Oberfläche gänzlich als Parkplatz ausgeführt.

Der Standort Leonhardgürtel Ost hat eine Länge von ca. 56 m und eine Breite von ca. 4,70 m. Auf diesem Abschnitt befinden sich vier Bestandsbäume, deren Wurzelraum zum einen zu einem großen Teil mittels Luftdrucklanze und Saugbagger freigelegt und anschließend mit Hilfe von vorgemischtem Schwammstadtsubstrat saniert wurde und zum anderen vor allem eine Erweiterung durch das



Anlegen eines durchgängigen Schwammstadtkörpers erfahren hat. Weiters wurden drei Neupflanzungen vorgesehen, wobei einer dieser drei Bäume als „Nullbaum“, also ohne Schwammstadtsubstrat rund um die Baumscheibe, gepflanzt wurde. Der Standort wurde als vorgemischtes Schwammstadtsystem geplant und ausgeführt. Die Tiefe und Dimensionen der sanierten Wurzelräume im direkten Baumumfeld konnten im Vorfeld auf Grund mangelnder Kenntnis über das ausgebildete Wurzelsystem der Bestandsbäume nicht festgelegt werden. Hier war Flexibilität im Zuge der Ausführung notwendig.

Durch den Wechsel des Standorts geriet auch die Streusalzthematik aus dem Fokus. Während der Fragestellung des Umgangs mit streusalzbelastetem Oberflächenwasser hinsichtlich der Zufuhr zum Wurzelraum in Wien viel Aufmerksamkeit geschenkt wird, wurde von Seiten der Stadt Graz angemerkt, dass dies in Graz nicht im Fokus steht und beim Forschungsprojekt MUFUWU im Leonhardgürtel auch keine Hauptrolle spielen sollte. Im Zuge der Erarbeitung von Strategien zur gesonderten Behandlung des ersten Spülstoßes (siehe nächste Absätze) und möglichen Einlaufschachtkonstellationen für den Zulauf zum Tiefbeet wurde auch eine Variante mit einem manuellen Schieber erarbeitet und eingebaut. Bei dieser Variante hat der Einlaufschacht auch einen Anschluss an den Kanal, der manuell geöffnet (Winterbetrieb) oder geschlossen (Sommerbetrieb) werden kann. Hierbei standen nicht die Quantifizierung und wissenschaftliche Auswertung dieser manuellen Variante im Vordergrund, sondern vielmehr die Testung des praktischen Einsatzes und das Aufzeigen dieser Möglichkeit für alle beteiligten Stakeholder.

In beiden Testgebieten konnte der Umgang mit Oberflächenwässern verschiedener Verschmutzungskategorien, nach dem Regelblatt 45 der ÖWAV (2015), in Kombination mit dem Schwammstadtprinzip eingeplant werden. Diese wurden auf verschiedene Arten gesammelt, gegebenenfalls gereinigt, ins System eingeleitet und verteilt. Das Gehsteigwasser wird in einer gepflasterten Abflusrinne (dreireihig, gebundene Bauweise mit einseitigem Gefälle) gesammelt und entlang des Gefälles der Straße Richtung Südost in die nächste Baumscheibe oder in einen Einlaufschacht mit direktem Anschluss an das Verteilrohr oberhalb des Schwammstadtsubstrats eingeleitet. Dachwasser vom angrenzenden Wohnhaus an der Westseite wird in einen Sammelschacht, an den das Verteilrohr Richtung Süden anschließt, eingeleitet. Straßenwasser wird in die sechs Tiefbeete (=Bodenfilterbecken; drei Leonhardgürtel Ost, drei Leonhardgürtel West) eingeleitet und durch diese versickernd dem Schwammstadtsubstrat zugeführt. Bei einem erhöhten Zufluss an Straßenwasser zu den Tiefbeeten wird ein Teil des Wassers auch ohne Bodenpassage direkt den Verteilrohren zugeführt (First-Flush-Dimensionierung siehe nächster Absatz). Ergänzend ist beinahe die gesamte Oberfläche der neu gestalteten Bereiche durchlässig ausgeführt. Das auftreffende Niederschlagswasser versickert also in das darunterliegende Schwammstadtsubstrat.

In Ermangelung von F3-Wässern (Art der Herkunftsfläche: z. B. Fahrflächen mit einer JDTV von 500 bis 15.000 Kfz/24h) wurde ein theoretischer Umgang mit F3-Wässern unter Anwendung einer First-Flush-Differenzierung geplant und umgesetzt. Ein erster Spülstoß des Straßenwassers im Leonhardgürtel sollte in den geplanten Tiefbeeten Platz finden und auf diese Weise durch das Bodenfiltersubstrat gereinigt dem Schwammstadtkörper zugeführt werden. Straßenwasser, das zu den Tiefbeeten zufließt, aber über die Kapazität der Tiefbeete hinausgeht, soll in einer zwischen Einlaufschacht und Tiefbeet zwischengeschalteten und eigens entworfenen „Auslaufbox“ direkt in das angeschlossene Verteilrohr abgeleitet werden. Die „Auslaufbox“ beinhaltet einen integrierten Überlauf, der ab einem gewissen Wasserstand im Tiefbeet überströmt wird und dieses überströmende Wasser direkt ins Verteilrohr leitet. Gleichzeitig wird über diese Box auch das Wasser

ins Tiefbeet zugeleitet, als Zwischenstück zwischen Einlaufschacht und Tiefbeet. Dies soll zu einer Art „Kurzschluss“ von später zufließendem Wasser über den Überlauf führen, und Wasser, das sich bereits im Tiefbeet befindet, in diesem halten und eine reinigende Versickerung durch den Bodenfilter sicherstellen. Diese Herangehensweise bietet auch den Vorteil, dass die Bodenfilterbecken kleiner dimensioniert werden können, in einer Bestandsstraße leichter Platz finden und zu einem geringeren Interessenskonflikt bezüglich der Verwendung wertvoller städtischer Oberflächen führen.

Dieser Tiefbeet-Planung und First-Flush-Differenzierung mussten auf Grund einer fehlenden normativen Basis und Definition basierend auf vorhandener Literatur Annahmen zu Grunde gelegt werden. Zum Zeitpunkt der Berechnungen war kein wissenschaftlicher Konsens hinsichtlich der Definition und der Stärke des Auftretens von First-Flush zu erkennen. Häufig fand sich die Angabe einer definierten Niederschlagsmenge (mm) oder eines bestimmten Anteils des gesamten Abflussvolumens (%), das als erster Spülstoß der Reinigung zugeführt werden sollte. Oft verwendete Grundlagenarbeiten stammen von Field & Gardner (1978) bzw. Bertrand-Krajewski et al. (1998). Hierbei gilt es zu beachten, dass das Auftreten und das Ausmaß des First-Flush-Effektes von einer Vielzahl an Parametern abhängen. Es werden neben der Größe des Einzugsgebietes, auch die Oberflächenbeschaffenheit, die Dauer der Akkumulationszeit/Trockenphase vor einem Niederschlagsereignis, das Gefälle des Einzugsgebietes, der untersuchte Parameter, sowie die Charakteristika des Niederschlagsereignisses genannt. Bei kleineren Einzugsgebieten beispielsweise, ist von einem stärkeren First-Flush-Effekt auszugehen (Lutz & Boller, 2019). Lutz und Boller (2019) empfehlen in ihrer Studie eine Auslegung auf 12 mm Niederschlagsabfluss – allerdings bei einem wesentlich größeren Einzugsgebiet von ca. 2700 m<sup>2</sup>.

Für die Tiefbeete im Leonhardgürtel Ost und West wurde die Herangehensweise gewählt, dass zuerst eine theoretische Positionierung der Tiefbeete mit einer ungefähren Größe von 4 x 2 m nach gestalterischen Aspekten mit dem Ziel einer gleichmäßigen Verteilung des gesamten Straßeneinzugsgebiets auf diese Tiefbeete vorgenommen wurde. Die Straßenoberfläche wurde baulich nicht verändert, sodass sich durch die vorhandene Gefällesituation und die Ausführung als Dachprofil die angeschlossenen Einzugsgebietsflächen ergaben, welche Größen von rund 80 bis 130 m<sup>2</sup> aufwiesen. Die Tiefen der potenziellen Wasserstände in den Tiefbeeten bis zur Überlaufkante in das Verteilrohr war auf Grund des schichtweisen Aufbaus und der Gefällesituation entlang der Straße in einem gewissen Rahmen vorgegeben, konnte aber auf Basis der Berechnungen geringfügig angepasst werden. Für diese Konstellationen wurden für die Dauerstufen 5 Minuten bis 24 Stunden der 5-jährlichen Bemessungsniederschläge auf Basis eines angenommenen Blockregens das Speicher- und Überlaufverhalten auf Basis einer dynamischen „bucket-type“ Modellierung mit an die Dauerstufe angepassten zeitlichen Intervallen berechnet. Berechnet wurden die Dauer bis zum Anspringen des Überlaufs in Minuten und Millimeter Niederschlag (Fließwege und -dauern wurden auf Grund der kleinen Einzugsgebiete vernachlässigt), der Anteil des gefallenen Gesamtniederschlags bis zum Anspringen des Überlaufs und der gesamte Abflussanteil, der in den Tiefbeeten versickert. Die Ergebnisse wurden mit dem Referat für Wasserrecht der Stadt Graz diskutiert. Auf Grund der berechneten Werte und nur theoretisch als F3-Kategorie eingestuften Straßenwässer ergab sich daraus keine planerische Veränderung der Tiefbeete.

Als Wasserverteilelemente wurden nach der zum Planungszeitpunkt üblichen Vorgehensweise Vollsickerrohre (DN150) gewählt, die linear in Gefällrichtung verlaufend, parallel zur Straße in der Belüftungsschicht oberhalb des Schwammstadtsubstrats verlegt wurden. Jeweils ein Vollsickerrohr

wurde für den Leonhardgürtel Ost und West in südöstliche Richtung verlaufend, am westlichen Rand des jeweiligen Schwammstadtkörpers vorgesehen. In dieses „Haupt“-Verteilrohr wurden sowohl die Überläufe der Tiefbeet-Auslaufboxen, als auch die Einlaufschächte für das Gehsteigwasser und der Dachwasserschacht angeschlossen.

Zusätzlich gab es Aspekte, die aufgrund der Wünsche und Vorstellungen der verschiedenen involvierten Abteilungen der Stadt bzw. deren Stakeholder berücksichtigt und in die Planung aufgenommen wurden. Hierzu gehört der Umgang mit den verschiedensten involvierten Leitungserhaltern der Stadt und des Landes Steiermark ebenso, wie der Wunsch zur Integration eines Dränrohres an der Unterkante des Schwammstadtkörpers oder der Entfall der Rasenliner als befestigte Oberfläche für die neu geschaffenen Pkw-Stellflächen.

Auf Grund der vielfältigen Oberflächengestaltung und -nutzung resultierten aus der Planung auch verschiedene Gestaltungsausprägungen der direkten Baumumgebung, also der Baumscheiben und deren Größe und Begrenzung. Für manche Bäume war eine geplante Pflanzung in einer mehreren m<sup>2</sup> großen, mit Stauden und Gräsern bepflanzten offenen Baumscheibe möglich, andere Baumstandorte waren mittig in einer Parkfläche mit dem Ziel der Parkflächenmaximierung und daraus resultierenden Baumscheibenminimierung vorgesehen. Bei einem Baumstandort kam für die räumliche Abgrenzung zwischen Parkplatz-Tragschichten und Baumsubstrat ein Betonkranz zum Einsatz, ähnlich wie dieser in Schweden häufig verwendet wird (Embrén und Alvem, 2017). Bei den meisten Baumstandorten wurde die räumliche Abgrenzung des Baumsubstrats zur Umgebung durch Randsteine und deren betonierter Bettung vollzogen. Die Volumina an Baumsubstrat, die je Neupflanzung zur Verfügung gestellt werden konnten, betragen zwischen 0,8 und ca. 10 m<sup>3</sup>. Diese Vielfalt an Baumstandorten und Gestaltung der direkten Pflanzballenumgebung findet Eingang in die Interpretation der Beobachtungen und Messwerte (5.2.1).

## 4.2. Baumartenwahl

Für die im westlichen Teil des Leonhardgürtels gelegenen, neuen Baumstandorte wurde bewusst auf Arten und Gattungen aus aktuellen Forschungsprojekten in Mitteleuropa Bezug genommen, die sich mit der Klimafitness auseinandersetzen und deshalb als „Zukunftsbaumarten“ bezeichnet werden (Böll et al., 2018). Jene Baumarten, die im Westen zur Neupflanzung gelangten, waren der Japanische Schnurbaum (*Styphnolobium japonicum*) und der Bosnische Ahorn (*Acer opalus*).

Der Japanische Schnurbaum, mit seiner Fähigkeit als Leguminose den N-Gehalt der Luft zu binden und dadurch eine starke Wüchsigkeit auszubilden, ist ein bekannter Stadtbaum der letzten Jahrzehnte. Seine Verwendung als Straßenbaum wurde jahrelang nicht forciert, da die Sichtweise der Verwaltung - im Hinblick auf die Kronenausbildung - gänzlich andere Prioritäten forcierte. Der rasche Wuchs dieser Baumart, der letztendlich in einer breiten und hohen Baumkrone mündet und durch das gefiederte Blatt zu einem angenehm lichten Schattenwurf beiträgt, führt dazu, diese Baumart als Zukunftsbaumart in unseren Städten anzusprechen. Die zu erwartende Gesamthöhe beträgt rund 25 m (bis 30 m), wobei die breite und runde Baumkrone auch einen großen Durchmesser aufweisen kann.

Ebenso ist der Bosnische Ahorn, als Vertreter des illyrischen bis mediterranen Klimagebietes, von der Untersteiermark über Slawonien und Bosnien bis weit in den Mittelmeerraum und nach Nordafrika, ein Hoffnungsträger, um die stark in Mitleidenschaft gezogenen heimischen Acer-Arten zu ersetzen.

Der *Acer opalus* benötigt in der Jugendentwicklung etwas mehr Zeit um Wachsen und Gedeihen, besticht aber dann durch seine breite Krone bei einer Höhe von ca. 15-18 m und den bekannten handförmig gelappten Ahornblättern, die sich im Herbst auffallend orange verfärben können, weshalb er in der Steiermark auch als „Schilcherhorn“ bezeichnet wird.

Auf der östlichen Seite, also dort wo wir in der Bestandsbaumreihe aus der Weißen Roßkastanie (*Aesculus hippocastanum*) und der Roten Rosskastanie (*Aesculus x carnea*) einen reinen *Aesculus*-Bestand vorgefunden haben, kam die neue Sorte der Roten Roßkastanie (*Aesculus x carnea* ‚Plantierensis‘ ein Hybrid aus *A. hippocastanum* und *A. x carnea*), der im Hinblick auf klimatische Veränderungen bei genügend Feuchtigkeit im Boden ein sehr gutes Auskommen bescheinigt wird, zur Pflanzung. Ob sich dies an den Schwammstadtstandorten im Bereich des Projekts MUFUWU bewahrheitet, wird die Zukunft zeigen. Ziel war es hier, den geschlossenen gestalterischen Eindruck der alten Kastanienbaumreihe möglichst zu erhalten und zu unterstützen, und gerade auch durch die passende Baumethode des Schwammstadtprinzips zu zeigen, dass die geeigneten Maßnahmen im Untergrund einen wesentlichen Beitrag für den Erhalt von Altbäumen darstellen.

Die zu erwartende Gesamthöhe dieser französischen Kastaniensorte beträgt etwa 15 m (bis 20 m), wobei die Kronenbreite hier nur wenig darunter zu liegen kommt.

### 4.3. Testung von Substraten

Im Zuge der Planungen des Projektstandortes wurden auch Testungen von verschiedenen Feinsubstratmischungen für die Herstellung des Schwammstadtsubstrats durchgeführt. Hierfür wurden basierend auf Erfahrungen aus vergangenen Substratuntersuchungen potenzielle Komponenten möglichst nahegelegener Bezugsquellen ausgewählt und angeschafft. Im Labor des Bundesamts für Wasserwirtschaft wurden bodenphysikalische Messungen mit Mischungsreihen dieser potenziellen Komponenten durchgeführt und basierend auf bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Zielgrößen die beste Mischung ausgewählt. Die FLL-Richtlinie (2010) liefert hierfür maßgebliche Vorgaben aus vegetationsstechnischer Sicht.

Als Rohkomponenten wurden verschiedene Sandkörnungen, Bruchkorn, Kompost, Pflanzenkohle und Murschwemm-Material bezogen und getestet. Für die mineralischen Materialien wurden die Korngrößenverteilungen mittels Sieb- und Schlämmverfahren bestimmt, sowie der TOC-Gehalt und der Anteil an  $\text{CaCO}_3$  ermittelt. Anschließend wurden auf Basis der Korngrößenverteilungen und der vorliegenden Erfahrungen geeignete Mischungsverhältnisse festgelegt und diese mittels des am BAW-IKT entwickelten Schüttversuchs für die Untersuchung des reinen Feinsubstrats analysiert (Rath, 2023). Bei den beprobten Mischungen wurde auf die Beimengung von Pflanzenkohle als wertvoller Zusatzstoff für die Verbesserung des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers und als Dekarbonisierungsmöglichkeit besonders Wert gelegt. Die Laboranalyse lieferte Werte für die gesättigte Wasserdurchlässigkeit, das Gesamtporenvolumen, die Feldkapazität, die Wasserkapazität, die Luftkapazität, den permanenten Welkepunkt und die Trockenrohichte und ermöglichte einen Vergleich der Feinsubstrate untereinander. Es wurde eine Mischung für die Einschlammvariante ausgewählt, die sowohl gute Werte für die Durchlässigkeit und Wasserspeicherfähigkeit erzielte als auch einen vergleichsweise höheren Anteil an Pflanzenkohle enthielt. Ein weiteres Argument, das in den Entscheidungsprozess eingeflossen ist, war die Orientierung an Mischungsverhältnissen, wie sie in bereits etablierten Projektstandorten eingebaut waren. Die gewählte Mischung wurde anschließend in einem sogenannten „Schlämmversuch“ getestet, wobei im Labormaßstab das

gewählte Feinsubstrat in einen Grobschlag eingeschlämmt und anschließend bodenhydrologisch untersucht wurde (Rath, 2023).

Die Mischung für das vorgemischte Schwammstadtsubstrat wurde auf Basis von Erfahrungen in der Lysimeter-Forschungseinrichtung in der HBLFA für Gartenbau und Österreichische Bundesgärten ausgewählt. Die Idee hierbei war, dass eine gute Nährstoffversorgung in einem gut durchlüfteten Wurzelraum für das Ziel der Bestandsbaumsanierung bereitgestellt werden soll. Ein weiterer Fokus lag auf der Praxistestung der Verwendung eines vorgemischten Substrats an sich.

Die ausgeschriebene Mischung für das einzusetzende Baumsubstrat orientierte sich an den am Bundesamt für Wasserwirtschaft vorliegenden Untersuchungen, die im Rahmen einer von der Stadt Graz im Vorfeld beauftragten Studie zur Findung einer geeigneten Baumsubstratmischung vorlagen. Hierfür wurden keine gesonderten Untersuchungen mehr durchgeführt. Im Zuge des Einbaus wurde eine Probe zur Analyse im Labor entnommen. Diese wurde mit einer Zieldichte von ca.  $1,7 \text{ g/cm}^3$  (Dichte des Baumsubstrats im Leonhardgürtel nach ca. 6 Monaten Standzeit) in einen Zylinder eingebaut und ebenfalls auf die bodenphysikalischen und -hydrologischen Zielparameter untersucht.

Für die Tiefbeete (= Bodenfilterbecken) wurde ein Bodenfiltersubstrat gemäß ÖNORM B2506-2 (ON, 2012) beschrieben.

#### **4.4. Bau der Schwammstädte**

Die engmaschige Begleitung der Umsetzung des Bauvorhabens auf beiden Seiten des Leonhardgürtels, notwendige Vorarbeiten, wie beispielsweise die Durchführung der Bodenschürfe zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit des anstehenden Untergrunds unterhalb der Schwammstadt, Bau- und Umsetzungsbesprechungen, notwendige Reaktionen und Umplanungen auf Grund von unerwarteten Vorfällen oder Änderungen der Rahmenbedingungen, wie z. B. das Auffinden eines unbekanntes Leitungspaketes, sowie die Kommunikation und Absprache mit möglichst allen Stakeholdern nahmen viel Zeit in Anspruch. Auch galt es während des Planungs- und Umsetzungsprozesses Bedenken und Zweifel fachlich begründet auszuräumen und/oder Maßnahmen vorzusehen, die befürchtete Schadensszenarien gesichert abwenden. Die Dränrohre, die in beiden Standorten an der Unterkante der Schwammstadt verlegt wurde, sind beispielsweise eine solche Kompromissmaßnahme, die seitens der Holding Graz als Straßenerhalter gewünscht war.

Mit der Vergabe der Leistung an einen Garten-Landschaftsbau (Galabau)-Unternehmer aus Graz und einen Subauftragnehmer aus dem Straßenbau sind wir für dieses Projekt – aufgrund der Wichtigkeit und Besonderheit des Schwammstadteinbaus – auch neue Wege gegangen. Normalerweise ist die gärtnerische Bau- und Pflanzleistung im Subauftrag des Straßenbaus ausgeschrieben. Das erste Baueinleitungsgespräch zur Umsetzung fand am 19.8.2021 statt, der tatsächliche Baubeginn erfolgte am 23.8.2021. Die bauliche Fertigstellung der beiden Standorte inklusive der wesentlichen Arbeiten zur Integration der Mess- und Sensortechnik für die Erfassung des Bodenwasserhaushalts erfolgte Mitte November 2021. Einzelne Messsensoren wurden basierend auf den ersten Erfahrungen im Laufe der Projektdauer ergänzt oder auch verbessert. Die Einrichtungen zur Erfassung des Saftstroms und der Stammumfänge folgten im Frühjahr 2022.

Ergänzend zur fehlerfreien Umsetzung des Unterbaus (= Schwammstadtsubstrat und darauffolgende Schichten) kommt im Zuge dieses Projektes als wesentliche Aufgabe auch die Einarbeitung des Monitoring-Equipments hinzu. Um dieses im Rahmen des Baus zügig und zeitsparend Hand in Hand

mit der Bauausführung einbauen zu können, waren Vorbereitungsmaßnahmen hinsichtlich der Planung der Sensorpositionierung, der Ausarbeitung einer geeigneten Einbaumethode, des Schutzes von Kabeln und Sensoren, sowie der Konzipierung des Verkabelungs- und Datenloggernetzwerks notwendig. Eine große Relevanz für einen möglichst reibungsfreien Ablauf kam auch der engmaschigen und detaillierten Abstimmung diesbezüglich mit den Bauausführenden zu.

Die Abstimmungen zur Leistungsvereinbarung zur Umsetzung mit den Auftragnehmern waren ein wesentlicher Bestandteil der Bauvorbereitung. Hier wurde besonderer Wert darauf gelegt, die Wichtigkeit dieses Forschungsprojektes, die sich in einer gut dokumentierten und kommunizierten Ausführung, sowie einer ständigen Einbindung der Planenden, der Qualitätsprüfenden und der Zuständigen für das Monitoring äußert, zu betonen. Auch Dokumente (wie Zeitpläne, Beschreibung der Überschneidungspunkte mit der eigentlichen Bauausführung, Einbaupläne mit dem geplanten Monitoring-Equipment), die aus Sicht der Zuständigen für das Monitoring (Verein Land schafft Wasser) für eine möglichst einwandfreie Bauausführung und Koordination notwendig schienen und zu einer verbesserten Kommunikation mit den Bauausführenden maßgeblich beitragen sollten, wurden erstellt, optimiert und mit den Kolleginnen und Kollegen abgesprochen.

Eine nahezu ständige Präsenz auf der Baustelle war notwendig - einerseits aufgrund des notwendigen sensiblen Umgangs mit den Monitoring-Einrichtungen und andererseits auf Grund der vielseitigen Oberflächengestaltung mit variierenden Elementen und der daraus resultierenden Anzahl an verschiedenen Schichtaufbauten, der stark verschiedenen Schwammstadtausführungen auf der Ost- und Westseite, der diversen unvorhergesehenen Einbauten, der Neuartigkeit des Systems für die Ausführenden, der Publicity des Projekts, die auch von Seiten des Auftraggebers angestrebt wurde und die die Involvierung vieler Stakeholder und engagierter Nachbarn nach sich zog, sowie des vorhandenen Willens aller Beteiligten möglichst viel zu lernen und auszuprobieren. Auch bei einer „normalen“ Umsetzung eines Schwammstadtprojekts sind eine intensive Baubegleitung und vor allem auch eine Schulung der Ausführenden vor der Umsetzung ratsam. Die Bauweise befindet sich noch in der Entwicklungs- und Optimierungsphase, ist normativ noch nicht verankert und in der Bauwirtschaft noch nicht Normalität.

Die Begleitung von besonderen Arbeitsschritten, wie beispielsweise die Wurzelfreilegung, die Qualitätskontrolle von Materialien (z. B. der Unterkornanteil beim Grobschlag), die Nachweise der entsprechenden Einbaudichten durch dynamische Lastplattenversuche sind als besondere Tätigkeiten im Bauablauf hervorzuheben.

Die bauliche Umsetzung hat durch die Implementierung der komplexen Monitoring-Technik zu einer längeren Bauausführung geführt, weshalb die Bauzeit des Projekts MUFUWU nicht repräsentativ für eine Bauzeit eines Schwammstadtprojekts in einer Bestandsstadt herangezogen werden kann. Ebenso sind die Errichtungskosten durch den größeren Abstimmungsbedarf, die kleinteiligere Arbeit, die intensive Einbindung vieler Stakeholder kombiniert mit der Neuartigkeit des Systems und den wesentlichen Posten der wissenschaftlichen Begleitung als nicht repräsentativ einzustufen.

## **4.5. Monitoring zur Beobachtung der Standortentwicklung**

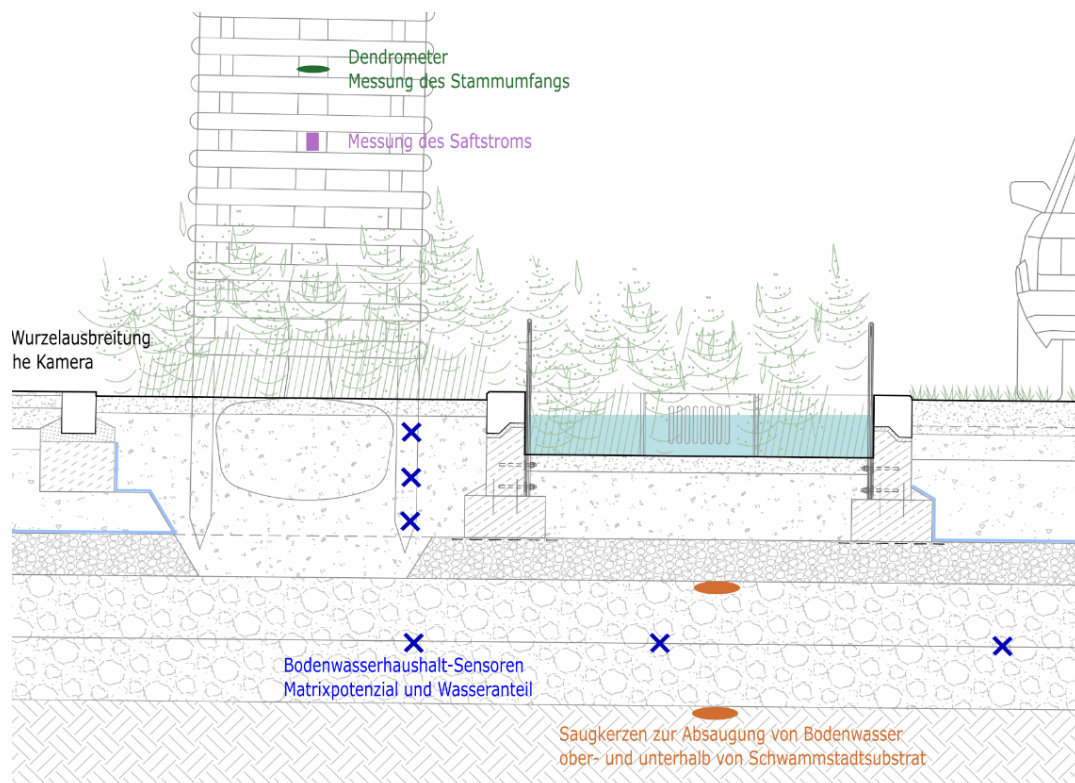
Im Zuge der Planungen wurde die Einrichtung eines Monitoringnetzwerks mitgedacht und hierfür auch zusätzliche technische und bauliche Einrichtungen vorgesehen, die für bestimmte Messungen notwendig waren. Die Hauptziele des Monitoringnetzwerks sind die Beobachtung der

Wurzelausbreitung, der Baumentwicklung, sowie der Dynamik des Zuflusses, der Verteilung, der Speicherung und des Abflusses des Wassers. Das Monitoringnetzwerk besteht aus Sensoren zur Erfassung des Bodenwasserhaushalts, des Saftstroms, des Stammzuwachses und bestimmter Zu- und Abflüsse. Weiters wurden Plexiglasrohre zur visuellen Wurzelerkundung und Standrohre für die Quantifizierung eines möglichen Einstaus des Schwammstadtsubstrats verbaut. Mit dem Ziel einen überschaubaren Abschnitt des gesamten Standorts besser und höher aufgelöst zu betrachten, wurde der Südbereich vom Leonhardgürtel West als Hauptmessbereich definiert (ca. 5 x 32 m), in dem eine größere Anzahl an Sensoren zum Einsatz kam.

Für die Untersuchung des Bodenwasserhaushalts wurden zwei Sensortypen verbaut: Wasseranteilssensoren (Teros 12, Meter Group) und Matrixpotenzialsensoren (Teros 21, Meter Group). Diese wurden in den Standorten Ost und West an unterschiedlichen Positionen in den Schwammstadtsubstraten und Baums substraten eingebaut. Der Sensoreinbau erfolgte jeweils in einem Polster aus Feinsubstrat. Saugkerzen (SK20, Meter Group) wurden als Paare lagegleich jeweils ober- und unterhalb des Schwammstadtsubstratkörpers an verschiedenen Positionen in den Standorten West und Ost eingebaut. Über diese in Summe zwölf Saugkerzen wird einmal monatlich verfügbares Bodenwasser abgesaugt und im Labor des Bundesamts für Wasserwirtschaft auf pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Chlorid, Nitrat, Nitrit, Sulfat und TOC analysiert. An insgesamt sechs Bäumen werden Saftstrommessungen (SFM-4, UGT GmbH) durchgeführt, an allen 14 Bäumen wird der Stammzuwachs erfasst (DRS26, EMS Brno). Die Positionierung der baumbezogenen Mess-Sensorik ist schematisch im Schnitt in Abbildung 2 dargestellt.

Der Zufluss vom Dachwasserschacht zum ausgewählten Hauptmessbereich wird über ein Polokalrohrstück mit eingebautem Ultraschallsensor (UM18-217126111, SICK) geführt. Dieser Abschnitt wurde vor dem Einbau am Bundesamt für Wasserwirtschaft für die Neigungswinkel 1 % und 2 % und verschiedene Durchflussraten zwischen 0,5 und 10 l/s kalibriert. Der Wasserstand im Tiefbeet des Hauptmessbereichs wird mittels Drucksensor (PTX 1830, GE) erfasst. Der Dränrohr-Ausfluss des Hauptmessbereichs wird über eine Kippwaage (KIPP100, Meter Group) geleitet. Zur Erfassung relevanter Wetterdaten direkt vor Ort wurde eine kompakte All-in-One-Wetterstation (ATMOS41, Meter Group) auf einem Metallsteher in ca. 2 m Höhe montiert. Zwei Sensoren zur Aufzeichnung des Mikroklimas in der Baumumgebung (ATMOS14, Meter Group) wurden beim Baum #36 im Hauptmessbereich installiert. Die acht Plexiglasrohre wurden an verschiedenen Positionen mit verschiedenem Oberflächenaufbau, Wasserangebot und Umgebungsgestaltung in den Standorten Ost und West positioniert. Die Standrohre befinden sich in der südlichen Parkplatzfläche des Hauptmessbereichs und wurden bisher für einzelne Flutungsversuche im Zuge eines weiterführenden Projekts der Stadt Graz herangezogen. Ein vereinfachter Übersichtsplan mit der Skizzierung der Sensorpositionierung findet sich im Anhang (9.3).

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Platzierung der Messsensoren am exemplarischen Beispiel eines Baums im Hauptmessbereich mit angrenzendem Tiefbeet (Darstellung im Schnitt)



Die Verkabelung der Mess-Sensorik wird für die beiden Standorte Leonhardgürtel Ost und West getrennt zuerst in Verteilboxen bei den einzelnen Bäumen zusammengeführt und anschließend in zwei Messkästen an Datenloggern (netDL500, OTT HydroMet) angeschlossen. Diese übertragen die Messdaten stündlich in eine Cloud.

Die Messung der Zu- und Abflüsse erforderte den Einbau von zwei zusätzlichen Schächten, in denen die Messungen erfolgen. Auf Grund der Installation von sichtbaren Sensoren an den Bäumen wurden Schutzgitter zum Abwenden von Vandalismus montiert. Der Einbau der Bodenwasserhaushalt-Sensorik, der Hand in Hand mit dem Bauverlauf der ausführenden Firmen erfolgen musste, erforderte eine enge Abstimmung, Kommunikation und Kooperation mit der Baufirma, aber auch anderen Beteiligten. Die Dendrometer und Saftstromsensoren wurden im Frühjahr 2023 nach dem ersten Messjahr neu installiert. Sowohl bei dieser Reinstallation als auch bei der Erstinstallation im Frühjahr 2022 wurden die Stammumfänge auf Installationshöhe von Saftstromsensor und Dendrometer erfasst, sowie auch die Ausrichtung des Saftstromsensors.

Das Messintervall wurde sensorabhängig gewählt. Die Saftstromsensoren und Dendrometer werden viertelstündlich abgefragt, die Bodenwasser-Sensorik, der Drucksensor, die Kippwaage, die Wetterstation und Mikroklimasensoren 5-minütlich, der Ultraschallsensor misst alle 15 Sekunden, woraus 5-minütliche Mittelwerte gebildet werden. Für den Zweck der Flutungsversuche, die im Rahmen eines ergänzenden Projekts durchgeführt wurden, wurden im März 2023 die Messintervalle der meisten Sensoren auf ein minütlich gekürzt, um ein exakteres Bild der Dynamik im Abschnitt zu bekommen.

Bei der Auswahl der Sensoren für die Erfassung der Bodenwasserdynamik flossen wesentlich die hausinternen Erfahrungen aus älteren (Schwammstadt-)Substratprojekten mit ein. Die Matrixpotenzialsensoren (Teros 21) eignen sich demnach gut für die Erkundung der fortschreitenden Wurzelentwicklung, reagieren aber bis zu einem einsetzenden Wasserentzug (bei Neupflanzungen somit je nach Positionierung erst nach Jahren) auf keinen Wassereintrag. Sie zeigen – je nach



Positionierung - folglich lange denselben Wert. Die Wasseranteilssensoren (Teros 12) reagieren hingegen rasch auf Wassereintrag und somit Veränderungen der Bodenfeuchte in ihrer direkten Umgebung. Auf Grund der Heterogenität des Substrats mit großem Stein- und Makroporenanteil kann eine Auswertung des Wasseranteils als Absolutwert nicht erfolgen; die Sensorwerte sind relativ je Sensor auswertbar. Ereignisse, die zu einem Wassereintrag in der Sensorumgebung führen, sind gut detektierbar. Bei der Wahl des Sensortyps und der gesamten Messausstattung wurde die Quantität an Sensoren für eine möglichst großflächige Abbildung der Dynamik dem Ziel der Sensorqualität (und damit auch erhöhten Kosten je Sensor) vorgereicht. Weiters ist in einer solchen Messumgebung mit Problemen zu rechnen, die eine präzise Messung maßgeblich erschweren – neben der Heterogenität der Substratumgebung und des Skelettgerüsts sind dies auch die bauwirtschaftlichen Tätigkeiten mit großem Zerstörungspotenzial für die Sensoren -, was ebenfalls gegen den Einbau von einzelnen hochpreisigen Sensoren und für den Einbau einer Vielzahl an Sensoren spricht.

Es erfolgten im Projektzeitraum in Summe drei Bonitierungen: eine Startbonitierung (03.12.2021), zwei Zuwachsbonitierungen (29.06.2022, 17.07.2023). Im Zuge dieser wurden die Triebblängen an nach Möglichkeit 3-5 Ästen je Kronendrittel gemessen, die Kronenhöhe, die Kronenansatzhöhe, sowie der Stammumfang in 1 m Höhe erfasst und das Erscheinungsbild auf einer Skala von 1-9 beurteilt. Auffälligkeiten am Wurzelhals, Stamm, in der Krone oder im Bereich der Baumscheibe wurden notiert. Ein Bonitierungsbogen findet sich im Anhang.

Bevor mit dem Einbau des Schwammstadtaufbaus im Leonhardgürtel West begonnen und nachdem bis zur Unterkante des zukünftigen Schwammstadtsubstrats freigelegt wurde, wurde auf diesem Planum die hydraulische Durchlässigkeit mit einem einfachen Sickerversuch (DN300 Polokalrohre) an 3 Positionen im nördlichen Bereich und 5 Positionen im südlichen Bereich bestimmt. Dies diente einerseits der Kontrolle von im Vorfeld in Schürfen ermittelten Durchlässigkeiten und andererseits ist dieser Wert für die spätere Interpretation der Messwerte und Beobachtungen relevant.

## **4.6. Auswertung Monitoring**

Die Messdaten aus dem Monitoring wurden im Zeitraum 01.01.2022 bis 30.08.2023 ausgewertet und sind für diesen Beobachtungszeitraum im gegenständlichen Bericht präsentiert.

Vor der Auswertung der Messdaten wurde eine Korrektur der Rohdaten durchgeführt. Messlücken mit bis zu 20 Zeitschritten wurden für die Bodenwassersensoren, Dendrometer, mikroklimatischen Sensoren (außer Niederschlag), Drucksensor und Ultraschallsensor durch lineare Interpolation gefüllt, unrealistische Messdaten im Sinne von Ausreißern, die auf elektrotechnische Instabilitäten im Messsystem zurückzuführen sind, wurden entfernt. Die Sensoren wurden über eine Plausibilitätsprüfung der Messwerte und ihrer Verteilungen und Verläufe auf ihre Funktion überprüft, um schadhafte Sensoren von der Auswertung ausschließen zu können. Dies traf bisher auf keinen Sensor zu.

Die Niederschlagsdaten der Wetterstation wurden mit den Daten der Station Graz Universität der Geosphere Austria (Klima-ID: 16412, <https://data.hub.geosphere.at/>) verglichen, wofür die Messdaten zuerst auf 10-Minuten-Werte akkumuliert wurden. Auf Grund der Ausführung und des Messprinzips des Niederschlagssensors in der All-in-One-Wetterstation ist dieser anfällig für Verstopfung. Dies war in den beiden Messjahren zumindest im Zeitraum 10.05.2022 bis 20.09.2022, sowie für kurze Zeit ab 13.07.2023 der Fall, wobei für weiteren Zeitraum zum Zeitpunkt der

Berichterstellung noch keine Daten der Geosphere-Station online abrufbar waren. Für den ersten Zeitraum wurden die Niederschlagswerte der Station Graz Universität für die weitere Auswertung verwendet.

Niederschlagsereignisse wurden basierend auf der um die Daten der Geosphere korrigierten Niederschlagszeitreihe, die aus 5-Minuten-Werten und 10-Minuten-Werten besteht, ausgewiesen. Hierfür wurden die Werte  $<0.05$  mm ignoriert, eine zeitliche Mindstdifferenz zwischen den einzelnen Niederschlagsereignissen mit einer Stunde festgelegt und nur jene Ereignisse als relevant betrachtet, die in Summe größer als 0.2 mm waren.

Für die Beobachtung der Wurzelverbreitung wurden Ganglinien für die zum jeweiligen Baum zuordenbaren Matrixpotenzialsensoren erstellt, wobei hier der dekadische Logarithmus des Matrixpotenzials in Hektopascal berechnet wurden ( $=pF$ -Wert). Im Jahr 2023 erfolgten zusätzlich im Juni und Oktober strukturierte (in definierten Tiefen) fotografische Aufnahmen mittels endoskopischer Kamera in den installierten Plexiglasrohren.

Die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration auf Tagesbasis erfolgte mittels des R-Package „*sirad*“. Hierfür mussten aus den 5-Minuten-Werten der Wetterstation relevante Tageswerte ermittelt werden. Dies erfolgte nach der Vorlage der ZAMG zur Tagesauswertung für das Jahrbuch (ZAMG, 2019). Die klimatische Wasserbilanz für die Vegetationsperioden wurde basierend auf den Niederschlagswerten und der ermittelten täglichen Evapotranspiration errechnet, wobei mit dem 01. Mai begonnen wurde.

Die Dendrometerwerte wurden auf Basis des manuell gemessenen Stammumfangs zum Zeitpunkt der Installation in Absolutwerte umgerechnet und weiterführend für die Ermittlung der täglichen Expansions- und Schrumpfperioden, des Stammumfangszuwachses (stem circumference increase, SCI), der maximalen täglichen Schrumpfung (maximum daily shrinkage, MDS), sowie des Baumwasserstatus (tree water status,  $\Delta W$ ) – absolut und/oder relativ zum anfänglichen Stammumfang vor Beginn der Vegetationsperiode - herangezogen (Jezik et al., 2015).

Die Messwerte des Ultraschallsensors wurden basierend auf der im Vorfeld durchgeführten Kalibrierung der Kombination aus Rohrstück und Sensor für ein Rohrgefälle von 1 % in Durchflussmengen umgerechnet. Hierbei zeigte sich die Problematik, dass der über die beiden Jahre detektierte tatsächliche Durchfluss vor Ort größtenteils geringer als der Durchfluss für den ersten Kalibrierungspunkt war. Der Grund hierfür war die Annahme einer wesentlich größeren Einzugsgebietsfläche in der Planungsphase und späterer Veränderungen, die erst nach der Kalibrierung bzw. erst in der Bauphase festgelegt wurden. Als bestmögliche Annäherung wurde eine Polynomfunktion 3. Grades an die Kalibrierungspunkte ( $x$ =Wasserstand,  $y$ =Zuflussrate) der Zuflussraten  $\leq 5$  l/s angepasst und für die Umrechnung verwendet. Auf Grund von Messsignalschwankungen, die durch den Einfluss der Umgebungstemperatur, Verschmutzungen des Messbereichs, Spinnen und andere Tiere im Messschacht, sowie elektrotechnische Unsauberkeiten zurückzuführen sind, wurde eine Baseline (Wasserstand 0 mm) je Niederschlagsereignis als gemessener Maximalstand innerhalb von 60 Minuten vor Eventbeginn errechnet und eventspezifisch für die weitere Berechnung herangezogen. Die resultierende Ganglinie wurde in weiterer Folge für die Ermittlung der Zuflussereignisse und ihrer summativen Größen herangezogen und mit identifizierten Niederschlagsereignissen gekoppelt. Obwohl die Einleitung von Dachwasser in das Schwammstadtsystem nicht Teil des FFG geförderten Projektumfangs, sondern Teil eines gesonderten Zusatzprojektes war, wird dies der Vollständigkeit und Wichtigkeit halber in diesem Bericht mit angeführt.

Für die Auswertung des Wasserzuflusses über das Tiefbeet wurde ein semimanuelles Verfahren gewählt, da der Drucksensor im Tiefbeet auf Grund seiner Exponiertheit und der damit gekoppelten Temperaturschwankungen, sowie der schwankenden Wasserhöhe im Sensorstandrohr ein teilweise stark schwankendes Messsignal liefert. Um den manuellen Aufwand einzuschränken wurden die täglichen Maxima der Wasserstandwerte des Drucksensors ermittelt und diese gegenübergestellt. Wenn die Differenz des Maximalwertes zum Vortag und Folgetag bzw. übernächsten Tag oder zum Vorvortag und Folgetag >10 mm betrug, wurden die Tage als mögliche Eventtage ausgewählt und mit einem 6-Stunden-Fenster davor und danach als 5-Minuten-Ganglinie zur manuellen Identifikation des Beginns, des Endes und des Maximums des Wasseranstaus im Tiefbeet herangezogen. Auch für diesen Sensor wurde auf Grund der Temperaturabhängigkeit und der damit gekoppelten Schwankungen des Messsignals eine eventbezogene Baseline (Messwert am manuell bestimmten Ende eines Events) verwendet, um die absoluten Anstauhöhen je Event zu berechnen. Diese Tiefbeet-Events wurden zeitbasiert den Niederschlagsereignissen zugeordnet. Für die einzelnen Events wurde daraus die Infiltrationsrate abgeleitet.

Eine Gegenüberstellung der Werteverläufe der volumetrischen Wassergehaltssensoren wurde für die Darstellung der unterschiedlichen Befeuchtungsintensität und -häufigkeit im Baum- und Schwammstadtsubstrat dargestellt. Hierfür wurden die Rohwertverläufe der Sensoren relativ zum Maximalwert je Sensor im Beobachtungszeitraum dargestellt.

Bei der Verarbeitung der Saftstromdaten stand eine relative Auswertung der jährlichen Verläufe je Baum im Vordergrund. Eine erste Korrektur wurde mit dem von der Firma UGT GmbH zur Verfügung gestellten Excel-File durchgeführt, wobei davon ausgegangen wird, dass in Nächten mit Niederschlag bzw. einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95-100 % keine Transpiration erfolgt. Weiters wird davon ausgegangen, dass im Falle von gefülltem Bodenwasserspeicher in diesen Nächten auch kein Wassertransport nach unten erfolgt, die gemessene Saftstromdichte also null sein muss. Über die Anpassung der zur Berechnung herangezogenen Abstände zwischen den Nadeln der Sensoren (*probe misalignment*) wurde eine Korrektur der Ganglinie der errechneten Saftstromdichte-Werte auf diese festgelegte Baseline erzielt. Diese Anpassung erfolgte auf visueller Basis für jeden Sensor und auf Grund der jährlichen Neuinstallationen auch für jede Vegetationsperiode gesondert (in Anlehnung an ImplexxSense: Quick-Start-Guide-Correction-for-Probe-Misalignment-v2.pdf (implexx.io), „Saturation Method“).

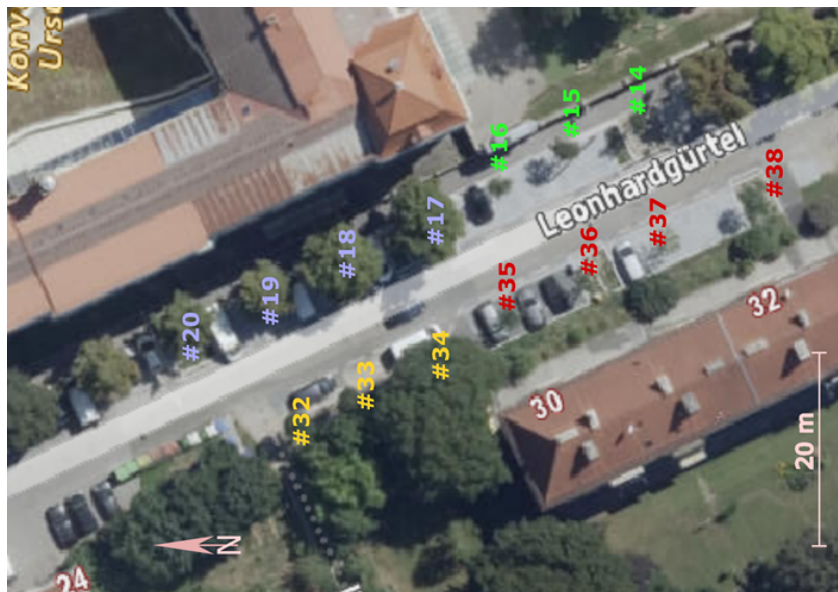
Auf Grund der vorrangigen Auswertung als relative Verläufe zur Identifikation von Abweichungen und Auffälligkeiten konnte auf die Bestimmung der Holzdichte und Xylem-Dicke verzichtet werden. Diese Parameter wurden für die Berechnungen vereinfacht weitgehend mit den Default-Werten festgelegt. Für einen Sensor (Baum #36) im Jahr 2023 mussten die Holzdichte-Werte angepasst werden, um Ausreißer in der Ganglinie zu korrigieren, die aus dem Wechsel von der HRM-Methode zur Tmax-Methode in der Berechnung resultieren und auf Grund der resultierenden Ganglinie als Ausreißer zu bewerten sind.

# 5 Ergebnisse

Die untersuchten Bäume werden im Folgenden mit Nummern bezeichnet, die den Projektunterlagen entstammen und im Übersichtslageplan eingezeichnet sind (Abbildung 3). Die Baumnummern sind folgenden Baumarten zuzuordnen, wobei anstatt der Raute in den Abbildungen ein „T“ verwendet wird:

- #32, #33, #34                    *Acer opalus*, Neupflanzungen
- #35, #36, #37, #38            *Styphnolobium japonicum*, Neupflanzungen
- #14, #15, #16                   *Aesculus x plantierensis*, Neupflanzungen
- #17, #18, #19, #20            *Aesculus hippocastanum*, Bestandsbäume

Abbildung 3: Übersichtslageplan über das Projektgebiet im Leonhardgürtel, 8010 Graz. Quelle Hintergrund: basemap.at.



Die beschriebenen und dargestellten Bodenwasserhaushaltsensoren folgen folgendem Beschriftungsschema:

z.B. #37MP150-120

#37 ..... Baumnummer, zu der der Sensor zuzuordnen ist; statt # auch T äquivalent möglich

MP / VWC ..... Sensortyp

150 ..... Entfernung vom Baumstamm in die Hauptrichtung (#35, #36, #37: parallel zur Straße)

120 ..... Tiefe ab Geländeoberkante (GOK)

## 5.1. Eigenschaften der Substrate

Die Analysen der Mischungsreihen des reinen Feinsubstrats (Schüttversuch) ermöglichten einen Vergleich der einzelnen Mischungen untereinander und waren die Basis für die Auswahl eines einzusetzenden Feinsubstrats (Tabelle 1). Es wurden zwei verschiedene Sande getestet: Rundkornsand (RKS) 0/8 ungewaschen und RKS 0/4 gewaschen. Diese unterscheiden sich ca. um den Faktor 10 hinsichtlich ihrer Durchlässigkeit, wobei der RKS 0/4 der durchlässigere ist. Die Wasserspeicherfähigkeit verhält sich gegenläufig. (Anmerkung: Für den reinen RKS 0/4 wurde die Wasserspeicherkapazität nicht bestimmt. Es können aber die Mischungen mit Kompostkohle (KK) verglichen werden, wobei jene mit RKS 0/8 wesentlich höhere Wasseranteile zeigen.) Auch die Luftkapazität der Mischungen mit RKS 0/4 ist deutlich höher als jene der Mischungen basierend auf RKS 0/8, wogegen sich der Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt gegenläufig verhält. Diese Unterschiede sind besonders auf einen verschieden großen Feinanteil zurückzuführen, der durch den Waschvorgang zu einem großen Teil entfernt wird und somit beim RKS 0/4 geringer ist. Weiters zeigt sich eine Zunahme der Wasserspeicherfähigkeit mit zunehmendem Kompostkohleanteil – sowohl für den RKS 0/8 als auch für den RKS 0/4 – bei gleichzeitiger Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit und weitgehend der Luftkapazität. Die Auswahl der Feinsubstratmischung erfolgte im Projekt MUFUWU basierend auf den Parametern Durchlässigkeit, Luftkapazität und Wasserspeichervermögen. Auf Grund der zum Umsetzungszeitpunkt häufig maßgeblichen Bedenken hinsichtlich einer über die Zeit möglichen Reduktion der Durchlässigkeit des Schwammstadtsubstrats, floss dieser Parameter stärker in die Auswahl mit ein als das Wasserspeichervermögen. Die Entscheidung fiel auf eine Mischung auf Basis des RKS 0/4 gewaschen, mit einem geringeren Feinanteil und aus diesem Grund auch einem höheren Grobporenanteil, der sich in einer höheren Luftkapazität und Durchlässigkeit äußert. Es wurde das Verhältnis 4:1 als mittleres der drei untersuchten gewählt (grau hinterlegt in Tabelle 1). Dieses Verhältnis wurde auch in der Baum-Lysimeteranlage verwendet, wenn auch die Bezugsquellen der Rohkomponenten andere waren. Die Idee der Verwendung von MSM wurde auf Basis der geringen Durchlässigkeit noch ohne Beimengung des Kompostkohlegemischs verworfen.

Tabelle 1: Ergebnisse aus den bodenphysikalischen und -hydrologischen Laboranalysen für ausgewählte Schwammstadt-Feinsubstratmischungen, durchgeführt am Bundesamt für Wasserwirtschaft in Petzenkirchen

Bezeichnung der Probe	k <sub>r</sub> -Wert	TRD	Wasseranteil bei ...			Wassergehalt bei Welkepunkt (15.000 hPa)	Luftkapazität bei Feldkapazität (60 hPa)
			Sättigung	Wasserkapazität (nach 2 h)	Feldkapazität (60 hPa)		
<b>Schüttversuche</b>	m/s	g/cm <sup>3</sup>	Vol%	Vol%	Vol%	Masse%	Vol%
RKS 0/8 : KK (1:1) = 1:0	4,6E-06	2,04	31,5	30,3	16,7	1,0	14,8
RKS 0/8 : KK (1:1) = 3:1	8,9E-07	1,51	42,5	40,0	28,0	4,5	14,5
RKS 0/8 : KK (1:1) = 4:1	2,7E-06	1,65	38,6	36,6	25,6	3,4	13,0
RKS 0/8 : KK (1:1) = 6:1	1,5E-06	1,69	36,5	34,5	23,8	2,6	12,7
RKS 0/8 : MSM : KK (1:1) = 4:0,5:1	3,7E-07	1,69	39,3	36,3	29,1	3,7	10,2
RKS 0/4 : MSM = 1 : 0	4,6E-05	---	---	---	---	---	---
RKS 0/4 : MSM = 3 : 1	4,8E-06	---	---	---	---	---	---
RKS 0/4 : MSM = 4 : 1	3,1E-06	---	---	---	---	---	---
RKS 0/4 : MSM = 6 : 1	5,8E-06	---	---	---	---	---	---
RKS 0/4 : MSM = 0 : 1	9,4E-07	---	---	---	---	---	---
RKS 0/4 : KK = 3 : 1	3,2E-06	1,62	42,6	36,6	19,2	2,3	23,4
RKS 0/4 : KK = 4 : 1	3,3E-06	1,70	41,1	36,3	18,0	2,1	23,1
RKS 0/4 : KK = 6 : 1	7,0E-06	1,75	40,2	36,3	15,0	1,4	25,2

Die gewählte Feinsubstratmischung RKS 0/4 : Kompostkohle im Volumenverhältnis 4:1 wurde mittels Schlammmethode, also eingeschlämmt in Grobschlag 32/63, mit einem Einschlammgrad von 25 % im Labor getestet. Die dabei erzielten Messwerte entsprechen in etwa den gemittelten Eigenschaften des Schwammstadtsubstrats im Leonhardgürtel West (Tabelle 2).

Das im Leonhardgürtel verwendete Baumsubstrat mit der Mischung mineralische Komponenten zu organische Komponenten im Verhältnis 5:1 (mineralisch = MSM : RKS 0/8 ungewaschen : Kantkorn 0/32 im Verhältnis 1:8:1; organisch = KK im Verhältnis 1:1 Kompost : Kohle) wurde ebenfalls im Labor getestet. Ein Vergleich der nutzbaren Feldkapazität der beiden Substrate zeigt, dass das Baumsubstrat ca. 2,5 Mal so viel Wasser speichern kann, wie das eingeschlammte Schwammstadtsubstrat (Anmerkung: nutzbare Feldkapazität = Feldkapazität – Welkepunkt) (Tabelle 2).

Tabelle 2: Ergebnisse aus den bodenphysikalischen und -hydrologischen Laboranalysen für das Schwammstadtsubstrat (Leonhardgürtel West) und Baumsubstrat, durchgeführt am Bundesamt für Wasserwirtschaft in Petzenkirchen

	kf-Wert	TRD	Wasseranteil bei ...					Luftkapazität bei Wasserkapazität	Luftkapazität bei Feldkapazität
			Sättigung nur Grobschlag	Sättigung	Wasserkapazität (nach 2h)	Feldkapazität (60 hPa)	Welkepunkt (15.000 hPa)		
	m/s	g/cm <sub>3</sub>	Vol%	Vol%	Vol%	Vol%	Vol%	Vol%	Vol%
<b>Schwammstadtsubstrat eingeschlämmt in Grobschlag 32/63, 25 % Einschlammgrad</b>									
Mittelwert	4,3E-04	2,01	42,8	26,2	9,7	6,9	1,1	16,5	18,8
Std.abw.	7,5E-05	0,02	0,76	1,01	0,31	0,54	0,00	1,23	0,10
Anzahl	9	9	9	9	9	2	2	9	2
<b>Baumsubstrat eingebaut – Zieldichte 1,7 g/cm<sup>3</sup></b>									
Mittelwert	3,6E-05	1,72		33,5	29,8	16,4	3,9	3,7	17,1
Std.abw.	2,6E-06	0,02		0,29	0,79	0,67	0,05	0,51	0,52
Anzahl	3	3	3		3	3	3	3	3

Erklärungen zu den Tabellen:

- KK = Kompostkohle (im Volumenverhältnis 1:1 Kompost und Kohle gemischt)
- RKS = Rundkornsand
- MSM = Murschwemm-Material
- kf-Wert = gesättigte hydraulische Durchlässigkeit
- TRD = Trockenrohddichte

### 5.1.1. Vorgemischte Variante

Die Mischung für das vorgemischte Schwammstadtsubstrat wurde angelehnt an jenes aus der Baumlysimeteranlage ausgewählt - Splitt 32/63 : Kompostkohle : Murschwemm-Material im Volumenverhältnis 3 : 0,75 : 0,25. Dieses Verhältnis bedeutet ein Grobschlag zu Feinsubstrat-Verhältnis von 3:1 und unter der vereinfachten Annahme, dass der Grobsplitt die Gerüststruktur bildet und das Feinsubstrat in dessen Hohlräumen Platz findet, resultiert daraus ein Feinsubstratvolumenanteil von 33 %. Da dies in der Realität nicht gänzlich der Fall sein wird, bewegt sich der Feinsubstratanteil am gesamten Schwammstadtkörper zwischen 25 und 33 %. In Schweden wird derzeit primär die vorgemischte Variante mit 15 Vol% Feinsubstratanteil verwendet (Präsentationsinhalt Expertenaustausch, 2023). Bei einem solch vergleichsweise niedrigen Feinsubstratanteil kann eher davon ausgegangen werden, dass das Feinsubstrat selbst bei einer Vormischung in den Hohlräumen des Gerüstkorns Platz findet. Es ist zu vermuten, dass dies die Tragfähigkeit erhöht und kaum verdichtete Feinsubstratpackungen zwischen den Steinen zu erwarten sind. Es ist mit einem größeren Anteil an Grobporen zu rechnen.

Die Untersuchung des vorgemischten Substrats im Labor erfolgte bisher noch nicht mit der weiterentwickelten Labormethodik, wird aber derzeit getestet. Auf Grund der durch den Mischungs- und Einschüttprozess entstehenden Heterogenität im Substrat und der Problematik, wie dies im Labormaßstab am besten an einen LKW-Transport und die Einbringung auf der Baustelle angenähert werden kann, ist dies mit Schwierigkeiten verbunden. Weiters hat bei der gewählten

Substratvariante mit einem vergleichsweise hohen Feinsubstratanteil auch die Verdichtung einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften, da dieses zum Teil zwischen den Steinen liegt, den Stein-zu-Stein-Kontakt sozusagen unterbricht und somit mitverdichtet wird. Bei der Einschlämmvariante hingegen wird nur der Grobschlag verdichtet, das nachträglich eingebrachte Feinsubstrat bleibt davon sicher unberührt. Die Verdichtung hat bei dieser Variante somit nur einen Einfluss auf die verfügbaren Hohlräume des Grobschlags und somit die Grobporen im System. Weiters werden bei den Varianten unterschiedliche Körnungen des Grobschlags verwendet (90/150 zu 32/63 für die vorgemischte Variante), weshalb unterschiedliche Verdichtungspotenziale erwartet werden.

#### **Anmerkung:**

Im weiteren Berichtverlauf wird primär das Schwammstadtsubstrat in der Einschlämmvariante beschrieben. Hierfür liegen wesentlich mehr Erfahrungen und Daten vor und auch beim gegenständlichen Projekt lag der Fokus auf dem Einschlämmsubstrat. Üblicherweise wird derzeit in Österreich auch die Einschlämmvariante angewandt.

### **5.1.2. Strukturstabilität und Verlagerung**

Wesentlich für die Funktion des Schwammstadtsubstrats ist die Stabilität des Grobschlags. Liegt dieser nach dem Einbau und der Verdichtung fest, verkeilt und dauerhaft stabil vor, so gilt dies als Basis für die Durchwurzelbarkeit einerseits und die Befahrbarkeit andererseits. Eine mögliche Verlagerung des Feinsubstrats im Grobskelettgerüst im Zuge von Starkniederschlagsereignissen ist nicht auszuschließen, schränkt aber die Funktion nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht ein. Es ist ohnehin nicht davon auszugehen, dass das Schwammstadtsubstrat homogen vorliegt, vielmehr gibt es Bereiche mit einem höheren Anteil an Feinsubstrat und Bereiche mit einem niedrigeren Anteil an Feinsubstrat. Die bisherigen Erfahrungen lassen zwar vermuten, dass weiter unten im Aufbau auch eher ein größerer Feinsubstratanteil vorliegt, es gibt aber keine Hinweise, die darauf schließen lassen, dass dies zu negativen Effekten, wie beispielsweise einer Dichtschicht führt. Besonders wenn das Feinsubstrat an sich grundsätzlich eine hohe Durchlässigkeit aufweist, kann dies kaum passieren. Weiters ist wahrscheinlich, dass es immer irgendwo im Grobschlag nicht eingeschlämmte Hohlräume geben wird, was der Theorie einer solchen Dichtschicht an der Schwammstadtunterkante widerspricht.

Im Leonhardgürtel West wurde als Grobschlag die Kornabstufung 90/150 verwendet (Einschlämmvariante). Bei der Anlieferung ist darauf zu achten, dass nur wenig Über- und vor allem auch Unterkorn vorhanden ist, der Grobschlag soll also eine enge Kornabstufung aufweisen. Im Zuge des Aufbaus im Leonhardgürtel wurden mit einer dynamischen Lastplatte Tragfähigkeitsversuche auf verschiedenen Schichten durchgeführt. Auf Grund der großen Korngröße konnten diese Versuche zwar nicht normgemäß durchgeführt werden, geben aber dennoch einen Anhaltspunkt bezüglich Tragfähigkeit. Auf der eingerüttelten Belüftungs- und Verteilschicht wurden  $E_{vd}$ -Werte zwischen 43 und 50  $\text{mN/m}^2$  gemessen. An der Oberkante der ungebundenen Tragschicht wurden Werte im Bereich 50-65  $\text{MN/m}^2$  erzielt. Auf der Oberkante des Schwammstadtsubstrats in der eingeschlämmten Variante waren auf Grund der Grobschlag- und Hohlraumgröße und der daraus resultierenden schlechten Auflagefläche der Lastplatte nur schwer brauchbare Messergebnisse zu erzielen. Die gültigen Messungen lagen im Bereich 30-35  $\text{MN/m}^2$ . Ein Unterbauplanum laut RVS 08.03.01 (Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, 2021) hat beispielsweise einen  $E_{vd}$ -Wert von 38  $\text{MN/m}^2$  einzuhalten. Weiters ist naheliegend, dass im Leonhardgürtel durch intensivere



Verdichtungsarbeiten noch höhere Werte für das dynamische Verformungsmodul möglich gewesen wären. Es wurden auch Vergleichsmessungen auf den unverdichteten Schichten gemacht, welche weit niedriger (10-20 MN/m<sup>2</sup>) lagen – eine Verdichtung mittels Rüttelplatte und/oder Walze ist somit unerlässlich.

### **5.1.3. Eignung für technische Richtlinien**

Mit dem vorliegenden Bericht soll grundsätzlich keine Rezeptur für ein Feinsubstrat (weder die Einschlammvariante noch die vorgemischte Variante) geliefert werden, die dann österreichweit verwendet und eingebaut wird. Es wird vielmehr angestrebt, dass bei der Wahl der einzelnen Komponenten auf lokal verfügbare Materialien zurückgegriffen wird, die Feinsubstratmischung und die resultierenden Substrateigenschaften an standort- und projektspezifische Gegebenheiten angepasst werden, und ein kreativer Weiterentwicklungsprozess stattfinden kann. Auch ist ein höherer Pflanzenkohleanteil denkbar – wichtig hierbei sind die Qualität und Korngröße der verwendeten Kohle – wie dies beispielsweise auch in Schweden derzeit üblich ist (Präsentationsinhalt Expert:innenaustausch, 2023). Diesen Parametern wurde bei der Substratuntersuchung im gegenständlichen Projekt noch wenig Wichtigkeit beigemessen, es stellte sich aber im späteren Projektverlauf heraus, dass es hier noch Optimierungspotenzial gibt.

Die in diesem Bericht angeführten Substrateigenschaften können aber eine erste Richtschnur für weitere Schwammstadtprojekte und Substratentwicklungen sein. Sie zeigen, mit welchen bodenhydrologischen Wertebereichen bei den gegebenen Bedingungen ungefähr gerechnet werden kann. Reduziert man beispielsweise den Einschlammgrad des Feinsubstrats im Grobschlag, so reduziert sich die Wasserspeicherfähigkeit und es erhöht sich der Grobporenanteil. Dies zeigt, dass die Gestaltung des Substrats Spielraum bietet und das System flexibel adaptiert werden kann.

In einer technischen Richtlinie sollten jedenfalls Parameter mit zugehörigen Mindest- oder Maximalwerten Erwähnung finden, die für die Integration des Systems in die städtische Infrastruktur und das Überleben der Bäume essenziell sind, wie beispielsweise eine Mindestdurchlässigkeit oder eine maximale Entleerungsdauer des Schwammstadtsubstrats bei einer etwaigen Vollenfüllung durch ein Extremwetterereignis. Auch ein gewisser Grobporenanteil zur Sicherstellung des Gasaustausches ist für die Baumvitalität sinnvoll. Beim Mindestwert für den pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher wird's hingegen schon schwieriger. Es sind beispielsweise auch Projektkonstellationen denkbar, wo weiter entfernte Bereiche im Schwammstadtsubstrat gänzlich ohne oder mit nur sehr wenig Feinsubstrat versehen werden, um dort den Retentionsspeicher für Starkniederschlagsereignisse zu erhöhen. Weiters könnte auch eine sehr großvolumige offene Baumscheibe den hauptsächlichen Bodenwasserspeicher stellen und das darunterliegende Schwammstadtsubstrat dafür weniger pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers zu Gunsten eines größeren Retentionsspeichers bereitstellen. Zu beachten ist hierbei, dass sich der Baumsubstratkörper nicht so rasch, häufig und intensiv mit Oberflächenwasser aus zusätzlichen Einzugsgebieten beaufschlagen lässt. Sinnvoll für Richtlinien könnte die Forderung eines Mindestvolumens für den Wurzelraum je Baum (Vorschlag: 35 m<sup>3</sup> - vergleichbar mit der ZTV-Vegtra-Mü-2018, der Planungsrichtlinie der Stadt München zur Erweiterung des Wurzelraumes für Stadtbäume), bestehend aus einer möglichst großen unverdichteten Baumscheibe und erweitertem Wurzelraum im Schwammstadtsubstrat) kombiniert mit einem Mindestvolumen an pflanzenverfügbarem Bodenwasserspeicher sein.

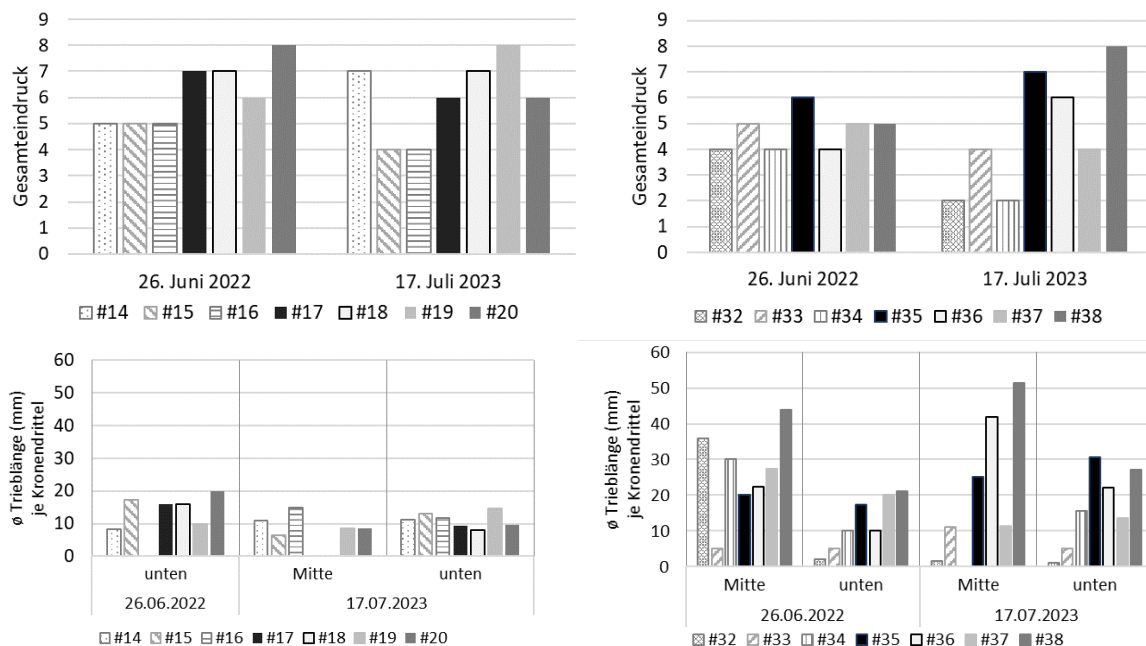
Relevant bei der Angabe von Parametern und deren Wertebereichen für das Substrat ist auch die Art der Messung dieser Parameter, da existierende und gängige Normen für bodenphysikalische und -hydrologische Untersuchungen für gewachsene Böden oder feinkörnigere Substrate mit bestimmten Anforderungen, wie beispielsweise Sportrasen, erstellt wurden. Am Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (Bundesamt für Wasserwirtschaft) wurden diese bekannten Untersuchungsverfahren auf das Schwammstadtsubstrat (in der eingeschlämmten Variante) angepasst (Rath, 2023).

Das Schwammstadtsubstrat bestehend aus Grobschlag mit Feinsubstrat (Einschlammvariante) eignet sich nach derzeitigem Wissensstand für die zugesprochenen Hauptaufgaben Durchwurzelbarkeit und Baumwachstum, Tragfähigkeit für Nebenverkehrsflächen und Wasserretention bei direkter und indirekter Einleitung, weshalb der Grundstein für die Eingliederung in technische Richtlinien gelegt scheint.

## 5.2. Baumentwicklung

Für eine Bewertung des Anwachsens der Neupflanzungen am Standort ist vor allem das zweite Beobachtungsjahr nach der Pflanzung relevant, da die Bäume in der ersten Vegetationsperiode erst aus dem Pflanzballen auswurzeln müssen.

Abbildung 4: Darstellung des visuellen Gesamteindrucks (oben) und der Triebblängen (unten) für alle 14 Bäume an beiden Bonitierungstagen (links: Ost, rechts: West)



Unter den Neupflanzungen entwickelten sich im Projektzeitraum und hier besonders im zweiten Beobachtungsjahr die Japanischen Schnurbäume (*Styphnolobium japonicum*) sowohl aus Sicht der Bonitierung (Abbildung 4) als auch aus Sicht der Stammzuwächse (Abbildung 7) sehr gut. Eine nähere Betrachtung der einzelnen Bäume innerhalb derselben Baumart zeigt merkbare Unterschiede, besonders bei den relativen Stammzuwächsen, die sich auf Grund der Objektivität und Kontinuität in

der Messung gut für einen Vergleich eignen. Unter den japanischen Schnurbäumen wuchs der Baum #38 mit rund 1300  $\mu\text{m}/\text{cm}$  bis Ende August im Jahr 2023 beinahe doppelt bis dreifach so stark wie die Vergleichsbäume derselben Art. Der Baum #37 zeigte mit 460  $\mu\text{m}/\text{cm}/\text{yr}$  den geringsten Stammzuwachs. Die präsentierten Fotos zeigen einen deutlichen Zuwachs auch im gesamten Kronenbereich der vier Bäume (Abbildung 5).

Die Bosnischen Ahornbäume (*Acer opalus*) zeigen sich im Jahr 2023 von schlechter Vitalität, #32 und #34 reduzierten ihre relativen Stammzuwächse vom 2022 auf das Jahr 2023 sogar deutlich. Die Stammzuwachsraten im Jahr 2023 bis Ende August lagen  $< 10 \mu\text{m}/\text{cm}$  für die Bäume #32 und #34 (30 und 40  $\mu\text{m}/\text{cm}$  Ende August 2022) und knapp unter 100  $\mu\text{m}/\text{cm}$  für den Baum #33 (Abbildung 7). Die Ursache kann nicht genau bestimmt werden. Die Bäume leiden wahrscheinlich unter dem Konkurrenzdruck (Beschattung) durch die süd- und westseitige spontane Vegetation, möglicherweise spielt auch eine schlechte Qualität des Pflanzmaterials aus der Baumschule eine Rolle. Da diese Wachstums- und Vitalitätseinbußen bereits im zweiten Standjahr zu beobachten sind, ist auszuschließen, dass im Substrat die Ursache zu suchen ist.

Abbildung 5: Fotografien der vier Exemplare der Baumart *Styphnolobium japonicum* aufgenommen am 29.06.2022 und 21.09.2023



Die Bestandskastanien #17, #18, #19, #20 zeigen in beiden Beobachtungsjahren eine ähnliche Vitalität (Abbildung 4) und verbesserte Stammzuwachsraten vom ersten (55, 30, 55, 120  $\mu\text{m}/\text{cm}$  bis 30.08.2022) zum zweiten Beobachtungsjahr (90, 60, 105, 210  $\mu\text{m}/\text{cm}$  im Jahr 2023) (Abbildung 7). Dies deutet darauf hin, dass sie die Wurzelfreilegung und Wurzelraumsanierung ohne grobe Vitalitätseinbußen überstanden haben. Vergleichsmessungen zu unsanierten Bestandsbäumen existieren nicht. Bei den Kastanien zeigen die Sommerbonitierungen gute Zuwächse, und Vitalität, allerdings zeigen die Aufnahmen im Herbst vom 21.09.2023 (Abbildung 6) wie bei den meisten Kastanien in Wien und Graz keine artübliche Herbstfärbung in Gelb sondern ein Zeichen von Trockenstress und eine braune Verfärbung der Blätter.

Unter den neugepflanzten Kastanien hatten die Bäume #14 und #15 mit 890 und 810  $\mu\text{m}/\text{cm}$  für den beobachteten Zeitraum im Jahr 2023 ähnlich hohe Zuwachsraten, während der Baum #16 mit 400  $\mu\text{m}/\text{cm}$  nur etwa halb so stark an Stammstärke zulegte. Der Grund hierfür ist (derzeit) unklar.

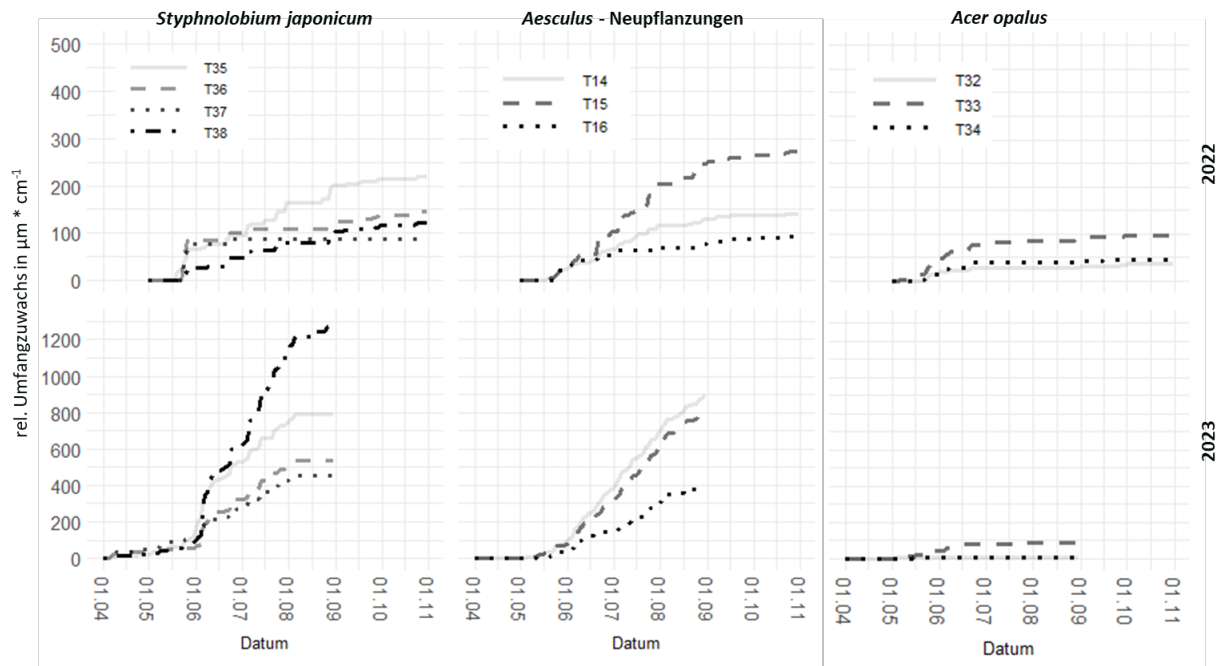
Der Baum #16 ist auch jener Baum, der als „Nullbaum“ ohne Schwammstadtsubstrat gepflanzt wurde. Auf Grund des erst zweiten Standjahres ist ein solch sichtbare Einfluss des fehlenden erweiterten Wurzelraums allerdings sehr unwahrscheinlich, da auch die zur Verfügung gestellte Baumscheibe mit unverdichtetem Baums substrat vergleichsweise voluminös ist (ca. 3,5 m<sup>2</sup> bzw. ca. 3,8 m<sup>3</sup>).

Bei allen Bäumen ist eine längerfristige Bonitierung über die zumindest nächsten 5 Jahre sinnvoll, um Aussagen treffen zu können, wie sich die Pflanzen im Schwammstadts substrat entwickeln, da diese ja erst aus dem Ballen und durch das Baums substrat in den Schwammstadtkörper einwurzeln müssen.

Abbildung 6: Fotografien der vier Exemplare der Baumart *Aesculus hippocastanum* (Bestandsbäume) aufgenommen am 17.07.2022 und 21.09.2023 (Fotos vom 21.09.2023: Waltraud Körndl)



Abbildung 7: Stammzuwächse aller Neupflanzungen der Standorte Ost und West in den Vegetationsperioden 2022 und 2023 (bis 30.08.2023)



### 5.2.1. Beschreibung der Baumstandorte und deren Umgebung

Während das Schwammstadtsubstrat in dieser frühen Phase des Baumwachstums noch keinen Einfluss auf Vitalität und Wachstum haben dürfte, spielt die direkte Umgebung des Pflanzballens vermutlich bereits oder vielleicht sogar besonders in den ersten Jahren eine Rolle. Ist die Ebene des Schwammstadtsubstrat erst einmal von den Wurzeln erkundet und wird von diesen beginnend eingenommen, nimmt die Relevanz der direkten Ballenumgebung möglicherweise ab. Dieser Einfluss der direkten Baumumgebung könnten eine Erklärung für die beobachteten Unterschiede zwischen den Einzelexemplaren der Styphnolobien sein. Der Baum #38 ist in einer großen Baumscheibe mit rund 14 m<sup>2</sup> Oberfläche und 9,5 m<sup>3</sup> Baums substrat gepflanzt und hat keine parkenden Autos in seiner direkten Umgebung.

Der Baum #37 hingegen wurde in einen quadratischen Betonkranz mit einer inneren Seitenlänge von 1 m und einer Tiefe bis auf Oberkante Schwammstadtsubstrat gepflanzt, weshalb nur rund 0,8 m<sup>3</sup> Baums substrat zur Verfügung stehen. Außerhalb des Betonkranzes beginnt direkt der Parkplatz. Dieser Baum hat nur sehr wenig Platz, um horizontal aus dem Pflanzballen auszuwurzeln und ist gezwungen, vorrangig zuerst nach unten zu wurzeln, um dort das Schwammstadtsubstrat zu erschließen. Eine geringere Oberfläche der Baumscheibe kombiniert mit geringen Baums substrat-Kubaturen bedeuten auch einen stark verringerten Bodenwasserspeicher im Vergleich zum Baum #38. Der Baum #35 ist auch ringsum von Parkflächen umgeben, ist aber in keinen Betonkranz gepflanzt, weshalb ein größeres Volumen, sowie auch eine größere Fläche an Baums substrat zur Verfügung gestellt werden konnte. Die horizontale Auswurzeln aus dem Pflanzballen wird somit bis in eine Distanz von 1-2 m vom Ballen durch keine Barrieren behindert. Zusätzlich könnte dieser Baum – zumindest gegen Ende des Jahres 2023 und vor allem in Zukunft – von einem Wasserversorgungsvorteil im Schwammstadtsubstrat auf Grund der direkten Nähe zur Dachwasserzuleitung profitieren.

Der Baum #36 steht in einem langgezogenen Baumsubstratbereich mit rund 8 m<sup>2</sup> (ca. 2 x 4 m) Oberfläche und daraus resultierend rund 5 m<sup>3</sup> Baumsubstrat und ist nicht direkt von Parkplätzen umgeben. Allerdings ist der Baumsubstratstreifen entlang der schmalen Ausdehnung beidseits durch Randsteine begrenzt, die auf einer geböschten Betonbettung sitzen, die die direkte horizontale Auswurzelung aus dem Ballen in diese beiden Richtungen bis in die Tiefe von Oberkante Belüftungsschicht beschränkt. Mit zunehmender Tiefe wird der Baumsubstratkörper in diese beiden Richtungen auf Grund der Böschungen schmaler. Diese räumliche Enge in zumindest zwei Richtungen könnte eine Erklärung für das vergleichsweise geringe Stammwachstum sein.

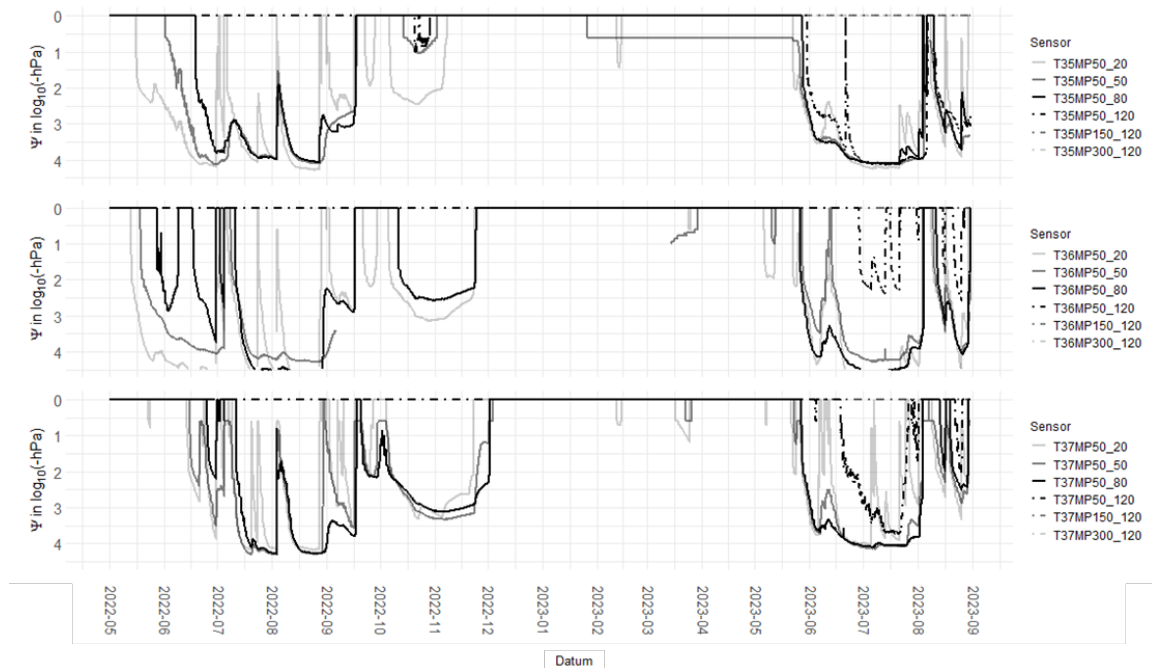
### 5.3. Wurzelausbreitung

Die Daten der Matrixpotenzialsensoren, welche die Austrocknung des Bodens im pflanzenverfügbaren Bereich beschreiben, deuten auf eine beginnende Wurzelausbreitung der neugepflanzten *Styphnolobien* im Schwammstadts substrat hin (Abbildung 8). Die Daten sind als Zehner-Logarithmus des Matrixpotenzials in Hektopascal aufgetragen (pF). Ein Wert von 3 entspricht somit einem Matrixpotenzial von -1000 hPa. Je stärker negativ dieser Wert, desto stärker ist das Wasser im Boden gebunden und desto weniger Wasser ist im Boden vorhanden. Der pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicher bewegt sich ca. im Bereich von -100 bis -15.000 hPa (pF zwischen 2 und 4,18).

Während im ersten Untersuchungsjahr 2022 nur im ballenumgebenden Baumsubstrat ein Wasserentzug detektiert wurde (Sensoren MP50\_20, MP50\_50 und MP50\_80), konnte ein solcher im Jahr 2023 bei allen neugepflanzten *Styphnolobien* auch beim baumnächsten Sensor im Schwammstadts substrat (MP50\_120, strichpunktiert dargestellt) festgestellt werden. Dieser jeweils baumnächste Sensor im Schwammstadts substrat liegt in einer Tiefe von 120 cm unter Geländeoberkante, sowie ca. 50 cm neben und vor den gepflanzten Bäumen (Messung ab Stamm). Beim Baum #35 ist mit Ende Mai 2023 als erstes ein starker Wasserentzug aus diesem Bereich zu verzeichnen, beim Baum #37 ist dies ab Mitte Juni 2023 der Fall und beim Baum #36 ist dies ab Ende Juni 2023 messbar.

Auch der Baum #15, eine neugepflanzte Kastanie, ist im Jahr 2023 erstmals messbar in das Schwammstadts substrat eingewurzelt (Abbildung 9 oben). Ein deutlicher Wasserentzug zeigt der Sensor in ca. 1 m Entfernung von der Baumachse an. Einen nur sehr geringen Wasserentzug, der aber auch eine beginnende Durchwurzelung des umgebenden Bereichs andeutet, ist in der Zeitreihe des Sensors in ca. 1,90 m Entfernung erkennbar. Der Baum #16 ist nicht im Schwammstadtsystem gepflanzt, aber mit einem größeren Volumen Baumsubstrat umgeben, das zum Teil auch unterhalb des Randsteinaufbaus über die Baumscheibe hinaus reicht. Bei diesem Baum reicht mit Ende August 2023 der messbare Wurzelraum bis in eine Entfernung von rund 60 cm vom Stamm.

Abbildung 8: Matrixpotenzialverläufe der Sensoren bei den Neupflanzungen #35, #36, #37 als Darstellungsart der beginnenden Wurzel ausbreitung im Schwammstadts substrat im Jahr 2023; oben: #35, Mitte: #36, unten: #37; durchgehende Linien: Sensoren im Baums substrat; strichpunktierte Linien: Sensoren im Schwammstadts substrat

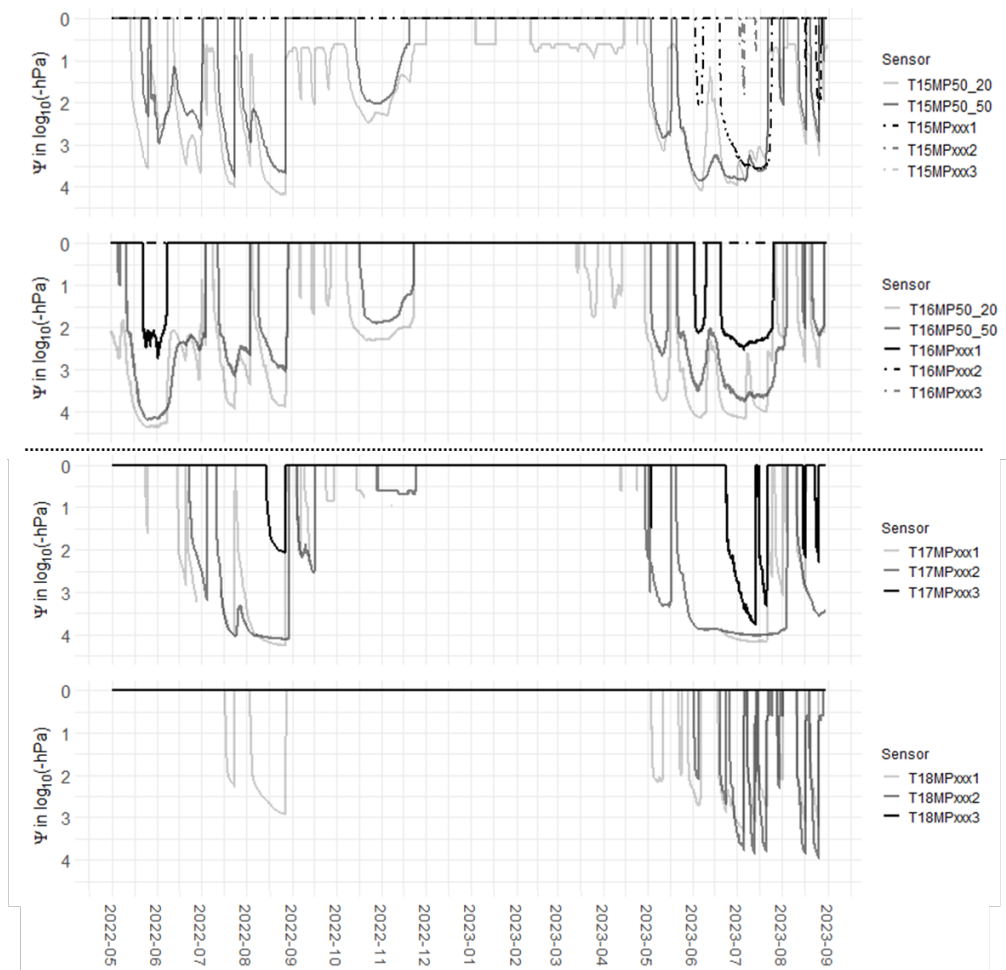


Grundsätzlich kann ein Wasserentzug auch durch die Wasseraufnahme durch andere Pflanzen oder Evaporation, also unproduktive Verdunstung, erfolgen. Auf Grund der technischen Beschaffenheit, der Tiefe und des schichtweisen Aufbaus mit einer feinsubstratlosen Splitt-Zwischenschicht und ergänzend einem Splittbelag als Parkplatzoberfläche ist nicht davon auszugehen, dass das Schwammstadts substrat von einer unproduktiven Verdunstung in nennenswertem Ausmaß betroffen ist. Ein sensorisch erfasster Wasserentzug in diesem Bereich ist somit und in Ermangelung anderer darin wurzelnder Pflanzen auf die Ausbreitung von Feinwurzeln der gepflanzten Bäume in die nähere Umgebung der Position des Messensors zurückzuführen.

Die Sensoren im Bereich der Bestandsbäume deuten an, dass diese das Schwammstadts substrat als Wurzelraum annehmen, Feinwurzeln gebildet haben und aus dem Substrat Wasser entziehen (Abbildung 9, 3. und 4. Grafik). Bei beiden Bäumen ist zwischen den Jahren 2022 und 2023 eine deutliche Zunahme der Austrocknung in der Magnitude, Zeitdauer und Örtlichkeit zu erkennen.

Auch über die Methodik der visuellen Wurzelerkundung sind nach den ersten beiden Vegetationsjahren bereits in einigen Rohren Wurzeln zu erkennen. Bei den beiden Bestandsbäumen befinden sich die Beobachtungsrohre im Falle des Baums #17 rund 4 m und beim Baum #18 rund 3,5 m vom jeweiligen Baumstamm entfernt. Die Plexiglasrohre sind im tieferen Schwammstadtbereich Richtung Straße positioniert. Bei beiden Bäumen sind erste Wurzeln visuell erkennbar, wobei beim Baum #17 bereits wesentlich mehr, z. T. wesentlich dickere Wurzeln und über einen größeren Tiefenbereich (ab 90 cm Tiefe bis zum unteren Ende der Schwammstadt mit 115-120 cm Tiefe) zu erkennen sind (Abbildung 10).

Abbildung 9: Matrixpotenzialverläufe der Sensoren bei den Kastanien #15 und #16 (oben; Neupflanzungen), #17 und #18 (unten; Bestandsbäume) als Darstellungsart der Wurzel ausbreitung



Bei den Neupflanzungen sind nach den ersten beiden Jahren Wurzeln in den Plexiglasrohren, die in der Nähe der Bäume #35 (Entfernung ca. 1,60 m) und #37 (Entfernung ca. 2,0 m) - beide *Styphnolobium japonicum* - liegen, erkennbar. Während beim Baum #35 bereits bei der Erkundung am 20.06.2023 erste Wurzeln zu erkennen waren und diese sich bis zur Erkundung am 23.10.2023 über weitere Tiefenstufen erstreckten (55 bis 95 cm Tiefe ab GOK) (Abbildung 10), oder mehr bzw. verzweigter wurden, war beim Baum #37 eine visuelle Identifikation von Wurzeln erstmals am 23.10.2023 in den Tiefenstufen von 95 bis 105 cm ab GOK möglich.

Abbildung 10: visuelle Wurzel aufnahmen in den Plexiglasrohren, links Baum #17, rechts Baum #35, beide Aufnahmen vom 23.10.2023





## 5.4. Wasserversorgung der Bäume

Die Wasserversorgung der Bäume wird anhand von zwei Beispiel-Jungbäumen erörtert: Baum #16, eine neugepflanzte Kastanie und Baum #37, ein japanischer Schnurbaum.

Die Beobachtung der Wasserversorgung der Bäume erfolgte auf zwei Ebenen: auf Basis des Substrats und auf Basis der Baumphysiologie. Auf der Substratebene liefern die installierten Sensoren zur Messung des Matrixpotenzials und des Wasseranteils Einblicke in die Verfügbarkeit von Bodenwasser für den pflanzlichen Entzug. Auf der baumphysiologischen Ebene geben die Saftstromsensoren und die Dendrometer direkt und indirekt wertvolle Einblicke in die Transpirationsverläufe und somit die Wasserversorgung der Bäume. Um eine Verbindung zwischen der Substratebene und der baumphysiologischen Ebene herstellen zu können, ist die Kenntnis des erschlossenen Wurzelraums (in vertikaler und horizontaler Richtung) besonders relevant.

Der Stammumfang unterliegt grundsätzlich über die Vegetationsperiode gesehen einem kontinuierlichen Wachstumsprozess. Zeigt der Stammumfangsverlauf im Laufe des Jahres merkbare Stagnationen oder sogar Einbußen entlang der Ganglinie, so ist dies ein Indiz für Stress im Allgemeinen. Korrelieren diese Stagnationen mit gemessenen oder errechneten Defiziten im Bodenwasserhaushalt bzw. die nachfolgenden Anstiege im Stammumfang mit Wassereinträgen, so ist Trockenstress naheliegend. Auf einer Tagesbasis betrachtet unterliegen Stämme der Bäume einem Schrumpfungsprozess vom morgendlichen Maximum bis zum abendlichen (bzw. nachmittäglichen) Minimum und einem Schwellungsprozess in der restlichen Zeit. Im Idealfall nehmen die morgendlichen Maxima von Tag zu Tag zu, was dem kontinuierlichen Wachstum entsprechen würde. Stagnationen oder Einbußen im Wachstum äußern sich dadurch, dass die täglichen morgendlichen Maxima geringer sind, als das bisherige Maximum (=SCI – *stem circumference increase*). Diese Stammumfangsentwicklung ist im Detail für den Juni 2022 für den Baum #16 in der Abbildung 12 dargestellt.

Der Saftstromverlauf hängt bei vollem pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher im Allgemeinen vom atmosphärischen Verdunstungsdruck, der Strahlung, sowie dem Zeitpunkt in der Vegetationsperiode ab (Stratopoulos-Le Chalony, 2020). Dies führt einerseits zu einem markanten Tagesgang an Schönwettertagen im Sommer und andererseits zu einem stark reduzierten und somit gedrückten Tagesgang an Schlechtwettertagen. Nimmt das Tagesmaximum graduell von Tag zu Tag ab, so ist dies ein starker Hinweis auf eine zunehmende Schließung der Stomata und somit eine Reduktion der Transpiration untertags. Ein häufiger Grund hierfür ist die (stark) eingeschränkte Verfügbarkeit von Bodenwasser im Wurzelraum.

Abbildung 11: Ausweisung von Trockenphasen (hellorange hinterlegt) im Jahr 2022 für die Bäume #16 (oben) und #37 (unten) auf Basis der Matrixpotenzialsensoren (jeweils obere Grafik), der Wärmegeschwindigkeiten mittels Saftstromsensoren (jeweils mittlere Grafik und der Stammumfangsverläufe (jeweils untere Grafik)

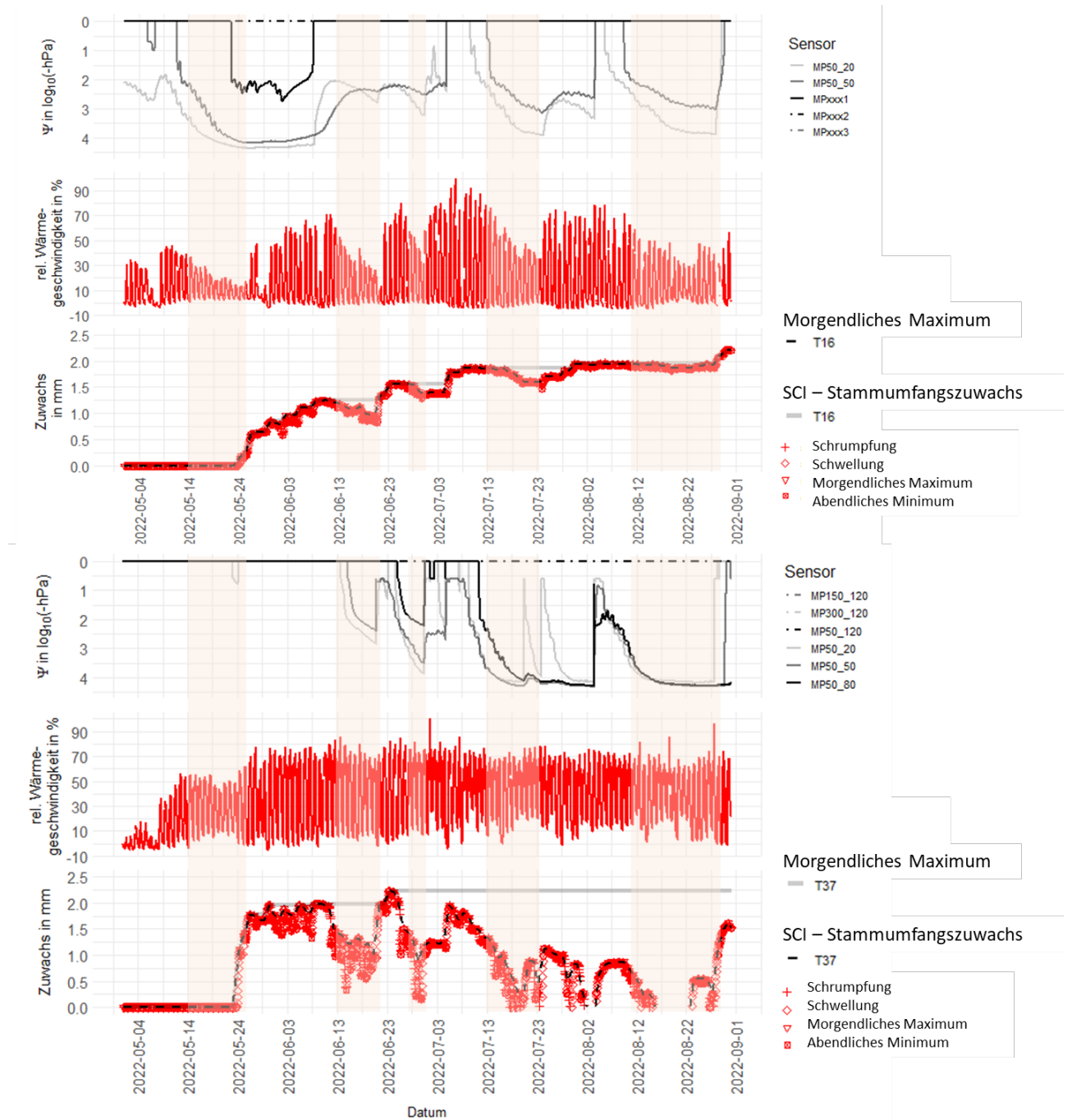
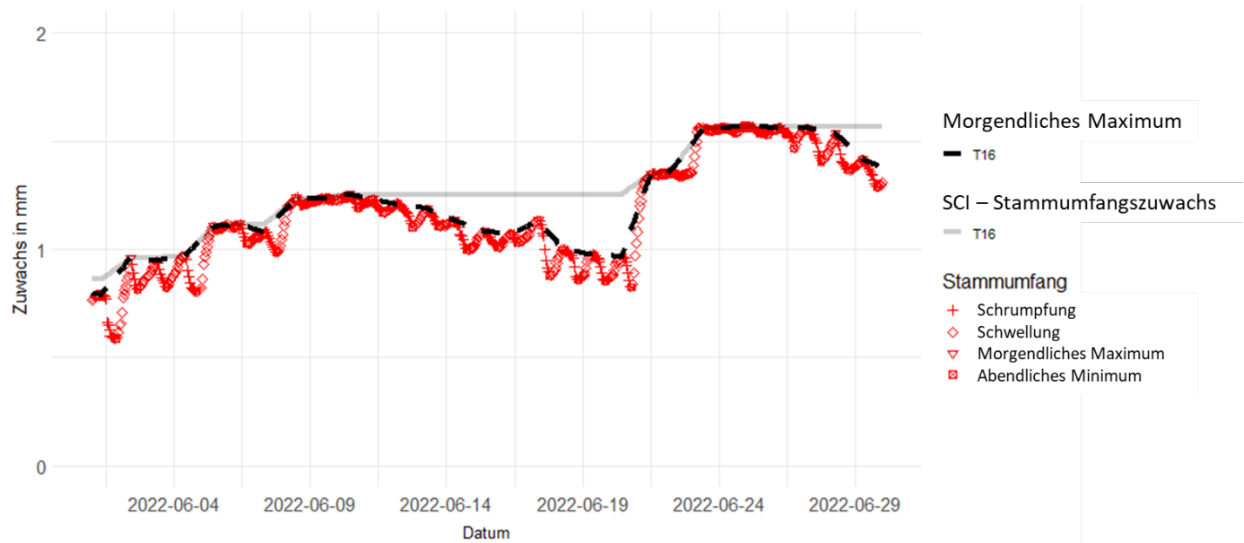


Abbildung 12: Stammumfangsverlauf des Baums #16 im Juni 2022, Differenzierung zwischen Schrumpfung, Schwellung, morgendlichem Maximum und abendlichem Minimum, Darstellung des SCI (=stem circumference increase bzw. Stammumfangszuwachs)



In der Abbildung 11 sind die Verläufe des Matrixpotenzials, der relativen Wärmegeschwindigkeit (relativ zum Maximalwert in der Vegetationsperiode 2022, 15-Minuten-Werte) als Proxy für den Saftstrom, sowie des Stammzuwachses (eingeteilt in die täglichen Phasen der Schwellung und Schrumpfung) für die Kastanie #16 (Neupflanzung, in der Abbildung oben) für die Vegetationsperiode 2022 dargestellt. Hellrot hinterlegt sind visuell auf Basis der Einbußen im Saftstromverlauf ausgewiesene Phasen potenziell reduzierter Bodenwasserverhältnisse im Wurzelraum. In diesen Perioden wurden großteils auch hohe pF-Werte (also trockene Verhältnisse) im Baumsubstrat in den Tiefenstufen 20 und 50 cm gemessen, sowie ein Rückgang des Stammzuwachses. Zum Ende der markierten Zeiträume 2, 3 und 4 steigt die Bodenfeuchtigkeit messbar an und der Stammzuwachs ändert sich von einer Rezession in eine Stagnation oder steigt wieder an. Dies bestätigt weiter die These von Trockenstress in den markierten Zeiträumen.

Eine Gegenüberstellung der ausgewiesenen Trockenstressphasen beim Baum #16 mit den Messwerten des Baums #37 (*Styphnolobium japonicum*, in der Abbildung unten) zeigt ein etwas verändertes Bild vor allem in den baumphysiologischen Reaktionen. Es sind keine graduellen Abnahmen der täglichen Maximalwerte des Proxys für den Saftstrom erkennbar. Der Verlauf des Stammumfangs unterscheidet sich besonders durch den nicht klar erkennbaren kontinuierlichen Stammzuwachs zwischen Mitte Juni und Anfang September 2022. In den markierten Trockenphasen sind auch für diesen Baum Phasen der Rezession oder Stagnation, die durch einen Anstieg des Stammzuwachses beendet werden, erkennbar. Der Verlauf des Matrixpotenzials im Baumsubstrat in den Tiefen 20, 50 und 80 cm unterscheidet sich besonders markant bis Mitte Juni von den Messwerten für den Baum #16. Das Baumsubstrat des Baums #37 unterliegt bis Mitte Juni keinem messbaren Entzug von gespeichertem Bodenwasser, während beim Baum #16 bereits Ende Mai bis Anfang Juni 2023 sehr trockene Verhältnisse bis in eine Tiefe von rund 50 cm vorliegen. Gründe für diesen starken Unterschied könnten beispielsweise der frühere Austrieb der Kastanie (ca. 06.04.2022 im Vergleich zu 18.04.2022), höhere absolute Transpirationswerte der Kastanie, die Transpiration durch die Stauden- und Gräserbepflanzung in der Baumscheibe des Baums #16 (eine solche fehlt beim Baum #37 gänzlich) und die auf Grund der Örtlichkeit länger andauernde Sonneneinstrahlung beim Baum #16 sein. Weiters ist eine höhere unproduktive Verdunstung aus der Baumscheibe des Baums #16 wahrscheinlich. Es sind grundsätzlich alle Baumscheiben mit einer Schicht Splittmulch überdeckt. Im direkten Vergleich der beiden genannten Baumscheiben ist aber jene des Baums #16

wesentlich länger einer direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt, während diese beim Baum #37 auf Grund der raschen Beschattung durch das nebenstehende Wohngebäude ab Mittag (in den Wintermonaten bereits am späten Vormittag), sowie der Platzierung in Mitten des Parkplatzes kaum zu erwarten ist.

Die Beobachtung von Trockenstress bzw. dem Grad der Wasserversorgung über die Messung des Saftstroms mittels der gewählten Heat Pulse-Methode oder der engmaschigen Beobachtung des Stammumfangs ist für unterschiedliche Baumarten verschieden gut oder schlecht möglich. Dies liegt unter anderem an anatomischen Unterschieden, die sich vor allem in der Beschaffenheit und Verteilung der wasserleitenden Xylembahnen äußern. Die Bäume lassen sich grob gesagt in ringporös und diffusporös einteilen. Weiters gibt es auch unterschiedliche Strategien der Baumarten mit variierendem Wasserangebot und drohendem Trockenstress umzugehen. Wie schnell die Bäume die Stomata schließen, um die Transpiration zu reduzieren und auf diese Art eine weitere Verknappung der Wasserressourcen im Wurzelraum einzudämmen, ist beispielsweise unterschiedlich. Dies dürfte zumindest eine Begründung für die offensichtlichen Unterschiede zwischen den Saftstromverläufen der neugepflanzten Kastanien und den Schnurbäumen (Abbildung 11) sein. Zusätzlich hat sich im Laufe des Projekts herausgestellt, dass die gewählten Messgeräte bzw. das dahinterstehende Messprinzip für ringporöse Bäume mit sehr schmaler Xylemdicke auf Grund des vergleichsweise breiten Messbereichs der Nadeln und der damit verbundene teilweisen Messung in nichtleitendem Holz ungeeignet sein dürften. Dies ist bei der Baumart *Styphnolobium japonicum* der Fall. Auch das kann eine Erklärung sein für die fehlende Variabilität in der gemessenen Wärmegeschwindigkeit trotz auf Basis der Bodenwassersensoren naheliegender Trockenstressproblematik. Obwohl der Saftstromverlauf (bzw. die relative Wärmegeschwindigkeit) dies nicht andeutet, ist von einem Trockenstress für den Baum #37 in den markierten Zeiträumen auszugehen, da sowohl der Stammumfangsverlauf, als auch der Bodenwasserspeicher darauf hindeuten. Es ist aber möglich, dass diese Phasen des verringerten Bodenwasserdargebots auf Grund anderer baumphysiologischen Strategien nicht so rasch zu einer reduzierten Transpiration und somit einer reduzierten Verdunstung führen, wie bei der dargestellten Kastanie.

Wie in der Abbildung 11 ersichtlich, ist der Bodenwasserspeicher in der Umgebung der Sensoren im Schwammstadtsubstrat beim Baum #37 bzw. im Bereich der Sensoren außerhalb der Baumscheibe beim Baum #16 (MPxxx2 und MPxxx3) ganzjährig gänzlich gefüllt, da die Wurzelausbreitung noch nicht so weit erfolgt ist. Das bedeutet auch, dass die Örtlichkeit der Wasserzufuhr zum Substrat eine wesentliche Rolle spielt, wenn es darum geht, dass Wasserverluste aus dem Substrat ausgeglichen werden sollen. Der in Anspruch genommene Wurzelraum und somit auch die Örtlichkeit des Wasserentzugs und der Notwendigkeit der Wiederbefüllung verändern bzw. erweitern sich im Laufe der Zeit. Dies ist auch bei der Planung und der Betreuung der Bäume in den ersten Jahren mitzudenken: eine Wasserzufuhr braucht es in den ersten Jahren vor allem in unmittelbarer Baumumgebung! Die Wasserzufuhr und -verteilung im Schwammstadtsubstrat spielt für die Wasserversorgung der Bäume im ersten Jahr noch keine Rolle. Umso wichtiger ist in dieser Phase aber eine Bewässerung der Baumballen und des Baumsubstrats.

Zum Vergleich sind die beiden gewählten Bäume #16 und #37 in derselben Darstellungsform auch im Vegetationsjahr 2023 präsentiert (Abbildung 13). Deutlich erkennbar sind die insgesamt wesentlich stärkeren Zuwächse beider Bäume, wodurch die täglichen Stammumfangsschwankungen in der Darstellung nicht mehr identifizierbar sind. Die hellorange hinterlegten Trockenphasen wurden auf Basis des Saftstromverlaufs von Baum #16 bestimmt. Im Vergleich zum Jahr 2022 sind deutlich geringere Schwankungen und Einbußen in der dargestellten Wärmegeschwindigkeit und somit im Saftstrom sichtbar. In den dargestellten vermuteten Trockenphasen sind auch Stagnationen im Stammzuwachs erkennbar und reduzierte Bodenwasserverhältnisse. Basierend auf dem dargestellten Matrixpotenzial würde man weit längere Trockenphasen vermuten, die sich aber in den

baumphysiologischen Reaktionen nicht eindeutig manifestieren, obwohl beim Baum #37 die Saftstromwerte bis Anfang Juli in Summe geringer sind, als später in der Vegetationsperiode, was auf eine Verbesserung der Wachstumsbedingungen zurückzuführen sein könnte. Auch der Verlauf des Stammumfangs zeigt ein verstärktes Wachstum ab Mitte Juli. Ab Ende Juli sind bei beiden Bäumen deutlich verbesserte Bodenwasserverhältnisse zu beobachten.

Ein sichtbarer Unterschied zwischen den beiden Jahren stellt der erschlossene Wurzelraum des Baumes #37 dar. Der baumnächste Sensor im Schwammstadtsubstrat (MP50-120) zeigt einen deutlichen Wasserentzug. Trotz dieser Wurzelraumausweitung trägt eine ballennahe, rein oberflächliche Zunahme der Bodenfeuchtigkeit zu kurzfristigen Verbesserungen, sichtbar an kleinen Sprüngen im Stammzuwachs bei. Diese beschriebenen Phasen sind an den vier Peaks des Sensors MP50-20 im Juli 2023 zu erkennen.

Es ist grundsätzlich anzunehmen, dass eine Erweiterung des Wurzelraums eine Verbesserung der Wachstumsbedingungen und mehr Stabilität und Sicherheit für den einzelnen Stadtbaum bringt. Die Besonderheit im gegenständlichen Schwammstadtssystem liegt zudem darin, dass der Baum mit der Erschließung des Schwammstadtsubstrats auf einen Bodenwasserspeicher zugreifen kann, der auf Grund von angeschlossenen Einzugsgebieten häufiger und durchdringender aufgefüllt werden kann (bei einer guten Verteilung im System). Beim Bodenwasserspeicher im ballennahen Baums substrat ist hingegen die Durchlässigkeit limitierend und auch nur der Niederschlag relevant, der direkt auf die Baumscheibe fällt. Dass dies bei kleineren und mittleren Niederschlagsereignissen nur zu einer oberflächlichen Durchfeuchtung führt, ist an den beschriebenen Peaks des Sensors MP50-20 sichtbar. Dieser liegt in einer Tiefe von 20 cm.

Weiters nimmt mit der zunehmenden Wurzelraumerkundung die Relevanz des Pflanzballens für die Wasserversorgung der Bäume ab. In diesem Pflanzballen sind keine Bodenwassersensoren platziert, weshalb unbekannt ist, wie gut diese mit Wasser versorgt sind. Die präsentierten Darstellungen und Daten zeigen aber, dass die Bäume #16 und #37 im Jahr 2023 vermehrt auf das Bodenwasser außerhalb des Pflanzballens zurückgreifen, weshalb auch eine Auffüllung dieses Bodenwasserspeichers zunehmend in den Fokus rückt.

Ein Vergleich der Niederschlagssummen zwischen 01.05. und 01.07. der Jahre 2022 und 2023 zeigt, dass die summativen Niederschlagsmengen ident waren (Abbildung 14). Ab Anfang Juli bis Ende August regnete es aber im Jahr 2023 deutlich mehr und auch deutlich öfter als im Jahr 2022. Dies korreliert mit den starken Zuwachsraten in diesem Zeitraum im Jahr 2023.

Abbildung 13: Ausweisung von Trockenphasen (hellorange hinterlegt) im Jahr 2023 für die Bäume #16 (oben) und #37 (unten) auf Basis der Matrixpotenzialsensoren (jeweils obere Grafik), der Wärmegeschwindigkeiten mittels Saftstromsensoren (jeweils mittlere Grafik und der Stammumfangsverläufe (jeweils untere Grafik)

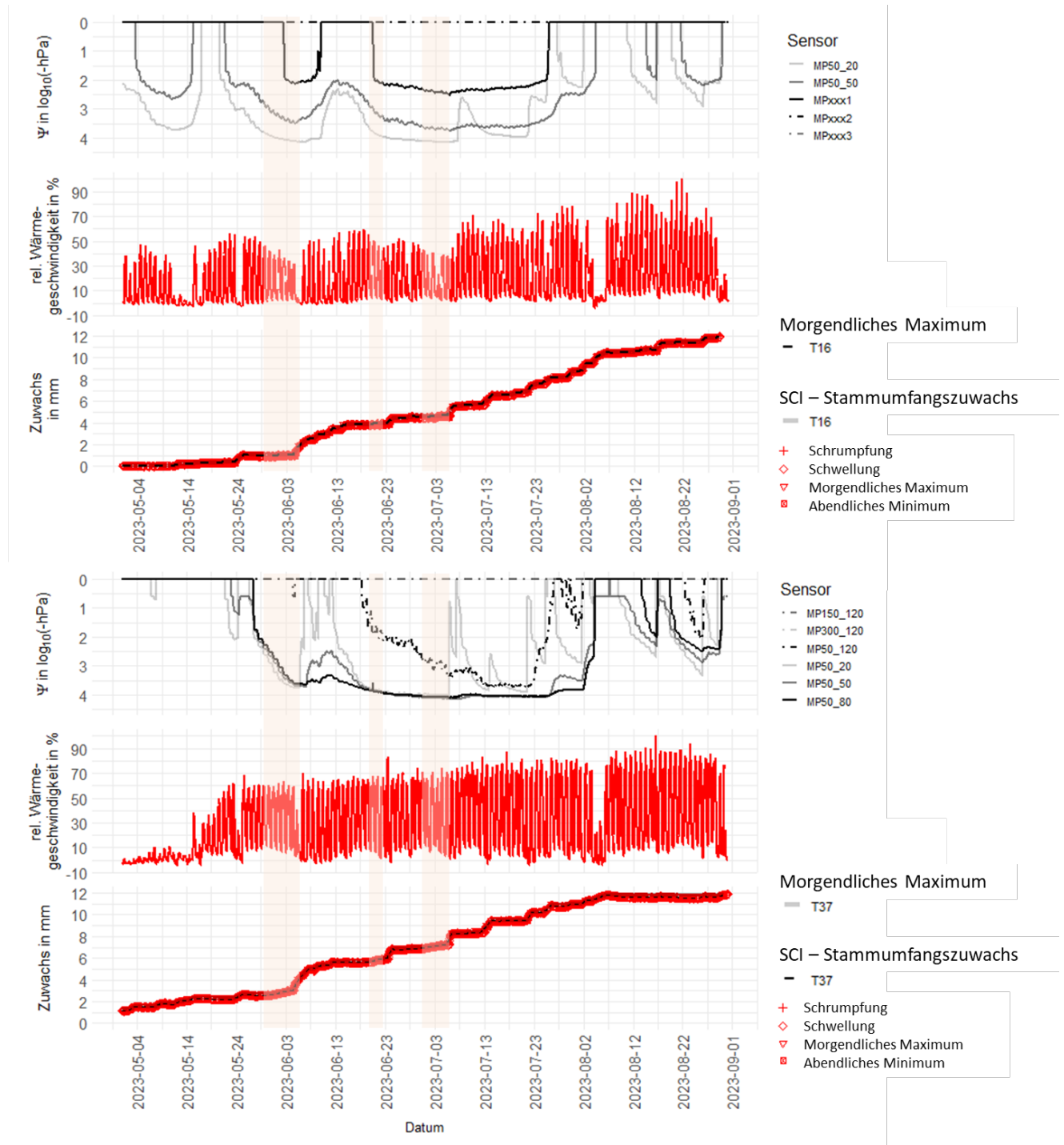
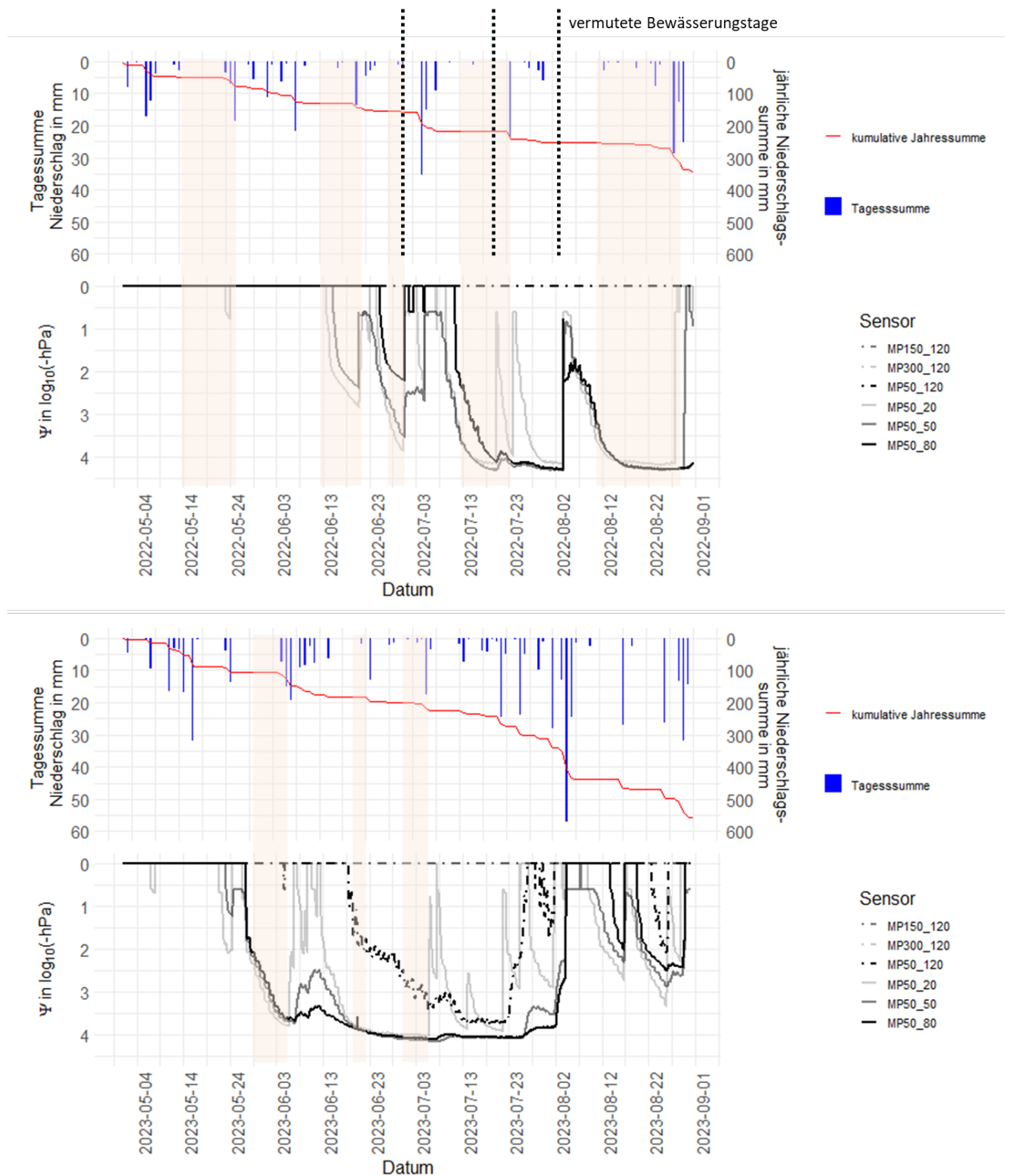


Abbildung 14: Gegenüberstellung der täglichen und kumulativen Niederschlagssummen im Zeitraum 01.05. bis 31.08. in den Jahren 2022 (oben) und 2023 (unten), sowie Kopplung mit den Matrixpotenzialverläufen der Sensoren beim Baum #37



Ein Vergleich der Niederschlagsdaten mit den Bodenwasserhaushaltsdaten bei Baum #37 lässt auch Rückschlüsse auf vermutete Bewässerungstage zu. Hiervon hat es im Jahr 2022 wahrscheinlich drei gegeben, während im Jahr 2023 basierend auf den präsentierten Daten keine Bewässerungstage

identifizierbar sind. Der erste Bewässerungstag Ende Juni 2022 hat sichtbar zur Beendigung der Trockenperiode geführt. Der zweite Bewässerungstag hat die Trockenperiode noch nicht beendet, aber eventuell dazu beigetragen, dass dies die Folge des Niederschlags nur kurze Zeit darauf war. Der dritte Bewässerungstag Anfang August führte ebenfalls zur Beendigung kritischer Bodenwasserverhältnisse beim Baum #37, der Baum #16 – auf Basis dessen die Ausweisung der Trockenphasen erfolgt ist – zeigte hier pflanzenphysiologisch allerdings keine Einbußen.

Die Ausweisung der vermuteten Bewässerungstage macht deutlich, wie wichtig eine Anwuchspflege mit regelmäßigen Gießintervallen – besonders in Jahren mit längeren Trockenphasen – für die Baumvitalität und das Anwachsen am neuen Standort ist. Besonders ein stammnahes Bewässern, das auch den Pflanzballen befeuchtet, ist in dieser Phase essenziell.

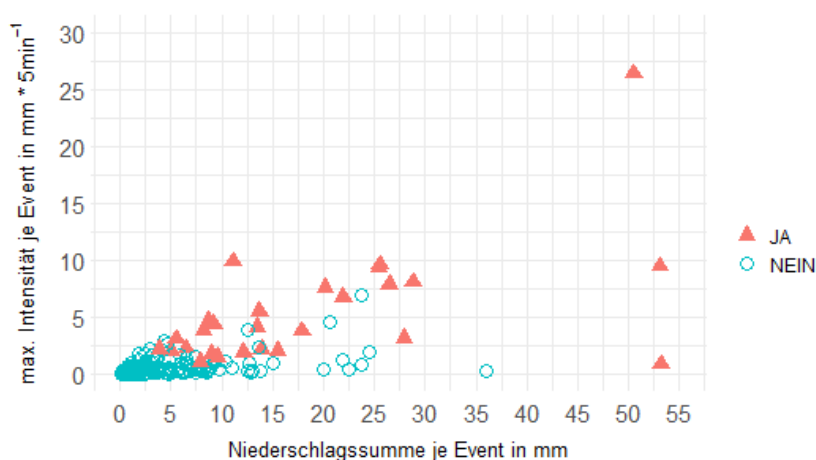
## 5.5. Wasserzuflüsse und Wasserverteilung

Basierend auf den beschriebenen Kriterien wurden 283 Niederschlagsereignisse identifiziert.

### 5.5.1. Wasserzufluss über Tiefbeet

Die Auswertung des Drucksensors im Tiefbeet detektierte 34 Events, wobei diese 27 unterschiedlichen Niederschlagsereignisse zuzuordnen sind. Eine Messung des Wasserstandes im Tiefbeet setzt voraus, dass eine Wasseranspiegelung in erfassbarem Ausmaß passiert, was wiederum zum einen von der Durchlässigkeit des Bodenfiltersubstrats und andererseits vom Niederschlagsereignis und dem daraus resultierenden Zufluss abhängt. Bei den detektierten Events handelt es sich vor allem um größere Niederschlagsereignisse, wobei die maximale Niederschlagsintensität hierfür wichtiger ist als die Niederschlagssumme des Events (Abbildung 15).

Abbildung 15: Darstellung der Niederschlagsereignisse mit ihrer Charakteristik, die zu einem messbaren Wasseranstau im Tiefbeet geführt haben (JA = detektiertes Tiefbeet-Event)



Auf Basis der gemessenen Wasserstanddaten konnte eine relative hohe Durchlässigkeit des Bodenfiltermaterials von im Mittel rund  $7 \cdot 10^{-5}$  m/s errechnet werden. Dieser liegt innerhalb des vorgegebenen Bereichs laut ÖNORM B 2506-2 (2012). Den ursprünglichen Berechnungen des Tiefbeets wurde ein Wert von  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s zu Grunde gelegt, was zu mehr Anstauereignissen geführt hätte.



Weiters war die spezielle Auslaufbox, die vor dem untersuchten Tiefbeet installiert wurde, die erste im Bauverlauf, die nicht korrekt konstruiert und eingebaut wurde, sodass nachträgliche Schweißarbeiten notwendig waren und die Installationshöhen der Leitbleche niedriger blieben als geplant. Zusätzlich traten in den Beobachtungsjahren Ausschwemmungen von Bodenfiltermaterial in darunterliegende Hohlräume auf, sodass das Tiefbeet ein deutlich sichtbares Loch bekam. Ein weiterer Unterschied zur Planung bestand in den tatsächlichen Einzugsgebietsflächen, die in das untersuchte Tiefbeet entwässern. Eine unsaubere Ausführung der Asphaltoberfläche beim Tiefbeet weiter nördlich führte dazu, dass in das untersuchte Tiefbeet im Hauptmessbereich eine größere Einzugsgebietsfläche entwässert, als angenommen (vermutet rund 1,5-1,8-faches EZG).

Ein im Zuge eines weiterführenden Projekts durchgeführter Versuch zeigte, dass eine Verteilung des Wassers bis ans andere Ende des Tiefbeets (ca. 4 m Entfernung von der Auslaufbox) nur bei starken, Zuflüssen möglich ist – wobei hier auch die Neigungsverhältnisse einen Einfluss haben. Mit Wasser beaufschlagt wird regelmäßig vor allem das erste Viertel der Tiefbeetlänge. Der Drucksensor sitzt in einer Entfernung von rund 50 cm vom Zulauf, was bedeutet, dass es auch zu nicht detektierten Wasseranstauereignissen im Tiefbeet im direkten Nahbereich des Zulaufs gekommen sein kann.

Ab einem gewissen Wasserstand im Tiefbeet – bzw. im Nahbereich der Auslaufbox - fließt das zuströmende Straßenwasser bereits in der Auslaufbox über den Überlauf in das Verteilrohr der Schwammstadt. Das direkte Zuströmen von Wasser über diesen Überlauf in die Schwammstadt (ohne Bodenfilterpassage) ist gemäß den Daten bei mindestens 4 Events im Jahr 2023 passiert. Für das Jahr 2022 kann dies auf Grund einer anderen Art der Sensorinstallation nicht gesichert ausgewertet werden. Auf Grund der raschen Infiltrationsrate und des Messintervalls von 5 Minuten, ist es nicht auszuschließen, dass kurzfristige Wasserhöchststände im Tiefbeet nicht aufgezeichnet wurden.

### **5.5.2. Wasserzufluss über Dachwasser**

Die Ganglinie des Dachwasserzuflusses über das Verteilrohr folgt der Niederschlagsintensität rasch und direkt, sodass beide Ganglinien ein sehr ähnliches Bild aufweisen (Abbildung 16). Grundsätzlich ist bei ungefilterten Abflüssen von Dächern mit einer solchen Zuflussganglinie zu rechnen, in diesem Fall wird der Effekt aber vermutlich durch die große Steilheit des angeschlossenen Daches und die geringe Distanz zum Schwammstadtsystem verstärkt.

Eine Gegenüberstellung der vom Dach zufließenden Wassermengen mit den zugehörigen Niederschlagsereignissen deuten auf eine abflusswirksame Einzugsgebietsfläche von etwas mehr als 80 m<sup>2</sup> hin (Abbildung 17). Dies stimmt gut mit einer Abschätzung der angeschlossenen Dachfläche mittels Orthofotos überein, im Zuge derer rund 75 m<sup>2</sup> Dachfläche ermittelt wurden.

Von 167 Niederschlagsereignissen im Beobachtungszeitraum, die eine Niederschlagssumme >1 mm aufwiesen, wurde für 158 Events mit der beschriebenen Methode ein Zufluss über das Verteilrohr ins Schwammstadtsystem festgestellt und der zugehörige Volumenstrom errechnet. In Summe wurden 103 m<sup>3</sup> Wasserzufluss über das Verteilrohr für den Beobachtungszeitraum errechnet. Der Großteil floss in den Sommermonaten der beiden Jahre ins System, in den Wintermonaten ist der Zufluss nur gering (Abbildung 18). Dieser Effekt ist auf Grund der Häufung von Starkregenereignissen im Sommer auch so zu erwarten.

Abbildung 16: Gegenüberstellung Niederschlagsdaten mit berechneten Zuflussraten des Dachwassers über das Verteilrohr am 23. und 24.05.2023.

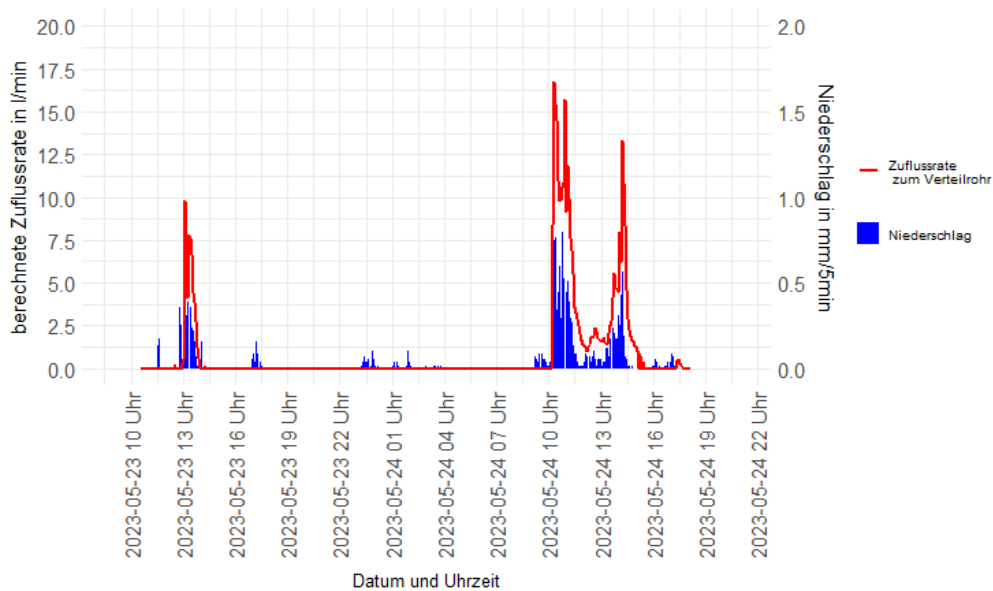
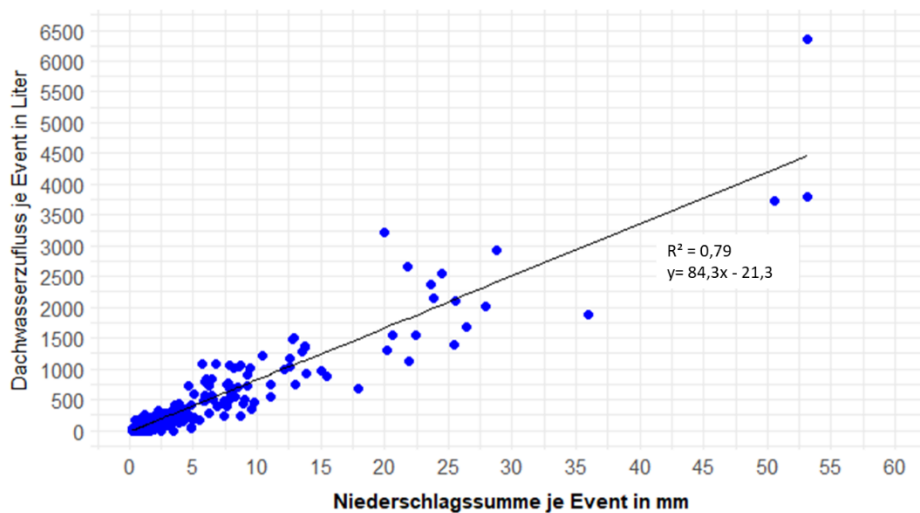
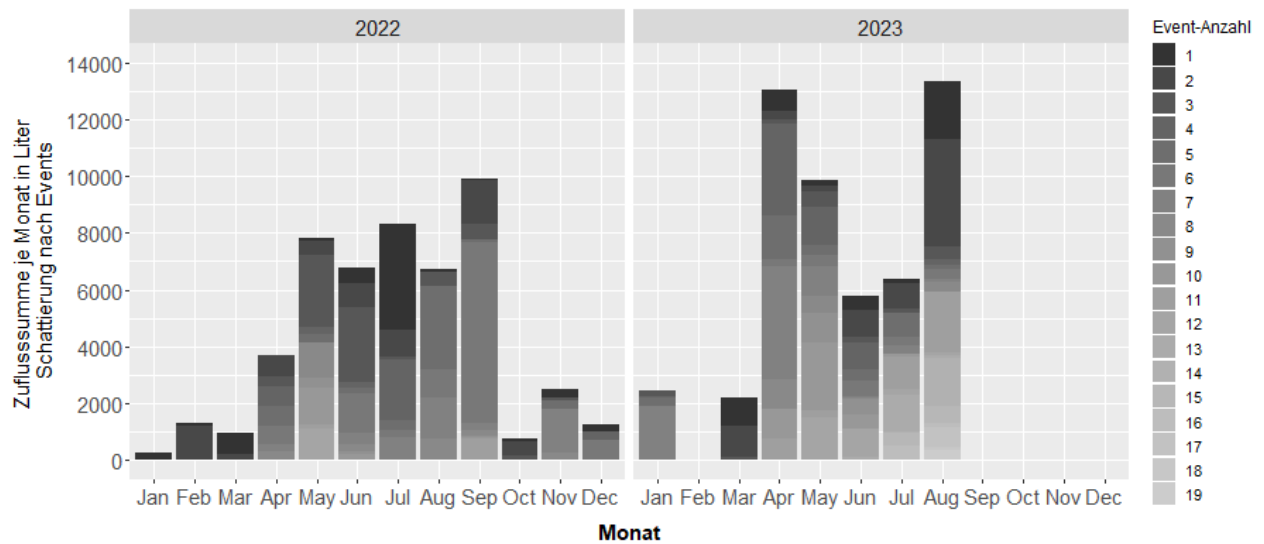


Abbildung 17: Vergleich der Niederschlagssummen je Event mit dem errechneten Dachwasserzufluss je Event



Der ausgewählte Hauptmessbereich im Leonhardgürtel West, in welchen auch der untersuchte Dachwasserzufluss über das Verteilrohr fließt, weist vereinfacht in etwa  $80 \text{ m}^3$  Schwammstadtsubstrat auf einer Fläche von rund  $130 \text{ m}^2$  auf. Bei einem Einschlämmgrad von 25 % und den bodenhydrologischen Eigenschaften, wie in Tabelle 2 angeführt, ergibt dies einen pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher von und 4000 Litern rein im Schwammstadtsubstrat. Unter der Annahme einer perfekten Verteilung des zufließenden Wassers über ein funktionierendes Verteilrohrnetz in der Belüftungs- und Verteilschicht und einer gleichmäßigen zeitlichen Verteilung der Events wären in den Sommermonaten 2022 rund 1,5 bis 2 und in den Sommermonaten 2023 bis zu 3 gänzliche Auffüllungen des Bodenwasserspeichers je Monat alleine durch die Dachwassereinleitung möglich gewesen.

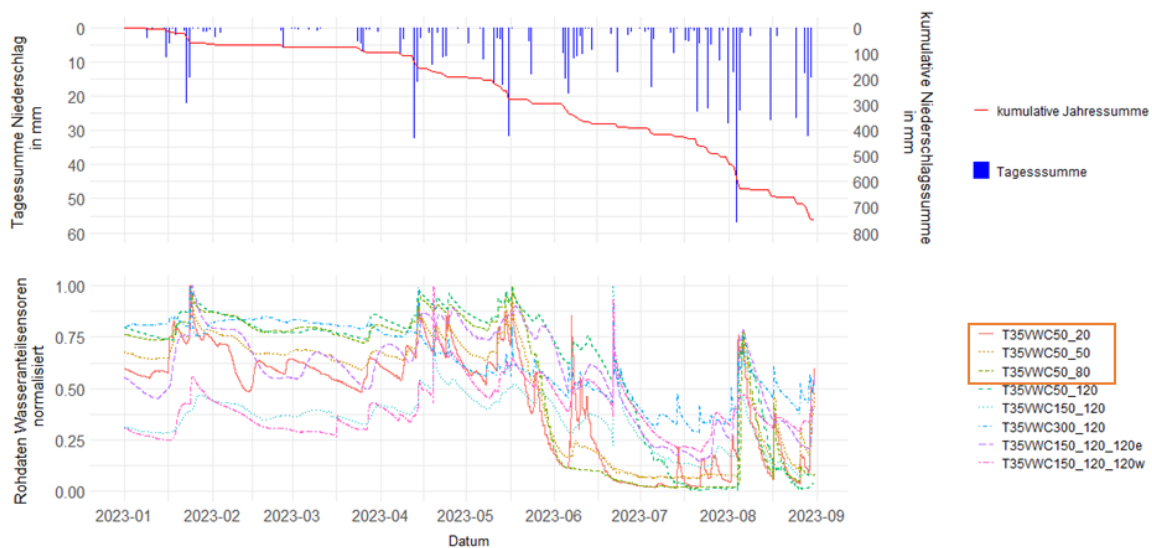
Abbildung 18: Monatliche Zuflussmengen über das Verteilrohr, aufgeteilt nach Events (zeitlich, d.h. Event 1 war das erste im betreffenden Monat)



### 5.5.3. Wasserzuflüsse über die Fläche

Beinahe die gesamte umgestaltete Oberfläche in den beiden Standorten Leonhardgürtel Ost und West ist versickerungsoffen ausgeführt (Ausnahme: rund 40 m<sup>2</sup> im nördlichen Bereich von Leonhardgürtel West). Je nach Schichtaufbau, Oberflächengestaltung und der damit verbundenen Durchlässigkeit, einer etwaigen temporären Bedeckung der Oberfläche durch z. B. parkende Autos oder das zunehmend größer werdende Blätterdach der gepflanzten Bäume, sowie auch Exposition im kleinskalig heterogenen städtischen Umfeld kommt der oberflächlich auftreffende Niederschlag in unterschiedlicher Menge und Geschwindigkeit im Schwammstadtsubstrat an. Diese Heterogenität wird in der Abbildung 19 deutlich, die die unterschiedliche Reaktion von Wassergehaltssensoren in der Umgebung des Baums #35 im Jahr 2023 zeigt. Während die Sensoren 50\_20, 50\_50 und 50\_80 im Baums substrat in zunehmender Tiefe eingebaut sind, sind die anderen 5 Sensoren im Schwammstadtsubstrat unterhalb der Parkfläche installiert. Der Sensor mit dem Suffix „w“ wird zusätzlich bei starken Niederschlagsereignissen mittels direkten Zuflusses über das Verteilrohr beaufschlagt – dies ist an ausgeprägten Peaks erkennbar. Es ist ersichtlich, dass der oberflächlichste Sensor im Baums substrat am häufigsten messbar mit Sickerwasser bespeist wird, während die Sensoren im Schwammstadtsubstrat vor allem bei kleinen Niederschlagsereignissen, wie beispielsweise im Winterhalbjahr, kaum oder nur schwache Reaktion zeigen. Bei starken Ereignissen hingegen gibt es zum Teil auch ausgeprägte Peaks bei den Schwammstadtsensoren, die rein über die oberflächliche Versickerung mit Wasser beaufschlagt werden – wenn auch meist deutlich geringer als bei den Baums substrat-Sensoren.

Abbildung 19: Verläufe der Wasseranteilssensoren des Baums #35 als gemessene Rohwerte normalisiert auf das absolute Minimum und Maximum des jeweiligen Sensors abhängig von den Tagesniederschlagssummen (obere Grafik)



#### 5.5.4. Bewertung der Zuflussarten und Wasserverteilung

Eine versickerungsoffene Oberfläche über dem Schwammstadts substrat bietet den Vorteil, dass auch bei ungünstiger Verteilung der direkten Wasserzuleitungen im Untergrund eine Befeuchtung des Substrats erfolgt. Der Anschluss von zusätzlichen Einzugsgebieten über eine Direkteinleitung in die Belüftungs- und Verteilschicht (wichtig: gering belastete Flächen, oder reinigendes Element) bietet aber den Vorteil erheblich größere Wassermengen in die Schwammstadt einzuleiten, bei Flächen mit hohem Abflussbeiwert, wie beispielsweise Dachflächen, eine häufige Wassereinleitung bereitzustellen und überhaupt erst den siedlungswasserwirtschaftlichen Vorteil der Retention von Niederschlagswasser zu kreieren. Eine oberflächlich konzentrierte Infiltration über Bodenfilterbecken bietet den Vorteil auch verschmutzte Oberflächenwässer in die Schwammstadt einzuleiten und kann zudem ästhetisch und biodivers in die Gestaltung eingegliedert werden. Der Bodenwasserspeicher des Schwammstadts substrats wird in einem solchen Fall aber nur lokal, unterhalb und rund um das Tiefbeet, gefüllt. Gibt es zusätzlich eine Differenzierung zwischen erstem Spülstoß und saubererem Wasser, das mittels Überlaufs in das direkte Verteilsystem ausgeführt wird, so wird zumindest bei starken Niederschlagsereignissen der Vorteil der Direktzuleitung genutzt. Ein solches Vorgehen ist normativ aber (noch) nicht verankert. Der Anschluss von Einzugsgebieten über Rohrzuleitungen bietet zudem den Vorteil, dass diese trotz räumlicher Entkopplung vom Schwammstadtsystem genutzt werden können.

Im Vergleich mit Straßenwasser bietet Dachwasser gegenüber Straßenwasser mehrere Vorteile für die Nutzung als Wasserressource im Schwammstadtsystem. Bei Straßenwasser besteht die Gefahr, dass ohne eine Vermessung der Oberfläche, nur basierend auf Plänen auf Grund von nicht optimal ausgeführten Oberflächenneigungen mit falschen Einzugsgebietsflächen gerechnet wird. Weiters unterliegen Straßenoberflächen häufigen Reparatur- und Aufgrabungsarbeiten, wodurch Neigungen verändert werden können, Mulden, Rinnen, und Abflusswege entstehen, die vorgesehene Einzugsgebiete und deren Zuflusswege zum System verändern. Auch eine Beeinträchtigung des Oberflächenabflusses im Niederschlagsfall durch parkende und fahrende Autos, Müll und

organisches Material, wie z. B. Blätter, die die Einlaufschächte maßgeblich verschließen können, führen zu einer Manipulation des Abflussgeschehens. Dachflächen sind diesbezüglich beständiger, unbeeinträchtigt und einfacher rechnerisch zu berücksichtigen. Weiters bieten Dachflächen den Vorteil, dass diese in der Regel – je nach Oberflächenbelag – laut ÖWAV Regelblatt 45 (2015) in eine geringere Verschmutzungskategorie fallen und direkt eingeleitet werden können. Zu empfehlen ist aber trotzdem eine Art Absetz- und/oder Grobfiltervorrichtung, um ein massiges Zufließen von Feinsediment ins Verteilrohr zu verhindern.

Der Planung der Wasserverteilung im System sollte eine besonders große Wichtigkeit eingeräumt werden, wenn die Oberflächen versiegelt sind, nur geringe hydraulische Durchlässigkeiten haben, oder Gefahr laufen, diese im Laufe der Zeit zu verlieren. Das im Leonhardgürtel gewählte Vollsickerrohr, das rund 0,5 bis 1,0 m vom westlichen Rand des Hauptmessbereichs mit einer Neigung von rund 1 % verlegt wurde, stellte sich im Rahmen eines Versuches in einem Zusatzprojekt als wenig geeignet heraus. Das zufließende Dachwasser war bei starken Zuflussraten von 4-5 l/s (der höchste im Beobachtungszeitraum gemessene Zufluss lag bei rund 3,2 l/s) nach 10-15 m und bei kleineren, für das angeschlossene Dacheinzugsgebiet realistischeren und häufigeren Zustromraten von 0,8 l/s bereits nach 5-8 m gänzlich aus dem Verteilrohr in die umgebende Belüftungs- und Verteilschicht bzw. das darunterliegende Schwammstadtsubstrat infiltriert. Die restlichen rund 20 m Länge des Hauptmessbereichs erfahren somit selbst bei Starkniederschlagsereignissen keine Wasserbeaufschlagung über das Verteilrohr. Als Alternative werden in Österreich zunehmend waagrecht verlegte Teilsickerrohre verwendet, die über die Rohrlänge in ungefähr gleichem Ausmaß Wasser an die Umgebung abgeben. Auch die Aufteilung auf mehrere verschiedene Einleitungspunkte wäre denkbar.

## 5.6. Kühlungseffekt

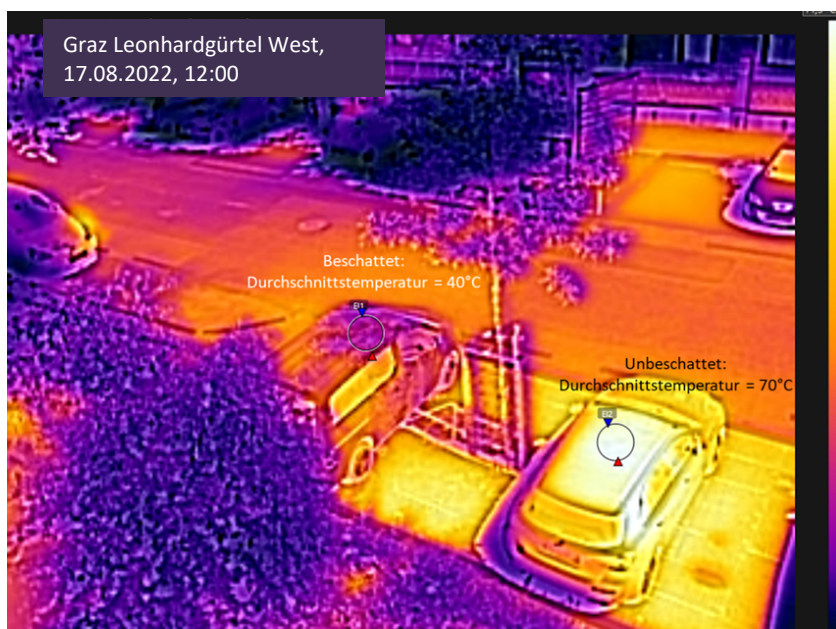
Sowohl auf Basis zahlreicher wissenschaftlicher Literatur als auch basierend auf persönlichen Erfahrungen der städtischen Bevölkerung ist der Kühlungseffekt von Stadtbäumen grundsätzlich bekannt. Die hierbei maßgeblichen Mechanismen sind die Transpiration und die Beschattung (führt z.B. zur direkten Kühlung der Oberfläche, siehe Abbildung 20), wobei der Anteil und die Größe des Kühlungseffekts des jeweiligen Mechanismus stark von den Standortbedingungen und der Baumart abhängen (Stratopoulos-Le Chalony, 2020). Klar ist aber, dass es für beide Prozesse einen vitalen Baum mittleren Alters und Größe, sowie eine belaubte und voluminöse Krone mit einer möglichst großen Anzahl an Blättern braucht. Um dies zu erreichen, braucht es einen großen Wurzelraum und ausreichend Wasser. Hier setzt das Schwammstadtprinzip an.

Eine Quantifizierung des Kühlungseffekts war nicht das Hauptziel dieses Projekts. Vielmehr soll geprüft werden, ob sich das neuartige Schwammstadtsystem (multifunktionaler Wurzelraum) als Grundlage für langjähriges, vitales Baumwachstum mit ausreichender Wasserversorgung eignen kann. Die ersten Ergebnisse aus dem Monitoring im Leonhardgürtel geben durchaus Grund zur Hoffnung. Das Schwammstadtsubstrat wird durchwurzelt, das enthaltene Schlämmkorn (Feinsubstrat) dient als Bodenwasserspeicher, verschiedene urbane Wasserquellen können zur Wiederauffüllung dieses Bodenwasserspeichers herangezogen werden, die Baumvitalität und der Zuwachs in den ersten beiden Jahren sehen vielversprechend aus. Weiters spricht die Tragfähigkeit des Systems dafür, dass sich auf diese Art eine Vielzahl von Bäumen im urbanen Raum pflanzen lassen, ohne große Interessenskonflikte bezüglich der städtischen Oberflächengestaltung

hervorzurufen. Weiters konnten im Leonhardgürtel beidseits große zusammenhängende Schwammstadtkörper errichtet werden, die eine Verbindung des Wurzelraums der einzelnen Bäume zulassen – auch dies ist ein Vorteil dieses Systems. Der Bodenwasserspeicher des Schwammstadtsubstrats ist im Vergleich zu jenem von gewachsenem Boden zwar gering, und auch geringer als jener eines guten Baumsubstrats, auf Grund der Systemkonzipierung und der hohen Durchlässigkeit des Substrats bietet der Anschluss von zusätzlichen Einzugsgebietsflächen aber Potenzial für eine regelmäßige und möglichst umfängliche Auffüllung dieses Bodenwasserspeichers über die gesamte Substrattiefe. Dies bedeutet auch, dass selbst aus kleinen Niederschlagsereignissen ein bedeutend größerer Wasserzufluss generiert und nutzbar gemacht werden kann, als dies mit dem auf die Fläche auftreffenden Niederschlagswasser der Fall wäre.

**Aus derzeitiger Sicht spricht somit alles für eine Verbesserung des Kühlungseffekts durch die Pflanzung im Schwammstadtsystem im Vergleich zu einer durchschnittlichen Stadtbaumpflanzung.**

Abbildung 20: Thermographische Aufnahme im Leonhardgürtel (Wärmebildkamera FLIR C5) vom 17.08.2022 zur Veranschaulichung des Kühlungseffekts von Bäumen auf die städtische Oberfläche. Bildmitte: Baum #35, *Styphnolobium japonicum*, beidseitig parkende Autos



## 5.7. Grundwasserschutz

Bei der Interpretation der im Bodenwasser gemessenen Stoffkonzentrationen kann auf Grund der vertikal paarweisen erfolgten Installation zwischen vermuteten Auswaschungseffekten aus dem Schwammstadtsubstrat und Einträgen von außen bzw. darüberliegenden Substratschichten unterschieden werden. Sind die Konzentrationsverläufe beider Saugkerzen in Höhe und Verlauf ähnlich, wenn auch zeitverzögert, dann ist davon auszugehen, dass es einen Stoffeintrag von oberhalb der oberen Saugkerze gab. Ist hingegen nur die Konzentration eines Stoffes im Bodenwasser der unteren Saugkerze erhöht, so deutet dies auf Auswaschungseffekte aus dem Schwammstadtsubstrat hin. In der Abbildung 21 werden die Konzentrationsverläufe für Chlorid und Nitrat gezeigt, welche beide auf Grund ihrer negativen Ladung als sehr mobil im Boden gelten. Die

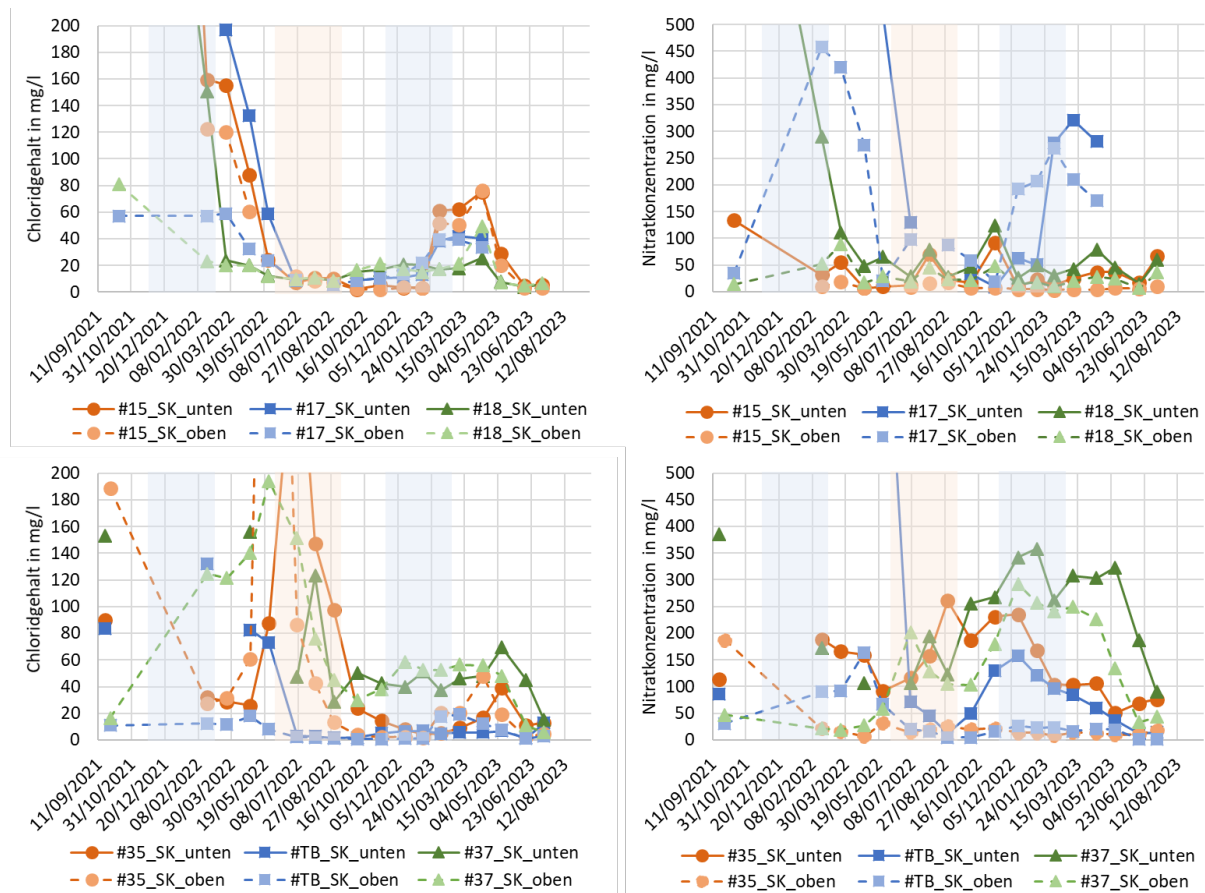
Baumnummern beschreiben die ungefähre Position der Saugkerzen – es wird jeweils der Baum genannt, in dessen Nähe die Saugkerzen positioniert sind – und die Suffixe „oben“ und „unten“ kennzeichnen, ob es sich um das Bodenwasser der oberen oder unteren Saugkerze handelt. In den Diagrammen wurde auf die Darstellung der einzelnen Ausreißer mit hohen gemessenen Konzentrationen zu Gunsten einer besseren Veranschaulichung des Verlaufs über den Großteil des untersuchten Zeitraums verzichtet. Bei der Interpretation der gemessenen Werte spielt besonders die Platzierung der Saugkerzen und der daraus folgende Schichtaufbau darüber eine große Rolle. Weiters wären die Niederschlags- und Sickerwassermengen zwischen den einzelnen Messzeitpunkten, sowie die Bodentemperaturen relevant.

Die hohen Chlorid-Konzentrationen bei den unteren Saugkerzen der Bäume #17 und #18 im Vergleich zu wesentlich niedrigeren Konzentrationen im Bodenwasser der oberen Saugkerzen zu Beginn der Untersuchungsperiode lassen Auswaschungseffekte aus dem Schwammstadtsubstrat vermuten. Beim Baum #15 zeigt sich dies nicht so eindeutig, allerdings sind diese Saugkerzen auch im Bereich des Parkplatzes eingebaut, während die Saugkerzen des Baums #17 im Bereich der Baumscheibe liegen – also unterhalb von Baums substrat - und jene des Baums #18 direkt an der Grenze der Baumscheibe zur Parkfläche, wo allerdings keine Autos parken können. Der zweite Peak, der in unterschiedlicher Größenordnung im Zeitraum Jänner bis April 2023 für alle genannten Saugkerzen sichtbar ist, deutet auf eine Beeinflussung aller Saugkerzen durch externe Chlorideintragung, vermutlich Streusalz, hin. Denkbar ist dies insofern, als alle Saugkerzen unweit der Grenze zur Straße und/oder Parkfläche liegen. Ein Eintrag über beispielsweise zusammengesobene Schneehaufen, oder auch ein direkter Eintrag über die Parkfläche ist somit möglich.

Die Nitratkonzentrationsverläufe deuten im Falle des Baumes #18 auf Nitratauswaschungsprozesse aus dem darüberliegenden Baums substrat hin, da sich die Verläufe der oberen und unteren Saugkerze stark ähneln. Die (nicht dargestellte) Höchstkonzentrationen der unteren Saugkerzen für die Bäume #17 und #18 lassen einen anfänglichen Auswaschungsprozess aus dem Schwammstadtsubstrat vermuten. Warum dies beim Baum #15 nicht zu sehen ist, ist nicht klar, es könnte aber mit einer stärkeren Wasserbeaufschlagung der Bereiche um die Saugkerzen #17 und #18 zu tun haben. Da diese in bzw. direkt angrenzend an die Baumscheibe positioniert sind, und diese nach der Baum- und Stauden-/Gräserpflanzung mehrmals eingegossen wurden, hingegen der Bereich rund um die Saugkerzen #15 nur über direkten Niederschlag gespeist wird, können Auswaschungsprozesse rascher stattfinden. Die Chloridverläufe sind mit dieser These allerdings nicht vollständig kongruent.

Für die Saugkerzen der Bäume #35 und #37 wäre zu erwarten, dass diese auf Grund ihrer Positionierung unterhalb von benützbaren Parkflächen ähnliche Konzentrationsverläufe liefern. Warum dies nicht der Fall ist, kann nicht geklärt werden. Hinsichtlich der Chloridkonzentration sieht es bei beiden Saugkerzenbereichen so aus, als gäbe es eine Beeinflussung durch Eintrag von außen/oben, da jeweils die obere und untere Saugkerze ähnlichen Verläufen folgen. Im Vergleich zu den Peaks bei den Saugkerzen im Leonhardgürtel Ost, sind diese hier zeitlich etwas später – vor allem der erste Peak. Dies würde bedeuten, dass die Chlorideinträge von oben langsamer durch den Aufbau sickern, was durch ein anderes Material, dickere Schichten oder weniger Wassereintrag verursacht werden könnte. Beispielsweise die Tragschicht war für die beiden Standorte (Ost und West) von unterschiedlichen Abbaustellen und unterschiedlichen geologischen Ursprungs – dies war auch visuell sichtbar. Weiters liegen die Saugkerzen im Leonhardgürtel West etwas tiefer, also mit einer stärkeren gesamten Schichtdicke überdeckt, als im Leonhardgürtel Ost.

Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der Chlorid- und Nitratgehalte im analysierten Bodenwasser im Zeitraum September 2021 bis Juli 2023; Sommer hellrot, Winter hellblau schattiert



Für das abgesaugte Bodenwasser im Bereich des Tiefbeets sind auf Grund des stark unterschiedlichen Aufbaus darüber, der Abwesenheit von Kfz-Verkehr und des besonderen Wassereintragsregimes abweichende Konzentrationsverläufe zu erwarten, was auch teilweise erfüllt wird. Es scheint, als hätte es in den ersten beiden Jahren keinen nennenswerten Eintrag von Chlorid von außen bzw. oben gegeben. Einerseits entspricht dies nicht der Erwartung, da das Tiefbeet dazu dient, um Straßenwasser einer Einzugsgebietsfläche von rund 100 m<sup>2</sup> aufzunehmen und zu versickern, andererseits braucht es größere Niederschlagswasser- oder Schmelzmengen, um einen nennenswerten Abfluss ins Tiefbeet zu erzeugen, der sich auch im Tiefbeet bis zur Position der Saugkerzen durch Anstau ausbreitet. (Die Saugkerzen sind etwas mehr als 1 m vom Zuflusspunkt entfernt eingebaut.) Weiters parken keine Autos in diesem Bereich, und das Räumfahrzeug kann keinen Schnee in das Tiefbeet schieben, weshalb diese Eintragspfade eher auszuschließen sind. Die Nitratkonzentrationsverläufe lassen sowohl bei den Saugkerzen beim Baum #35 als auch bei jenen unterhalb des Tiefbeets vorrangig einen Austragsprozess infolge der Mineralisierung aus dem Schwammstadtsubstrat vermuten, da die oberen Saugkerzen kaum Konzentrationsanstiege zeigen. Weshalb dies bei den Saugkerzen beim Baum #37 doch der Fall ist, kann nicht erklärt werden.

Wird Chlorid in den Wurzelraum von Bäumen eingetragen, so wird aus pflanzenphysiologischer Sicht auf Grund der toxischen Wirkung ein möglichst rascher Austrag aus dem Substrat gewünscht. Ein Austrag aus dem Wurzelraum bedeutet aber wiederum einen Eintrag ins Grundwasser.

Für eine Beurteilung des Einflusses auf das Grundwasser sind vor allem die Schadstofffrachten und die Verdünnungseffekte im Grundwasserkörper relevant – Emissionskonzentrationen allein



betrachtet sind hierfür wenig aussagekräftig. Die Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser (QZV Chemie GW, Fassung vom 15.11.2023) gibt Schwellenwerte als Mindeststandards für den guten chemischen Zustand des Grundwasserkörpers vor. Diese liegen für Chlorid bei 180 mg/l und für Nitrat bei 45 mg/l. Der Schwellenwert für Chlorid wird nur im Rahmen der Konzentrationspeaks zu Beginn der Beobachtungsperiode überschritten. Der Schwellenwert für Nitrat hingegen wird beim Großteil der genommenen Bodenwasserproben im Sickerwasser aus dem Schwammstadtkörper überschritten. Dies ist auf Grund der geringen Ausdehnung von Schwammstadtprojekten und deren rein punktueller, sowie seltener Einsatz für den Grundwasserkörper unerheblich. Trotzdem wäre es interessant zu beobachten, wie sich die Stoffkonzentrationen in den nächsten Jahren verändern. Grundsätzlich sollten Nähr- und Schadstoffauswaschungen aus dem Schwammstadt- und Baums substrat geringer werden – zum einen, weil der voranschreitende Mineralisierungsprozess den Nährstoffspeicher zunehmend aufbraucht und zum anderen, weil die sich ausbreitenden Wurzeln auch vermehrt Nährstoffe aus dem Bodenwasser aufnehmen.

### **5.7.1. Auslauf-Box**

Im Umgang mit verschmutzten Oberflächenwässern (v. a. Straßenwasser – F2 und F3) wurde im Rahmen des MUFUWU-Projekts der Ansatz der Differenzierung zwischen erstem Spülstoß und weniger verschmutztem Oberflächenwasser angewandt. Wesentlich dafür war auch die Innovation der sogenannten „Auslaufbox“, die als rein hydraulisch funktionierender Bauteil im Anschluss an einen Straßengully mit entsprechendem Schacht diesen ersten Schwall („First Flush“) zur Reinigung in das baulich integrierte Tiefbeet einleitet. Dadurch füllt sich das Tiefbeet zunehmend, bis der Wasserspiegel einen in der Auslaufbox integrierten Überlauf erreicht. Wasser, das erst dann zum Einlaufschacht und der daran gekoppelten Auslaufbox zuströmt, wird direkt dem Überlauf zugeführt, der in das Schwammstadtsystem mündet. Basierend auf Spülversuchen mit angenommenen Wassermengen für den First-Flush wurde ein Prototyp dimensioniert, der adaptiert für das Projekt MUFUWU als Schlosserarbeit ausgeführt und in den Randstein des Tiefbeets eingebaut wurde.

Mittlerweile konnte das Produkt in Kooperation mit der Firma ACO weiter ausgearbeitet, patentiert, im D-A-CH-Raum zertifiziert und zur Serienproduktreife gebracht werden. Die Auslaufbox ist bei der Firma ACO seit August 2023 mit allen technischen Prüfzeugnissen versehen für den Markt in Österreich, Deutschland und der Schweiz zugelassen. Die Anmeldung zum Patent erfolgte gemeinsam mit der Firma ACO, wobei 3:0 Landschaftsarchitektur das Patentrecht an ACO abgetreten hat.

## **5.8. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“**

Das hier im Zuge einer detailliert aufbereiteten Pilotanlage umfassend untersuchte System Schwammstadt für Bäume ist eine effektive Stadtbegrünungstechnologie zur Anpassung von urbanen Lebensräumen an den fortschreitenden Klimawandel, vor allem durch Wiederherstellung eines kleinräumigen Wasserkreislaufs, der auch den Hitzeinseleffekt reduziert und vitales städtisches Grün, das auch klimawirksam ist. Das System als gesamtes und in seinen einzelnen Elementen ist auf direkte Umsetzbarkeit im realen Maßstab ausgelegt, und mit umfassendem Monitoring-Equipment ausgestattet. Das Gesamtprojekt samt Messeinrichtungen ist so konzipiert, dass Fragen aus der Umsetzungspraxis, auch wenn sie nach Errichtung kurzfristig auftreten, so gut wie möglich

beantwortet werden können. Damit wird der niederschwellige Forschungs- und Entwicklungsgedanke (F & E) aus dem Förderprogramm aufgegriffen.

# 6 Schlussfolgerungen

## 6.1. Praxisrelevante Erkenntnisse

Im Zuge der Projektumsetzung wurde deutlich, dass ein gutes Briefing – besser wäre wahrscheinlich eine Einschulung - der ausführenden Firmen, eine Einbindung möglichst aller Stakeholder von Anfang an, sowie detailgenaue und umfassende Pläne und Ausschreibungsunterlagen wesentlich sind für eine gute Ausführung der Planung. Auch eine wohlwollende und unterstützende Zusammenarbeit basierend auf Kommunikation zwischen der Baufirma und der Galabaufirma, die beide für ein Schwammstadtprojekt benötigt werden, ist wichtig. Um Probleme und Unklarheiten bei den Bautätigkeiten frühzeitig erkennen und aus dem Weg räumen zu können, ist eine regelmäßige Präsenz vor Ort durch die Planung und/oder die Bauaufsicht (ÖBA Grün oder ÖBA Schwammstadt) jedenfalls notwendig (einmal wöchentlich ist zu selten), so lange das System „Schwammstadt für Bäume“ noch nicht als Standardbauweise etabliert ist. Normen, Regelwerke und Erfahrungen durch häufige Projekte dieser Art können diesen Prozess langfristig vereinfachen. Bis die Bauart allerdings ausreichend etabliert und verstanden ist, sind die Kommunikation und Qualitätskontrolle äußerst wichtig und für ein langfristiges Gelingen notwendig!

Abgesehen von den Tätigkeiten beim Bau gibt es weitere Aufnahmen, die von fachkundigen Personen am Ort durchgeführt werden sollten, um die in der Planung getätigten Annahmen zu kontrollieren, etwaige notwendige Umplanungsarbeiten, Nachschärfungen bei der Verdichtung oder Materialreklamationen möglich zu machen. Beginnend mit dem Untergrund und der Feststellung des Versickerungsbeiwertes ( $k_f$ -Ermittlung des Planums), bis zur Kontrolle des zum Einbau vorgesehenen Gesteinsmaterials und dessen Verdichtung, sowie des Schlämmsubstrates und der Begleitung des Einschlammvorgangs (Wassermenge und Wasserdruck) ergeben sich viele Aspekte, die potentielle Gefahrenstellen für die Funktionstüchtigkeit und Effektivität des Systems bedeuten könnten. Solange zu der Bauweise mit ihren örtlich angepassten Bauausführungen noch wenige Erfahrungen bestehen, ist die potentielle Gefahr von Baufehlern groß bzw. vorhanden.

Bei der Auswahl der Verteilrohrart für direkt einzuleitendes Oberflächenwasser ist zu beachten, dass mittels Vollsickerrohr nur kurze Distanzen gespeist werden können (abhängig von angeschlossener EZG-Fläche, Niederschlagsereignis, Neigung des Rohrs) und Substratbereiche in größeren Entfernungen vom Einleitungspunkt kein Wasser mehr erhalten. Hier empfiehlt es sich, zukünftig auf andere Drain- oder Teilsickerrohre zu wechseln, um eine bessere Verteilung des Wassereintrags auf einen größeren Schwammstadtbereich zu erzielen. Bei neueren Schwammstadtprojekten in Österreich wurden Teilsickerrohre in den letzten Jahren auch bereits eingebaut. Hierbei ist dann auf eine horizontale Verlegung des Rohres mit der geschlossenen Seite nach unten zu achten. Auch Vorrichtungen zur Entleerung des Systems sollten mitgedacht werden. Die Verlegung der Einlaufgitter, -schächte und Rohrsysteme durch z.B. Blätter sollte durch geeignete Einlaufsiebe, Absetzbecken, regelmäßige Reinigungen und Spülungen vermieden werden.

**Die Wurzelraumsanierung schien erfolgreich gewesen zu sein, die Bestandsbäume zeigen einen entsprechend starken Zuwachs und haben den sorgsam und fachgerechten Eingriff im Wurzelraum gut überstanden. Dieser Aspekt ist vor allem angesichts der vielen Bestandsbaumstandorte in unseren Städten und Gemeinden wichtig und äußerst relevant.**

Einerseits aus mikroklimatischer Sicht, weil dadurch Bäume längerfristig an ihren Standorten erhalten werden könnten und deren positive Ökosystemdienstleistungen der Allgemeinheit zur Verfügung stehen würden (im Gegensatz zum umgangssprachlich genannten „Angstschnitt“ bei dem viele Baumhalter und Gemeinden Bäume, die in ihrer Wüchsigkeit und Vitalität eingeschränkte Symptome zeigen, vorzeitig fällen), andererseits aus wirtschaftlichen Gründen, da die gärtnerische Pflege, sowie die Fällungen und Neupflanzungen von Bäumen reduziert werden könnten.

Wie in jedem Umsetzungsprojekt, in dem Pflanzen vorgesehen sind und gepflanzt werden, ist auch bei Schwammstadtprojekten die Phase der Anwuchs- und der Entwicklungspflege von besonderer Bedeutung und Wichtigkeit. Ein Baum – egal in welchem Substrat – kann sich nur entsprechend entwickeln, wenn er in der Anfangsphase seiner Entwicklung am endgültigen Baumstandort gepflegt und hier vor allem gegossen wird. Diese Relevanz der Anwuchspflege, Ballen- und Baums substratfeuchtigkeit hat sich auch in den Monitoringdaten der ersten beiden Standjahre gezeigt. Ob diese Anfangsbewässerung über eine regelmäßige Gießtätigkeit, die Befüllung von Gießsäcken oder eine automatische Bewässerung bewerkstelligt wird, obliegt den Gemeinden und ihren Ressourcen. Der Einsatz von Trinkwasser in fix montierten automatischen Bewässerungssystemen ist hier jedoch kritisch zu hinterfragen, da der Ressourceneinsatz in keiner Relation zum tatsächlichen Bedarf der Bäume steht. Ein intelligentes Gießmanagement verlangt von den pflegenden Gärtner:innen, dass sie die Stressmomente der Bäume zeitgerecht erkennen. Die richtige Substrat- und Baumauswahl kann hier sehr behilflich sein. Ziel ist es, den Baum nach der Anwuchs- und Entwicklungspflege möglichst nur mehr durch den natürlichen Niederschlag bzw. den Eintrag aus den Oberflächenwässern zu versorgen.

Auch bei der Verwendung von Vliesen ist große Achtung zu wahren, da die Verwechslungsgefahr der unterschiedlichen Arten von Vliesen und der damit verbundene falsche Einsatz zum Problem werden können. Auch ist es im Bauverlauf üblich, zuerst die Vliese flächig zu verlegen – also auch im Bereich der Baumscheiben - als Schutz gegen Verunreinigung des Schwammstadtkörpers im Zuge von benachbarten Oberbauarbeiten, und diese im Zug der Baums substratbefüllung in der Baumscheibe wieder herauszunehmen. Dies birgt die Gefahr, dass die nachträgliche Korrektur der flächigen Vlieseinbringung im Bereich der Baumscheiben vergessen wird, was erhebliche Einschränkungen bis zu einer nahezu gänzlichen Verhinderung des Wurzelwachstums nach unten führen kann.

Bei der Planung von Bodenfilterbecken kombiniert mit dem Schwammstadtsystem ist wichtig, dass es zu keinen Auswascheffekten des Bodenfiltermaterials kommt. Dies ist auf Grund der groben und hohlraumreichen Struktur des Schwammstadtsubstrats bzw. der Belüftungs- und Verteilschicht, die in der Regel noch dazwischen liegt, besonders heikel. Es bietet sich an mit einem gestuften Aufbau zu arbeiten und unterhalb des eigentlichen Bodenfiltermaterials noch eine Zwischenschicht einzuziehen, oder notfalls geeignete Geotextilien einzusetzen. Weiters ist, um die Funktionalität laut Planung zu gewährleisten, eine Kontrolle von Neigungsverhältnissen und Höhen zu empfehlen – besonders, wenn Überläufe, die beispielsweise für eine Umgehung der reinigenden Bodenfilterpassage vorgesehen sind, mitinstalliert werden. Auch eine Wartung und Spülung der Einlauf- und Absetzschächte ist für die Funktion maßgeblich.

Bei der Berücksichtigung von oberflächenwasserspendenden EZG-Flächen ist zu beachten, dass die Neigungsverhältnisse und die Ausführung der Oberflächengestaltung tatsächlich zu den geplanten Abflusswegen führen. Bei Dachwasser ist dies einfacher sicherzustellen, als dies bei Straßen-EZG oder auch Nebenverkehrsflächen, wie Geh- und Radwegen der Fall ist. Auch im Leonhardgürtel kam es

hier zu einer Divergenz zwischen geplanten und tatsächlichen EZG-Flächen bei zumindest zwei Tiefbeeten. Umbaumaßnahmen am Asphaltbelag können dies auch nachträglich noch verändern. Da die Planung auf einer Dimensionierung mit angenommenen Niederschlagsereignissen und daraus resultierendem Oberflächenwasseranfall basieren sollte, bedeutet dies unter Umständen eine wesentliche Abänderung der angenommenen Planungsgrundlagen und kann zu einer maßgeblichen Einschränkung der Funktionalität führen.

Im Gegensatz zum Straßen- und Tiefbau, sowie der Siedlungswasserwirtschaft der letzten vierzig Jahre bedeutet der Einbau eines Schwammstadtunterbaus einen echten Paradigmenwechsel. Zusätzlich ist der enge Raum in den Bestandsstädten mit einer Vielzahl an Leitungsinfrastruktur nicht mehr mit den Gegebenheiten im Straßenraum von vor 50 oder 70 Jahren zu vergleichen, als große Teile des Straßennetzes in Österreich nach dem 2. Weltkrieg umgebaut wurden. Der Einsatz von großen Maschinen, wie Straßenfertigern etc. trägt zu einer vermeintlichen „Wirtschaftlichkeit“ im Straßenbau bei, die aber auf die Gegebenheiten von Baumstandorten und lokalem Regenwassermanagement keine Rücksicht nehmen. Der oft komplexere Schichtaufbau, der auch örtlich variieren kann – im Bereich eines Bestandsbaumes anders als unter einer Baumneupflanzung, diese unterscheidet sich wieder in einzelnen Schichten vom Aufbau unter dem Tiefbeet – erfordert eine hohe Aufmerksamkeit und Genauigkeit, sowie Plantreue und Offenheit der Bauausführenden. Es handelt sich hierbei um starke Veränderungen im Vergleich zu einem durchschnittlichen Umbau von Nebenverkehrsflächen.

Die Schwammstadt für Bäume ist ein Bauprinzip mit vielen technischen Lösungen, die je nach Ausführung, Zielen, örtlichen Gegebenheiten und dem Vorhandensein von technischen Einbauten unterschiedlich errichtet werden müssen. Notwendige Vorgänge zur Wartung dieser technischen Infrastrukturen und Leitungen werden idealerweise im Vorfeld mit den Zuständigen besprochen und fließen in einen entsprechenden Wartungsplan mit ausgewiesenen Zuständigkeiten, Wartungsintervallen und Wartungsarbeiten mit ein. Diese sind mitunter essenziell für eine zufriedenstellende Funktionsweise des Systems!

## **6.2. Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten**

Die Ergebnisse aus dem Monitoring, sowie die Erfahrungen im Zuge der Planungs- und Bauaktivitäten wurden im Zuge einer Abschlussveranstaltung präsentiert (28.9.2023 im Versuchsgarten der HBLFA für Gartenbau und Österreichische Bundesgärten in Wien-Hetzendorf, Jägerhausgasse 77). Die Teilnehmenden kamen aus weiten Teilen Österreichs und vertraten sowohl die Verwaltung von öffentlichen Gebietskörperschaften (Land NÖ Straßenbau- und Raumplanungsabteilungen, Stadt Wien diverse Magistratsabteilungen, Land Steiermark Straßenbauabteilung, Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Abteilung Siedlungswasserwirtschaft), Bildungs- und Forschungsinstitutionen (BOKU Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Grünstattgrau, HBLFA Schönbrunn), ÖBB Infrastruktur, sowie Planungsbüros aus den Fachgebieten der Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur, als auch der Kulturtechnik und Wasserwirtschaft, und die Baumpflege. Dies zeigt die Aktualität der Thematik und den Bedarf am Austausch und anwendungsorientierten Daten und Informationen zum System.

Auch die Zielgruppen der Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt spiegeln sich in den Teilnehmenden bei der Ergebnispräsentation wider: Magistrate der Gemeinden und Länder,

Planende aus der Siedlungswasserwirtschaft, der Landschaftsplanung und dem Straßenbau, Zuständige für den Gewässerschutz, Fördergeber, sowie Auftraggeber für Schwammstadtprojekte (im Wesentlichen Bauträger und Gemeinden, sowie Landesabteilungen).

Der Konsortialführer 3:0 Landschaftsarchitektur ist als Planungsbüro aktiv tätig. Die Ergebnisse, Erkenntnisse und Erfahrungen aus diesem geförderten Projekt fließen unmittelbar in die laufenden Projekte mit ein. Ein planerisches Folgeprojekt zum MUFUWU Stadtbaum Projekt ist beispielsweise die Planung und der Umbau des Hauptplatzes in Amstetten mit Baubeginn Mai 2023.

Sowohl 3:0 als auch der Verein Land schafft Wasser und die HBLFA Schönbrunn sind aktiv am fachlichen Austausch im Arbeitskreis Schwammstadt – dem vor allem auch andere Planungsbüros und beratende Akteure angehören – beteiligt. Auch hier fließen die Projekterkenntnisse wesentlich mit ein.

Der Verein Land schafft Wasser arbeitet gemeinsam mit dem Bundesamt für Wasserwirtschaft an der weiteren Aufbereitung und Veröffentlichung der Monitoringdaten in wissenschaftlichen Journalen. Dies soll das neuartige Bauprinzip für den Austausch in wissenschaftlichen Kreisen mit Expertinnen und Experten zu den Themen Substrate, Bodenwasserhaushalt, blau-grüne-Infrastruktur, Regenwassermanagement und verwandte Disziplinen zugänglich machen und hierfür erste Daten und Einblicke in die Funktionsweise des Systems und mögliche Bauausführungen liefern. Dies soll in weiterer Folge einen wissenschaftlichen Diskussions- und Entwicklungsprozess anstoßen, der zu einer Systemoptimierung führen kann. Ein erster Artikel, in den auch die Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem gegenständlichen Projekt einfließen, wurde Anfang des Jahres in der ÖWAV-Zeitschrift veröffentlicht (Zeiser et al., 2023). Eingang findet das Forschungsprojekt auch in einen Artikel in der Zeitschrift Stadt+Grün (Grimm et al. 2022).

Ergänzend sind der Verein Land schafft Wasser und das Bundesamt für Wasserwirtschaft in Kooperation in Folgeprojekten beauftragt durch die Stadt Graz, aber auch in parallelaufenden Monitoringprojekten zur Schwammstadt für Bäume aktiv. Teilweise finden die Daten aus dem Standort Leonhardgürtel Eingang in diese Projekte. Weiters wurden im Zuge der Folgeprojekte auch temporäre Versuche und manuelle Datenaufnahmen im Leonhardgürtel durchgeführt. Auch eine Modellierung des Bodenwasserhaushalts im Hauptmessbereich des Leonhardgürtels West wird von Projektkolleg:innen in einem solchen weiterführenden Projekt durchgeführt. Die Messeinrichtungen vor Ort stellen somit eine wertvolle Ressource für weiterführende Untersuchungen dar und bieten das Potenzial für ein langfristiges Monitoring – ein solches wird auch von Forschungspartner:innen zu multifunktionalen Wurzelräumen / Baumrigolen immer wieder gefordert.

Im Laufe der Projektdauer war steigende Nachfrage und Interesse am Know-How zur Umsetzung von „multicodierten“ Baumstandorten im städtischen Umfeld spürbar. Besonders auch die Disziplin der Siedlungswasserwirtschaft zeigte zunehmend Interesse an der Kombination von Regenwasserbewirtschaftung mit Baumstandorten. Hierzu nahm das Projektkonsortium auch an zwei Tagungen der Aqua Urbanica – organisiert von einem Zusammenschluss aus insgesamt sechs Hochschulen und Forschungseinrichtungen aus Deutschland, Schweiz und Österreich – teil und präsentierte dort direkt und indirekt das gegenständliche Forschungsprojekt bzw. Erkenntnisse und Teilversuche daraus (Zeiser et al. 2021, Zeiser et al. 2022a, Zeiser et al. 2022b). Zusätzlich etablierte sich ausgehend von der HCU Hamburg auch ein Forschungsnetzwerk zu Baumrigolen, Schwammstadtsystem und multifunktionalen Wurzelräumen in unterschiedlichsten Ausprägungen. Auch hier sind der Verein Land schafft Wasser und das Bundesamt für Wasserwirtschaft Teil davon.

Weiters folgten auch Einladungen zu Tagungen mit dem Schwerpunkt Pflanzenkohle, um auf diesen von den Erfahrungen und Möglichkeiten des Einsatzes im Kontext der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung und Stadtbäume zu berichten (Tagung der FU Berlin „Pflanzenkohle – C-Speicher der Zukunft? März 2023; Tagung der ÖBIKA „Biochar-Day“, September 2023).

### 6.3. Mögliche rechtliche Hürden

Die Einleitung von Dachwasser von privaten Gebäuden in öffentliches Gut ist derzeit in vielen österreichischen Bauordnungen dezidiert untersagt (der aktuelle Grund dafür ist die Haftungsthematik und der Gefahrenübergang, historisch wurde Niederschlagswasser als Gefährdung des öffentlichen Raumes und Lebensraumes Stadt gesehen und in den Bauordnungen aus dem frühen 20. Jahrhundert, die in Österreich die Grundlage für bestehendes Baurecht bilden, entsprechend abgehandelt; entsprechend wird sowohl in den verschiedenen Bauordnungen, wie in den einschlägigen Normen nur von Versickerung am eigenen Grundstück oder die Anschlussverpflichtung an den Regenwasserkanal geschrieben; vgl. ÖNORM EN 12056-3; Teil 3: Dachentwässerung, Planung und Bemessung Gültigkeit, sowie seit dem 1.8.2016 die nationale Umsetzungsnorm ÖNORM B 2501). Beim Dachwasser handelt es sich um potenziell gut „verwertbares“ Wasser (je nach Beschaffenheit und Materialität der Oberfläche), wie in diesem Bericht auch ausgeführt wird. Je nach Dachoberfläche handelt es sich in der Regel um gering verschmutztes Oberflächenwasser, das zudem bei ausreichender Dachsteilheit und keinen Retentionsmaßnahmen am Dach selbst rasch und der Niederschlagsganglinie folgend verfügbar ist. Dieses kann theoretisch direkt in das Verteilsystem des Schwammstadtsystems eingeleitet werden, sollte aber idealerweise davor über eine Einrichtung zur Grobreinigung bzw. Sedimentation von Feinstoffen geführt werden, um eine Verunreinigung des Verteilrohrsystems möglichst lange hintanzuhalten. Eine Änderung der relevanten rechtlichen Grundlagen hin zu einer möglichen Verwendung von Dachwasser für den öffentlichen Grünraum wäre wünschenswert.

Auch die im Projekt angewandte Differenzierung zwischen erstem Spülstoß und dem später aus dem EZG zufließenden Wasser ist in den Normen (noch) nicht verankert. Das ÖWAV RB 45 (2015), das hier meist zur Anwendung kommt, schreibt vor, städtische Oberflächen einer bestimmten Verschmutzungskategorie zuzuweisen, für die gewisse Reinigungsvorschriften des darauf anfallenden Oberflächenwassers vor der Versickerung gelten. Dies ist für das gesamte anfallende Oberflächenwasser eines bestimmten Bemessungsereignisses zu erfüllen, wodurch sich ein gewisser notwendiger Speicherraum ergibt. Dieses Regelblatt befindet sich allerdings derzeit in Überarbeitung. Auch aus wissenschaftlicher Sicht scheint das Thema noch nicht klar und endgültig beleuchtet zu sein, weiters liegt noch keine eindeutige Definition eines ersten Spülstoßes vor. Aus Sicht der Akzeptanz und Praktikabilität des platzsparenden Einsatzes von Bodenfilterbecken zur Reinigung von Straßenwasser und weiteren Infiltration in das Schwammstadtsystem in der Bestandsstadt wäre eine Öffnung der normativen Grundlagen und eine Entwicklung von Strategien in diese Richtung wünschenswert. Andererseits sollte dies nur geschehen, wenn tatsächlich von keinen negativen Folgen für das Grundwasser und Stadtgrün auszugehen ist. Die rechtlichen und normativen Grundlagen für (Rohr-)Leitungen aller Art bedeuten in der Regel, dass diese weit voneinander entfernt und breit verteilt, häufig unter Nebenverkehrsflächen positioniert sind (vgl. ÖNORM B 2533 Koordinierung unterirdischer Einbauten – Planungsrichtlinien). Dies erschwert die Umsetzung eines Schwammstadtprojekts bedeutend. Selbst wenn die Projektumsetzung klappen würde, wäre die Situation für ein langjähriges Baumwachstum nachteilig – zum einen, weil großflächig verteilte

Leitungen bedeuten, dass die Baumwurzeln in viele Richtungen stören oder Schäden verursachen können und zum anderen, weil ein höheres Aufgrabungspotenzial an einer Vielzahl von Positionen im oder neben dem Wurzelraum gegeben ist. Aus Sicht des Baumstandortes und der Etablierung von Schwammstadtstandorten wäre eine kompaktere Verlegung von (Rohr-)Leitungen (möglichst eng zusammengefasst) idealerweise seitlich der Nebenverkehrsflächen oder auch unter der Straße selbst vorteilhaft. Grundsätzlich wird derzeit davon ausgegangen, dass je gleichmäßiger der Untergrund für den Baum durchwurzelbar ist, desto geringer ist das „Interesse“ des Baums in die Nähe von Infrastrukturleitungen zu wurzeln. Dies gilt bei richtiger Umsetzung in einem Schwammstadtkörper als gut erfüllt. Weiters könnten – bei kompakter Verlegung von Leitungen – diese auch einfacher mit Wurzelschutzeinrichtungen ausgestattet werden.

Der hohe Streusalzeinsatz (mittels Chlorid-haltigen Auftaumitteln), der in urbanen Räumen (vor allem aufgrund von vermeintlichen Haftungsfragen) üblich ist, gilt grundsätzlich als suboptimal für alle Bestrebungen, Oberflächenwasser für Pflanzen zu nutzen oder weiterführend ins Grundwasser zu versickern (vgl. zum Einsatz von Streusalzen in Wien bzw. Österreich: <https://stadtrechnungshof.wien.at/berichte/2011/lang/05-22-KA-III-48-2-11.pdf> und Hoffmann, M., Gruber, M., Leubolt, J., Grothe, H. Koyun, A. N., Seifried, T., Stinglmayr, D., Hofko, B. (2021), WINTERLIFE -Winterdienst mit effektiven, nachhaltigen und nicht aggressiven Taumitteln sowie optimalen LIFE Cycle Costs der Bahn; Endbericht VIF2018-Verkehrsinfrastrukturforschung, Wien). Solange die Chloridkonzentration in der Bodenlösung erhöht ist, kann dies potenziell negative und toxische Auswirkungen (verschiedener Art) auf die darin wurzelnden Pflanzen/Bäume haben. Auf Grund der hohen Mobilität des Chlorids in der Bodensäule wird dies bei ausreichendem Wassereintrag (wie dies bei der üblichen Anwendung eines Schwammstadtprinzips mit zusätzlichen EZG-Flächen zu erwarten ist) rasch ausgewaschen und reichert sich folglich im Grundwasser an. Dort ist gemäß QZV Chemie GW (Fassung vom 15.11.2023) ein bestimmter Schwellenwert als Mindeststandard einzuhalten. Die beste Lösung hierfür wäre folglich eine verminderte bis nicht stattfindende Anwendung von Chlorid-haltigem Streusalz, um dieses gar nicht erst in den Wurzelraum und/oder das Grundwasser einzutragen.



# 7 Ausblick und Empfehlungen

Im Zuge der Planungs-, Ausführungs- und Monitoring-Tätigkeiten am Projektstandort Leonhardgürtel wurden viele Fragestellungen aufgeworfen, die einer weiteren Erforschung bedürfen. Das untersuchte System kann als beispielhaft für Bauweisen des dezentralen oder naturnahen Regenwassermanagements im urbanen Raum gelten, die Vielfalt der kombinierten Einzelkomponenten und ablaufenden Einzelprozesse bedingt hohe interdisziplinäre Kompetenz in allen Phasen der Umsetzung von neuen, ähnlichen Projekten. Im Zusammenspiel mit dem hohen Potenzial, die Lebensqualität in Städten zu steigern, scheint der weitere Einsatz von Forschungsmitteln angebracht und mit hohem Potenzial für gesellschaftlichen Mehrwert behaftet.

Mit der Aufnahme des (nicht näher definierten) Schwammstadtsystems in das Förderregime nach dem österreichischen Umweltförderungsgesetz wurde unlängst ein bedeutender Anstoß gegeben, der die weit verbreitete Umsetzung der Erkenntnisse aus MUFUWU Leonhardgürtel und ähnlichen Pilot- und Demonstrationsprojekten in die Praxis fördert und auch einfordert. Weitere Demonstrationsprojekte müssen, wie jegliche Umsetzungen, so konzipiert werden, dass die Basisfunktionalität des Systems gewährleistet ist. Dazu ist aus dem gegenständlichen Projekt, sowie aus dem gesamten Forschungsumfeld mittlerweile genug Wissen vorhanden. Dennoch sind weitere Untersuchungen notwendig, die auf relevante Teilprozesse eingehen. Einige Punkte können hier vorrangig genannt werden:

- Gestaltung und Bemessung von Einzugsgebiet, Zuläufen, Verteilsystem und Substraten zur Optimierung der mittelfristigen Wasserversorgung der Bäume.  
Auch wenn das große durchwurzelbare Volumen verspricht, viel Wasser aufnehmen zu können, ist die Speicherfähigkeit des Gesamtsystems begrenzt. Es sollte daher eine gewissenhafte hydrologische Dimensionierung erfolgen, für die aber die Grundlage an Vergleichsdaten oder Anleitungen nicht gegeben ist.
- Zusammenspiel Untergrund, seitliche Grenzflächen, Einstauverhalten.  
Das konzeptionelle Verständnis des Systems ähnelt oft einer Badewanne, die bei Starkregen mit Wasser gefüllt wird und dieses langsam wieder abgibt – sei es in den Untergrund oder durch Verdunstung des Baumes. Sind die Zeithorizonte für diese Prozesse, sowie die Befüllung nur unscharf bekannt, kann es einerseits zu langem Einstau kommen, wodurch Wurzeln und Bodenleben erstickt werden, und andererseits kann die seitliche Ausbreitung des Wassers zu Stabilitätsverlusten im bebauten Umfeld führen. Wieder kann durch gewissenhafte und wissenschaftlich gestützte Dimensionierung die wunschgemäße Funktion sichergestellt werden – eine größere Basis von Daten und Erfahrungen kann dies unterstützen. Eine fachgerechte Planung und das Vorsehen von genügend großen Schwammstadtkörpern ist jedoch essentiell für das langfristige Gedeihen von Stadtbäumen in der Schwammstadt.
- Wasserqualität in Zu- und Abfluss.  
Im städtischen Umfeld zirkuliert eine unermessliche Vielfalt an Schad- und Wirkstoffen, die die Funktion von Infrastruktur beeinflussen. Das untersuchte System Schwammstadt für Bäume ist ebenfalls aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt, die mit der Umgebung in einer Art und Weise interagieren, die noch unzureichend quantifiziert wurde. Auch die Ansprüche aus Kreisen der Planung und Erhaltung sind recht divers. Weitere

Forschungsarbeit sollte also investiert werden, um das Verhalten der einzelnen Komponenten und vor allem der Substrate im Kontakt mit Umweltchemikalien genauer zu erkunden.

Da die naturräumlichen Gegebenheiten, also Niederschlag, Temperaturen, geologische Grundlagen und viele weitere mehr, in Österreich äußerst heterogen verteilt sind, ergibt sich eine hohe Diversität an Ansprüchen an Schwammstadtprojekte. Wie diese Ansprüche am besten erfüllt werden können, kann durch weitere Planungs- und Demonstrationsprojekte in mehreren Regionen am besten gezeigt werden. Die MUFUWU-Pilotanlage am Leonhardgürtel in Graz stellt in ihrer Dimension ein Leuchtturmprojekt dar, dessen Ausstattung an Sensorik sehr umfangreich gewählt wurde. Für neue, detailliertere Fragestellungen kann aus dem hier erprobten Paket aus Monitoring-Equipment aufgrund der damit erworbenen Erfahrungen die optimale, deutlich geringer dimensionierte Messlösung entwickelt werden.

Da das Projekt MUFUWU den gesamten Schaffensprozess von der Planung bis zur Etablierungsphase umfasste, wurden die wesentlichen Herausforderungen im Zuge der Projektarbeit klar ersichtlich und konnten in begleitenden Publikationen dargelegt werden. Besonders hervorzuheben ist, dass der Weg von der wissenschaftsgestützten Detailplanung in die dementsprechende Umsetzung durchaus steinig werden kann. Intensive, regelmäßige und zielorientierte Kommunikation aller Beteiligten ist unabdingbar für das spätere Potenzial, Prozesse wirklich im Sinne der wissenschaftlich formulierten Ansätze beobachten und quantifizieren zu können.

Das Interesse an der Arbeit im Projekt MUFUWU und verwandten Monitoringstandorten überschreitet mittlerweile die Grenzen Österreichs und Arbeitskreise im gesamten deutschsprachigen Raum profitieren vom hier aufgebauten Wissen. In Grundzügen ähnliche Demonstrationsprojekte wurden bereits installiert, weitere sind in Planung. Damit kann die abgedeckte Diversität in den Anforderungen um gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte aus anderen Ländern erweitert werden, was den Wissensaufbau weiterhin voranschreiten lässt.

# 8 Verzeichnisse

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizze zur Veranschaulichung des Systems Schwammstadt für Bäume und notwendiger, sowie möglicher Komponenten .....	12
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Platzierung der Messsensoren am exemplarischen Beispiel eines Baums im Hauptmessbereich mit angrenzendem Tiefbeet (Darstellung im Schnitt) ....	22
Abbildung 3: Übersichtsplan über das Projektgebiet im Leonhardgürtel, 8010 Graz. Quelle Hintergrund: basemap.at. ....	27
Abbildung 4: Darstellung des visuellen Gesamteindrucks (oben) und der Triebblängen (unten) für alle 14 Bäume an beiden Bonitierungstagen (links: Ost, rechts: West).....	33
Abbildung 5: Fotografien der vier Exemplare der Baumart <i>Styphnolobium japonicum</i> aufgenommen am 29.06.2022 und 21.09.2023 .....	34
Abbildung 6: Fotografien der vier Exemplare der Baumart <i>Aesculus hippocastanum</i> (Bestandsbäume) aufgenommen am 17.07.2022 und 21.09.2023 (Fotos vom 21.09.2023: Waltraud Körndl).....	35
Abbildung 7: Stammzuwächse aller Neupflanzungen der Standorte Ost und West in den Vegetationsperioden 2022 und 2023 (bis 30.08.2023).....	36
Abbildung 8: Matrixpotenzialverläufe der Sensoren bei den Neupflanzungen #35, #36, #37 als Darstellungsart der beginnenden Wurzelausbreitung im Schwammstadtsubstrat im Jahr 2023; oben: #35, Mitte: #36, unten: #37; durchgehende Linien: Sensoren im Baumsubstrat; strichpunktierte Linien: Sensoren im Schwammstadtsubstrat .....	38
Abbildung 9: Matrixpotenzialverläufe der Sensoren bei den Kastanien #15 und #16 (oben; Neupflanzungen), #17 und #18 (unten; Bestandsbäume) als Darstellungsart der Wurzelausbreitung	39
Abbildung 10: visuelle Wurzelauftnahmen in den Plexiglasrohren, links Baum #17, rechts Baum #35, beide Aufnahmen vom 23.10.2023.....	39
Abbildung 11: Ausweisung von Trockenphasen (hellorange hinterlegt) im Jahr 2022 für die Bäume #16 (oben) und #37 (unten) auf Basis der Matrixpotenzialsensoren (jeweils obere Grafik), der Wärmegeschwindigkeiten mittels Saftstromsensoren (jeweils mittlere Grafik und der Stammumfangsverläufe (jeweils untere Grafik) .....	41
Abbildung 12: Stammumfangsverlauf des Baums #16 im Juni 2022, Differenzierung zwischen Schrumpfung, Schwellung, morgendlichem Maximum und abendlichem Minimum, Darstellung des SCI (=stem circumference increase bzw. Stammumfangszuwachs) .....	42
Abbildung 13: Ausweisung von Trockenphasen (hellorange hinterlegt) im Jahr 2023 für die Bäume #16 (oben) und #37 (unten) auf Basis der Matrixpotenzialsensoren (jeweils obere Grafik), der Wärmegeschwindigkeiten mittels Saftstromsensoren (jeweils mittlere Grafik und der Stammumfangsverläufe (jeweils untere Grafik) .....	45
Abbildung 14: Gegenüberstellung der täglichen und kumulativen Niederschlagssummen im Zeitraum 01.05. bis 31.08. in den Jahren 2022 (oben) und 2023 (unten), sowie Kopplung mit den Matrixpotenzialverläufen der Sensoren beim Baum #37 .....	46

Abbildung 15: Darstellung der Niederschlagsereignisse mit ihrer Charakteristik, die zu einem messbaren Wasseranstau im Tiefbeet geführt haben (JA = detektiertes Tiefbeet-Event).....	47
Abbildung 16: Gegenüberstellung Niederschlagsdaten mit berechneten Zuflussraten des Dachwassers über das Verteilrohr am 23. und 24.05.2023. ....	49
Abbildung 17: Vergleich der Niederschlagssummen je Event mit dem errechneten Dachwasserzufluss je Event.....	49
Abbildung 18: Monatliche Zuflussmengen über das Verteilrohr, aufgeteilt nach Events (zeitlich, d.h. Event 1 war das erste im betreffenden Monat).....	50
Abbildung 19: Verläufe der Wasseranteilssensoren des Baums #35 als gemessene Rohwerte normalisiert auf das absolute Minimum und Maximum des jeweiligen Sensors abhängig von den Tagesniederschlagssummen (obere Grafik).....	51
Abbildung 20: Thermographische Aufnahme im Leonhardgürtel (Wärmebildkamera FLIR C5) vom 17.08.2022 zur Veranschaulichung des Kühlungseffekts von Bäumen auf die städtische Oberfläche. Bildmitte: Baum #35, <i>Styphnolobium japonicum</i> , beidseitig parkende Autos.....	53
Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der Chlorid- und Nitratgehalte im analysierten Bodenwasser im Zeitraum September 2021 bis Juli 2023; Sommer hellrot, Winter hellblau schattiert .....	55
Abbildung 22: Bonitierungsbogen zur Datenaufnahme im Zuge der Bonitierungen.....	74
Abbildung 23: Vereinfachter Lageplan mit Positionierung der Messeinrichtungen.....	75

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse aus den bodenphysikalischen und -hydrologischen Laboranalysen für ausgewählte Schwammstadt-Feinsubstratmischungen, durchgeführt am Bundesamt für Wasserwirtschaft in Petzenkirchen.....	29
Tabelle 2: Ergebnisse aus den bodenphysikalischen und -hydrologischen Laboranalysen für das Schwammstadtsubstrat (Leonhardgürtel West) und Baums substrat, durchgeführt am Bundesamt für Wasserwirtschaft in Petzenkirchen.....	30
Tabelle 3: Daten, welche im Rahmen des Projekts verwendet werden .....	71
Tabelle 4: Beschreibung der Daten, welche im Projekt pro Einzelbaum generiert werden .....	71
Tabelle 5: Beschreibung der Daten, welche im Projekt für andere Geltungsbereiche als Einzelbäume generiert werden. *Bodenwasser durch Saugkerzen entnommen und Konzentrationen von folgenden Inhaltsstoffen wurden ermittelt: NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , elektr. Leitfähigkeit, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , gelöster organischer Kohlenstoff .....	72
Tabelle 6: Beschreibung der Metadaten im Projekt .....	72

## Literaturverzeichnis

Bertrand-Krajewski, J.-L., Chebbo, G., Saget, A.: Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Res.*, 32 (8), pp. 2341-2356, 1998.

Böll S., Schönfeld P., Körber K.: Projekt Stadtgrün 2021 –Selektion, Anzucht und Verwendung von Gehölzen unter sich ändernden klimatischen Bedingungen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. KL/17/03, Projektphase 2017-2018. LWG - Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau. [https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflge/dateien/abschlussbericht\\_stadtgruen\\_2018-74\\_in.pdf](https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflge/dateien/abschlussbericht_stadtgruen_2018-74_in.pdf), 2018.

Czaja M., Kolton A., Muras P.: The complex issue of urban trees – Stress factor accumulation and ecological service possibilities. *Forests*, 11(9):932. <https://doi.org/10.3390/f11090932>, 2020.

Embrén B., Alvem B.-M.: Plant beds in the City of Stockholm – a handbook. Stockholms stad. <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/tools/tool-detail/en/c/522328/>, 2017.

Field, R., Gardner, B. B.: Urban runoff and combined sewer overflow. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, pp. 1170-1185, 1978.

FLL, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (2010) Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate, 2010.

Grimm K., Murer E., Schmidt S., Zeiser A.: Das Schwammstadtprinzip für Bäume – Entwicklung und Umsetzung in Österreich. *Stadt + Grün* 07, 2022.

Hoffmann, M., Gruber, M., Leubolt, J., Grothe, H. Koyun, A. N., Seifried, T., Stinglmayr, D., Hofko, B. (2021), WINTERLIFE -Winterdienst mit effektiven, nachhaltigen und nicht aggressiven Taumitteln sowie optimalen LIFE Cycle Costs der Bahn; Endbericht VIF2018-Verkehrsinfrastrukturforschung, Wien

Implexx Sense: Quick start guide – Correction for probe misalignment v2.pdf. unter <https://www.implexx.io/wp-content/uploads/2023/09/Quick-Start-Guide-Correction-for-Probe-Misalignment-v2.pdf> (aufgerufen am 05.10.2023).

Jezik M., Blazenec M., Letts M. G., Ditmarova L., Sitkova Z., Strelcova K.: Assessing seasonal drought stress response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) by monitoring stem circumference and sap flow. In: *Ecohydrology* 8 (378-386), 2015.

Lutz H.-J., Boller M.: First-Flush-Anlagen – Behandlung von Strassenwasser. *Aqua & Gas*, 10, pp. 52-61, 2019.

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr: Erdarbeiten, RVS 08.03.01. Wien, 2021.

ON - Österreichisches Normungsinstitut: Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Teil 2: Qualitative Anforderungen an das zu versickernde Regenwasser sowie Anforderungen an Bemessung, Bau und Betriebe von Reinigungsanlagen. Wien, 2012.

ÖWAV - Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband: ÖWAV-Regelblatt 45 – Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund. Wien, 2015.

Präsentationsinhalt Expertenaustausch: „In Schweden (Stockholm und Uppsala) wird [Anm.: in der Regel] reine Kompostkohle als Feinsubstrat im Ausmaß von 15 Vol% in einer vorgemischten Substratmischung mit Grobsplitt verwendet.“ Expert seminar „Multi-functional and ecosystem friendly urban plant beds“, Uppsala and Stockholm, 24.-26. Mai 2023.

Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser – AZV Chemie GW BGBl II 98/2010 idF II 248/2019

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

Stadtrechnungshof Wien: <https://stadtrechnungshof.wien.at/berichte/2011/lang/05-22-KA-III-48-2-11.pdf> (aufgerufen am 02.12.2023)

Stratopoulos-Le Chalony L.M.F.: „Klimabäume“ für die Stadt. Über die Rolle einer angepassten Arten- und Sortenwahl für die Kühlleistung von Straßenbäumen. Dissertation, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, 2020.

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

Zeiser A., Weninger T., Schmidt S., Roth T., Rath S., Murer E., Strauss P.: Datenbasierte Evaluierung hydrologischer und gesellschaftlicher Potenziale der Schwammstadt für Stadtbäume. Vortrag, Aqua Urbanica 2022, Glattfelden, 14.-15. November 2022. Tagungsband S. 48-53, 2022a.

Zeiser A., Weninger T., Murer E., Lecko M., Zimmermann D., Rath S., Schmidt S., Strauss P.: MUFUWU – Multifunktionaler Wurzelraum, Realisierung der Schwammstadt für Stadtbäume mit wissenschaftlicher Begleitung im Leonhardgürtel in Graz. Poster, Aqua Urbanica 2022, Glattfelden, 14.-15. November 2022. Tagungsband S. 208-212, 2022b.

Zeiser A., Murer E., Schmidt S., Kumpan M., Strauss P., Weninger T.: Schwammstadt für Stadtbäume – Funktionsorientierte Substratentwicklung am Beispiel des multifunktionalen Wurzelraums. Vortrag, Aqua Urbanica 2021, Innsbruck, 13.-14. September 2021. Tagungsband S. 84-88, 2021.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (nun Geosphere Austria): Erklärung zum Jahrbuch der ZAMG. <https://www.zamg.ac.at/jahrbuch/docs/Tagesauswertung.pdf>, 2019, (aufgerufen am 15.07.2023).

## Abkürzungsverzeichnis

EZG	Einzugsgebiet
Galabau	Garten- Landschaftsbau
GOK	Geländeoberkante
KK	Kompostkohle
Masse%	Masseprozent
MP	Matrixpotenzial
MSM	Murschwemmaterial
MUFUWU	Multifunktionaler Wurzelraum
ÖWAV	Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
QZV	Qualitätszielverordnung
RB	Regelblatt
RKS	Rundkornsand
SCI	Stammumfangszuwachs (Eng.: stem circumference increase)
T / #	Baumnummer
TRD	Trockenrohddichte
Vol%	Volumenprozent
VWC	Volumetrischer Wassergehalt bzw. Wasseranteil
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie, nun Geosphere Austria

# 9 Anhang

## 9.1. Data Management Plan (DMP)

### 1: Datenerstellung und Dokumentation

Für diverse meteorologische Teilfragestellungen, vor allem zur Berechnung der Referenz-Evapotranspiration und zur Korrektur fehlender Niederschlagszeitreihen, wurden Daten aus dem öffentlichen Data Hub der Geosphere Austria (vormals ZAMG) verwendet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Daten, welche im Rahmen des Projekts verwendet werden

Beschreibung	Typ	Art	Quelle	Zugang	Link
<b>meteorologische Grunddaten, Station Graz Universität</b>	Numerisch	Messdaten	Geosphere Austria	öffentlich	<a href="https://data.hub.geosphere.at/">https://data.hub.geosphere.at/</a>

Im Mittelpunkt des Projekts MUFUWU Graz steht eine Monitoringanlage im Leonhardgürtel Graz. Dort sind 14 Straßenbäume mit verschiedenen Messinstrumenten ausgestattet, die kontinuierlich Daten aufzeichnen (Tabelle 4). Darüber hinaus werden bestimmte Größen nicht auf Einzelbäume bezogen, sondern für bestimmte Bereiche des Standorts gemessen (Tabelle 5). Weitere Informationen zum Verständnis der Daten werden in Tabelle 6 und im Übersichtsplan (Abbildung 3) angeboten.

Tabelle 4: Beschreibung der Daten, welche im Projekt pro Einzelbaum generiert werden

Messgröße	Einheit	Messintervall	Baumnummer			
			32-34, 38; 14, 19,20	35-37	15-16	17-18
<b>Matrixpotenzial Boden</b>	kPa	5 min	-	6 x 1	5 x 1	3 x 1
<b>Wasseranteil Boden</b>	% von max	5 min	-	8/6 x 1	2 x 1	-
<b>Temperatur Boden</b>	°C	5 min	-	14/12 x 1	7 x 1	3 x 1
<b>Elektr. Leitfähigkeit</b>	mS cm <sup>-1</sup>	5 min	-	8/6 x 1	2 x 1	-
<b>Stammdurchmesser</b>	mm	15 min	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1
<b>Saftstrom (Wärmegeschwindigkeit)</b>	cm h <sup>-1</sup>	15 min	-	1 x 37	1 x 37	1/0 x 37



Tabelle 5: Beschreibung der Daten, welche im Projekt für andere Geltungsbereiche als Einzelbäume generiert werden. \*Bodenwasser durch Saugkerzen entnommen und Konzentrationen von folgenden Inhaltstoffen wurden ermittelt: NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, elektr. Leitfähigkeit, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, gelöster organischer Kohlenstoff

Messgröße	Einheit	Messintervall	Aussagebereich
Lufttemperatur	°C	5 min	gesamter Messstandort
Windgeschwindigkeit	m s <sup>-1</sup>	5 min	gesamter Messstandort
Globalstrahlung	W m <sup>-2</sup>	5 min	gesamter Messstandort
Niederschlag	mm	5 min	gesamter Messstandort
Bodenwasserqualität 1	Konzentrationen*	4 Wochen, 6 Punkte	Obere Grenze Schwammstadtsubstrat (Eintrag)
Bodenwasserqualität 2	Konzentrationen*	4 Wochen, 6 Punkte	Untere Grenze Schwammstadtsubstrat (Austrag)
Pegelstand	cm	5 min	Tiefbeet
Zulauf Verteilrohr	l s <sup>-1</sup>	5 min	Messbereich SW
Ablauf Dränrohr	l s <sup>-1</sup>	5 min	Messbereich SW

Tabelle 6: Beschreibung der Metadaten im Projekt

Attribut	Beschreibung
Titel	Monitoringdaten MUFUWU Leonhardgürtel
Zusammenfassung	Aufstellung von kontinuierlich erfassten Monitoringdaten zu Wasserkreislauf und Baumphysiologie des Projektstandorts im Leonhardgürtel Graz
Kurzbezeichnung	Monitoring_MUFUWU
Zeitintervall	Siehe Tabellen 4 und 5
Zeitraum	1.1.2022 – 30.11.2023, im Bericht dargestellt bis 30.08.2023
Institution	Verein Land schafft Wasser, landschafttwasser.at
Kontakt	office@landschafttwasser.at
Mitwirkende und Rolle	Anna Zeiser, <a href="mailto:office@landschafttwasser.at">office@landschafttwasser.at</a> , Konzeptionierung des Monitorings und Haltung der Daten
Methodik	meist Rohdaten des jeweiligen Sensors; Saftstrom: Korrektur der automatisch errechneten Wärmegeschwindigkeit basierend auf der „Saturation Method“ durch Anpassung des Nadelabstandes des Sensors; Darstellung als relativer Wert des Maximalwertes Zulauf Verteilrohr: Umrechnung der Stromstärke zu Durchfluss über Kalibrierungsfunktionen, die im Vorfeld ermittelt wurden Wasseranteilssensor: Darstellung als relativer Rohwert zwischen aufgezeichnetem Maximal- und Minimalwert des jeweiligen Sensors
Datenvervollständigung	Rohdaten, meist keine Vervollständigung; kurz andauernde Lücken (<= 1,5 h) in den Messaufzeichnungen wurden durch lineare Interpolation gefüllt; Niederschlag: Station Graz Universität der Geosphere Austria
Kommentar	Baumnummern siehe Lageplan

## 2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Es sind keine besonderen ethischen, rechtlichen oder Sicherheitsaspekte zu beachten.

### **3: Datenspeicherung und -erhalt**

Die Messdaten werden über vier Datenlogger kontinuierlich erfasst, einmal stündlich automatisch auf ein Web-Repository (Cloud) gespielt und von dort regelmäßig heruntergeladen und lokal gesichert. Mitarbeiter:innen des Vereins Land schafft Wasser sind dafür zuständig.

### **4: Wiederverwendbarkeit der Daten**

Aufgrund des immensen Umfangs des Datensatzes, der vor allem durch die kurzen Messintervalle und die vielen Messkanäle bedingt ist, kann der vollständige Messdatensatz nicht in einigermaßen aktueller Form online verfügbar gemacht werden. Die Daten sind für Dritte für eine Verwendung nach guter wissenschaftlicher Praxis (Mitautor:innenschaft oder adäquate Nennung der Quelle) auf Anfrage verfügbar. Eine Einführung in das Datenkonvolut ist dabei für das Verständnis angeraten.

## 9.2. Bonitierungsbogen

Abbildung 22: Bonitierungsbogen zur Datenaufnahme im Zuge der Bonitierungen

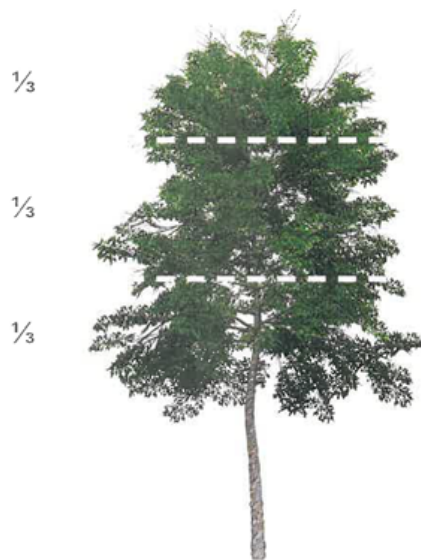
 **HBLFA Schönbrunn**  
Gartenbau

ErstellerIn:

Baumart:

Baum Nr.:

Aufnahmedatum:



oberes Kronendrittel

Ast 1  Ast 2  Ast 3

Ast 4  Ast 5  Ø

Zuwachs seit der letzten Messung in cm

mittleres Kronendrittel

Ast 1  Ast 2  Ast 3

Ast 4  Ast 5  Ø

Zuwachs seit der letzten Messung in cm

unteres Kronendrittel

Ast 1  Ast 2  Ast 3

Ast 4  Ast 5  Ø

Zuwachs seit der letzten Messung in cm

Kronenhöhe in m

Kronenansatz in m

Umfang in 1 m Höhe

Stammumfang in cm

Bewertung:

Baumscheibe  
Wurzelhals   
vertikale Beschreibung





Stamm

Krone

Anmerkung

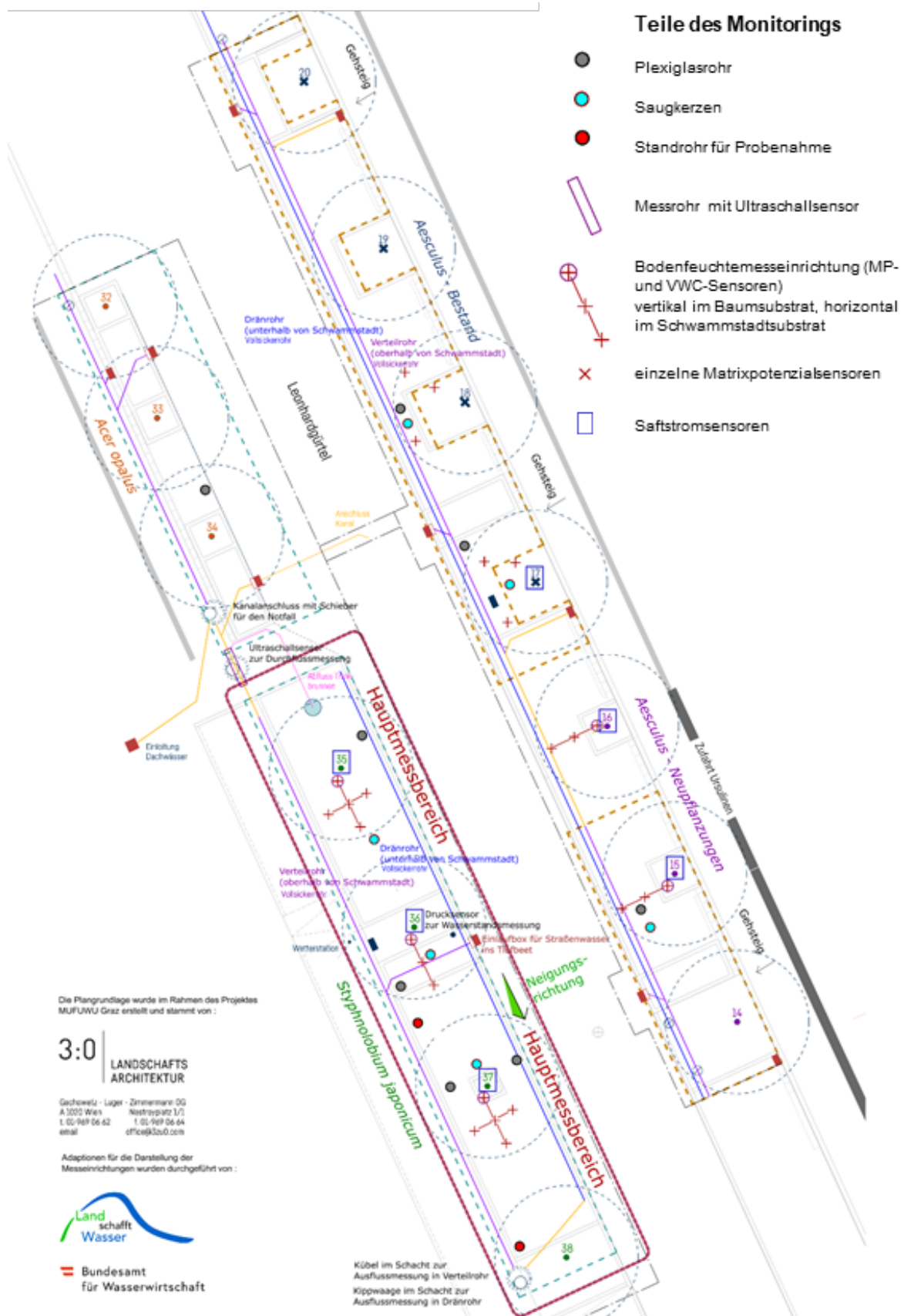
Gesamteindruck:

Note

1. starke Mängel, kümmerwuchs, erhebliche Rindenschäden, hoher Anteil an dürren Ästen, Krone in Auflösung
2. 
3. mäßige Mängel, kaum Zuwachs erkennbar, unregelmäßiger Wuchs, unharmonische Kronenentwicklung
4. 
5. befriedigend entwickelt, geschlossene Krone, wenig Dürnräste
6. 
7. gutentwickelt, harmonischer Kronenaufbau, gleichmäßige Bestattung, gesundes Laub
8. 
9. sehr gut entwickelt, optimaler Wuchs

### 9.3. Vereinfachter Lageplan mit Messeinrichtungen

Abbildung 23: Vereinfachter Lageplan mit Positionierung der Messeinrichtungen



**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 800 21 53 59

[servicebuero@bmk.gv.at](mailto:servicebuero@bmk.gv.at)

[bmk.gv.at](http://bmk.gv.at)