



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Labormethoden zur bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Untersuchung des Schwammstadtsubstrats für Stadtbäume

verfasst von

Sebastian RATH, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, März 2023

Betreut von:

Univ.Prof.ⁱⁿ DIⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Rosemarie Stangl
Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau
Department für Bautechnik und Naturgefahren

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich diese Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Gedanken, die im Wortlaut oder in grundlegenden Inhalten aus unveröffentlichten Texten oder aus veröffentlichter Literatur übernommen wurden, sind ordnungsgemäß gekennzeichnet, zitiert und mit genauer Quellenangabe versehen.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder ganz noch teilweise in gleicher oder ähnlicher Form an einer Bildungseinrichtung als Voraussetzung für den Erwerb eines akademischen Grades eingereicht. Sie entspricht vollumfänglich den Leitlinien der Wissenschaftlichen Integrität und den Richtlinien der Guten Wissenschaftlichen Praxis.

Wien, 06.03.2023

Sebastian RATH (eigenhändig)

*Wer Bäume pflanzt, obwohl er weiß, dass er nie unter ihrem Schatten
sitzen wird, hat zumindest angefangen, den Sinn des Lebens zu
begreifen.*

Rabindranath Thakur

Vorwort

Die in dieser Masterarbeit präsentierte Forschung wurde am Bundesamt für Wasserwirtschaft am Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt im Rahmen des Projekts MuFuWu (multifunktionaler Wurzelraum) durchgeführt. Ziel des Projekts ist die Untersuchung von speziellen Substraten auf ihre Eignung als Baumstandort sowie als Retentionsraum für Niederschlagswasser. Schlussendlich soll das Projekt dazu beitragen, den Wasserhaushalt in urbanen Räumen zu optimieren.

 **Bundesamt
für Wasserwirtschaft**
Institut für Kulturtechnik
und Bodenwasserhaushalt

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zuallererst ganz besonders bei zwei Personen bedanken, die einen maßgeblichen Anteil daran haben, dass die vorliegende Arbeit in dieser Qualität zustande kommen konnte. Ein äußerst großer Dank gebührt meiner Kollegin Anna Zeiser vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, die diese Arbeit entscheidend mitgestaltete und mir von Beginn an mit Rat und Tat zur Seite stand. Vor allem möchte ich mich für ihre unermüdliche Hilfsbereitschaft, ihre Zeit und ihre zahlreichen fachlichen Inputs bedanken. Gleich anschließend möchte ich mich bei Thomas Weninger, ebenfalls vom Bundesamt für Wasserwirtschaft bedanken, der jederzeit ein offenes Ohr hatte und mit seiner Erfahrung und seinem enormen Fachwissen grundlegend zum Erfolg dieser Arbeit beitrug. Beiden danke ich außerdem für die Möglichkeit gegeben zu haben, mich auf wissenschaftlicher Ebene mit diesem spannenden Thema auseinanderzusetzen und mir auf Basis ihrer Expertise Wissen anzueignen.

Außerdem möchte ich dem gesamten Laborteam in Petzenkirchen am Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt des Bundesamts für Wasserwirtschaft, unter der Leitung von Monika Kumpan meinen Dank aussprechen. Vor allem für ihre stete Hilfsbereitschaft bei der Durchführung der Laborversuche.

Weiters bedanke ich mich bei meiner Betreuerin Rosemarie Stangl für die unkomplizierte, stets zielorientierte und reibungslose Abwicklung dieser Masterarbeit.

Weiterer Dank gebührt meiner Freundin Magdalena Bacher, die mich im Laufe des Studiums immer unterstützt und mich darin bestärkt hat, meine Ziele zu verwirklichen.

Schlussendlich möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir überhaupt erst die Möglichkeit gegeben haben, meinen Interessen zu folgen und das Studium an der Universität für Bodenkultur zu absolvieren.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	i
Vorwort.....	iii
Danksagung.....	iv
Inhaltsverzeichnis.....	v
Kurzfassung.....	viii
Abstract.....	ix
Executive Summary.....	x
1. Einführung.....	1
2. Aktueller Wissenstand zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats für Stadtbäume.....	2
3. Zielsetzung und Forschungsfragen	4
4. Grundlagen.....	5
4.1. Klimatische Herausforderungen im urbanen Bereich	5
4.2. Das übergeordnete Prinzip der Schwammstadt.....	6
4.3. Grundlagen zu Stadtbäumen.....	7
4.3.1. Ökosystemleistungen von Stadtbäumen	7
4.3.2. Probleme und Herausforderungen für Stadtbäume.....	9
4.3.2.1. Begrenzter Wurzelraum.....	10
4.3.2.2. Bodenversiegelung.....	11
4.3.2.3. Bodenverdichtung.....	12
4.3.2.4. Eintrag von Fremdstoffen	13
4.3.2.5. Weitere Störungen.....	13
4.4. Struktursubstrate als spezielle Baumsubstrate.....	14
4.4.1. Definition und Eigenschaften.....	14
4.4.2. „CU-Structural Soil®“ (USA).....	15
4.4.3. Stockholmer System (Schweden).....	15
4.4.4. Das Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume (Österreich).....	17
4.4.4.1. Funktion und Zweck	18
4.4.4.2. Bautechnische Praxis und Materialien.....	19
4.5. Bodenphysikalische und bodenhydrologische Grundlagen	25
4.5.1. Korngröße und Bodenart	25
4.5.2. Porensystem	26
4.5.3. Bodenwasser.....	27
4.5.4. Bodenluft.....	30
4.5.5. Hydrologische Bodeneigenschaften und zugehörige Labormethoden.....	31
4.5.5.1. Trockenrohdichte nach ÖNORM EN ISO 11272 (Austrian Standards, 2017)	31
4.5.5.2. Gesamtporenvolumen nach ÖNORM EN ISO 11274 (Austrian Standards, 2020)	31

4.5.5.3.	Wasserkapazität nach FLL (2010) sowie nach ÖNORM EN 13041 (Austrian Standards, 2011)	32
4.5.5.4.	Feldkapazität angelehnt an ÖNORM EN ISO 11274 (Austrian Standards, 2020) sowie an Multistep-Outflow-Methode (Durner und Iden, 2011; Germer und Braun, 2019; Nasta et al., 2011) 32	
4.5.5.5.	Luftkapazität nach ÖNORM EN 13041 (Austrian Standards, 2011)	33
4.5.5.6.	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach ÖNORM L 1065 (Austrian Standards, 2006) sowie nach ÖNORM EN 12616 (Austrian Standards, 2022)	33
4.6.	Schwammstadtsubstrat und Bodenhydrologie	34
4.6.1.	Anforderungen und Richtwerte für das Schwammstadtsubstrat.....	34
5.	Methodik.....	35
5.1.	Versuchsdesign	35
5.2.	Laborversuche	36
5.2.1.	Schüttversuch: Feinsubstrat	37
5.2.2.	Schlämmversuch: Schwammstadtsubstrat.....	42
5.3.	Einflussgrößen und deren Variationen.....	46
5.3.1.	Feinsubstratmischungen (Schütt- und Schlämmversuch)	46
5.3.2.	Einbau-Methodik (Schüttversuch)	48
5.3.3.	Einbau-Wasseranteil (Schüttversuch).....	49
5.3.4.	Feinsubstratanteil (Schlämmversuch).....	49
5.3.5.	Zusätzliche Varianten (Schüttversuch).....	49
5.4.	Zielgrößen	50
6.	Ergebnisse	53
6.1.	Zwischenergebnisse und Adaptierungen	53
6.1.1.	Feinsubstrat: Schüttversuch	53
6.1.1.1.	Einbau-Wasseranteil	53
6.1.1.2.	Einbau-Methodik: Moderate Verdichtung.....	53
6.1.1.3.	Einbau-Methodik: „Durchschlämmen“	54
6.1.2.	Schwammstadtsubstrat: Schlämmversuch.....	55
6.1.2.1.	Veränderungen im Versuchsablauf und bezüglich der verwendeten Materialien 55	
6.1.2.2.	Bestimmen der Feldkapazität	56
6.1.2.3.	Überprüfung des Matrixpotenzials	61
6.2.	Hydrologische Kenngrößen	62
6.2.1.	Feinsubstrat: Schüttversuch	62
6.2.1.1.	Feinsubstratmischung 1 (FS1)	63
6.2.1.2.	Feinsubstratmischung 2 (FS2)	65
6.2.1.3.	Vergleich FS1 und FS2	67
6.2.2.	Schwammstadtsubstrat: Schlämmversuch.....	67
6.2.2.1.	Abstufung des Anteils der Feinsubstratmischung 1 (FS1).....	68
6.2.2.2.	Vergleich FS1 und FS2	68

7.	Diskussion	70
7.1.	Beantwortung der Forschungsfragen bezogen auf die Schüttversuche	70
7.2.	Beantwortung der Forschungsfragen bezogen auf die Schlammversuche	74
7.3.	Einordnung der hydrologischen Kennwerte.....	76
7.3.1.	Vergleich mit Anforderungen aus der FLL-Richtlinie (2010) und aus der ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a)	76
7.3.1.1.	Schüttversuche.....	76
7.3.1.2.	Schlammversuche	79
7.3.2.	Vergleich mit internationaler Literatur	81
7.4.	Methodenkritik.....	83
8.	Fazit.....	85
9.	Ausblick	87
	Literaturliste.....	89
	Tabellen- bzw. Abbildungsverzeichnis	95
	Abkürzungsverzeichnis.....	100
	Anhang A: Hydrologische Kennwerte der einzelnen Versuchsläufe.....	101
	Anhang B: Protokolle der einzelnen Versuchsläufe.....	102
	Schüttversuche	102
	FS1_UV_It.....	102
	FS1_UV_hges	103
	FS1_UV_ges.....	105
	FS1_UV_üges	106
	FS1_V_It	107
	FS1_V_hges	109
	FS1_V_ges	110
	FS1_SCHLÄMM.....	112
	FS2_UV_It.....	114
	FS2_UV_hges	115
	FS2_UV_ges.....	117
	FS2_UV_üges	119
	FS2_V_It	121
	FS2_V_hges.....	121
	FS2_V_ges	123
	Schlammversuche	126
	FS1_25.....	126
	FS1_20.....	130
	FS1_15.....	132
	FS2_15.....	135

Kurzfassung

Damit Stadtbäume in der Lage sind, ihre Ökosystemleistungen bestmöglich zu erbringen, müssen sie alt werden können und vital sein. Der urbane Raum stellt Bäume jedoch vor eine Vielzahl an Herausforderungen. Um dennoch gute Lebensbedingungen für Stadtbäume zu schaffen, werden spezielle Bauweisen und Substrate eingesetzt. Dazu zählt auch das in Österreich seit 2018 angewandte Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume. Es besteht aus groben, lastabtragenden Steinen (Grobschlag) sowie einem Feinsubstrat, welches in die Hohlräume der Steine gespült wird. Diese Art von Struktursubstrat bietet den Bäumen einen erweiterten Wurzelraum unter versiegelten oder verdichteten Flächen und als Element einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung besteht die Möglichkeit, gezielt Oberflächenwasser einzuleiten. Derzeit gibt es keine fundierten Kenntnisse über die bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Eigenschaften des Schwammstadtsubstrats. Aufgrund des Mangels an geeigneten Labormethoden zur Charakterisierung solcher grobkörnigen Substrate, wurden im Zuge dieser Arbeit zwei Verfahren auf Basis vorheriger Erfahrungen weiterentwickelt. Mit dem Ziel die Labormethoden zu testen und in weiterer Folge zu adaptieren sowie erste Ergebnisse zu generieren, wurden Einflussgrößen definiert, die in Folge variiert wurden. Der reine Grobschlag wies bei den durchgeführten Versuchen ein Porenvolumen von rund 43 Vol.-% auf. Bei Zugabe von 25 Vol.-% sandbasiertem Feinsubstrat reduzierte sich das Gesamtporenvolumen auf rund 22 Vol.-%. Die im urbanen Raum für Bäume essenzielle Luftkapazität lag für diese Variante bei rund 16 Vol.-% bei einem Wasseranteil von 6 Vol.-% im Zustand der Feldkapazität (p_F 1,8). Beide Laborverfahren konnten durch gezielte Adaptionen weiterentwickelt werden und lieferten erste vielversprechende Ergebnisse. Aufgrund dessen wurden die Methoden als praktikabel, reproduzierbar und repräsentativ eingestuft.

Schlagwörter: Stadtbäume, naturnahe Regenwasserbewirtschaftung, Struktursubstrate, Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume, Labormethodik, Bodenhydrologie, Bodenphysik

Abstract

In order for urban trees to be able to fulfil their ecosystem services in the best possible way, they must be able to grow old and be vital. However, urban environments pose a multitude of challenges for trees. That is why particular substrates and construction methods are applied to secure vital tree development. One example is the sponge-city-substrate for urban trees, which has been used in Austria since 2018. The substrate consists of coarse gravel ensuring the load bearing capacity and a finer growing substrate, which is flushed into the voids of the gravel. The sponge-city-substrate can be defined as a structural soil, which offers the trees an extended root space under sealed or compacted surfaces. Furthermore, as a nature-based solution for rainwater management, stormwater runoff can directly be led into the substrate. Currently there is no profound knowledge about the physical and hydrological soil properties of the sponge-city-substrate. Due to the lack of suitable laboratory methods to characterize such coarse-grained substrates, two procedures were further developed in the course of this thesis on the basis of previous experience. With the aim of testing and eventually adapting the methods as well as generating initial results, influencing variables were defined and subsequently varied. In the tests conducted, the coarse gravel had a pore volume of about 43 % by volume. With the addition of 25 % by volume sand-based growing substrate, the total pore volume was reduced to about 22 % by volume. The air capacity, which is essential for trees in an urban environment, measured in the state of field capacity (pF 1,8) was about 16 % by volume for this specific variant, while the volumetric water content was about 6 %. Both laboratory procedures delivered first promising results after being successfully adapted and further developed. Based on this, the methods were classified as practicable, reproducible and representative.

Keywords: urban trees, nature-based solutions for rainwater management, structural soils, sponge-city-substrate for urban trees, laboratory methods, soil hydrology, soil physics

Executive Summary

Labormethoden zur bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Untersuchung des Schwammstadtsubstrats für Stadtbäume

Stadtbäume als Teil der grünen Infrastruktur im urbanen Raum spielen eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, den klimawandelbedingten Naturgefahren etwas entgegenzusetzen. Vor allem die regulierenden Ökosystemleistungen sind dabei von großer Wichtigkeit, darunter fallen beispielsweise die Kühlungsfunktion durch Beschattung und Verdunstung, die Feinstaubbindung und die Aufnahme von CO₂. Um diese Ökosystemleistungen effektiv erbringen zu können, müssen Bäume einerseits vital sein und andererseits ein gewisses Alter und somit eine gewisse Größe erreicht haben. Genau diese Voraussetzungen werden im städtischen Raum oftmals nicht erfüllt, da die Lebenserwartung von Stadtbäumen im Vergleich mit jenen in einer natürlichen Umgebung reduziert ist. Dafür verantwortlich ist eine Vielzahl an Störungen, die neben den klimatischen Bedingungen häufig im Wurzelraum zu finden sind.

Stadtböden sind oftmals durch anthropogene Veränderungen in ihrer Funktionalität stark eingeschränkt. Versiegelung, Verdichtung und andere Eingriffe hindern urbane Böden daran, ihre Funktion als adäquater Wurzelraum, als Filter und Puffer, sowie als Wasserhaushaltsregulator zu erfüllen. Aufgrund des Mangels an gesunden, vitalen und natürlichen Böden im urbanen Raum besteht die Notwendigkeit, spezielle Bauweisen und Substrate einzusetzen, um Stadtbäumen dennoch eine gute Lebensgrundlage bieten zu können.

Ein Beispiel hierfür sind Struktursubstrate, welche Bäumen die Möglichkeit geben sollen, unter versiegelten und verdichteten Flächen zu wurzeln. Ein solches Struktursubstrat wird in Österreich seit dem Jahr 2018 als Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume eingesetzt (Grimm et al., 2021b, S. 3), wobei ein ähnliches System aus Stockholm als Vorlage diente. Namensgebend war das Schwammstadtprinzip (Nguyen et al., 2019), welches die Rückkehr zu einem natürlichen Wasserkreislauf in Städten zum Ziel hat. Das Schwammstadtsubstrat besteht zum einen aus groben Steinen (Grobschlag) mit einer Körnung zwischen 90 und 150 mm und zum anderen aus einem oftmals sandbasierten Feinsubstrat mit organischen Zuschlagstoffen wie Pflanzenkohle und Kompost. Der Grobschlag wird in vorher ausgehobenen Baugruben eingebracht und anschließend verdichtet. Der verdichtete Grobschlag gewährleistet den Lastabtrag und in weiterer Folge die Überbaubarkeit. Es entsteht ein System an Hohlräumen, in die das Feinsubstrat mit Wasser und Druck eingeschlämmt wird. Dieser Einbau sorgt dafür, dass das Feinsubstrat unverdichtet vorliegt, mit dem Ziel einen möglichst geringen Eindringwiderstand für Wurzeln sowie eine möglichst hohe Luftkapazität dauerhaft sicherzustellen.

Als Bestandteil eines urbanen naturnahen Regenwassermanagements besteht die Möglichkeit Regenwasser von städtischen Oberflächen zu sammeln und gezielt in das Schwammstadtsubstrat einzuleiten. Dadurch soll die Wasserversorgung der Stadtbäume gewährleistet sowie die Kanalisation im Falle von Starkregenereignissen entlastet und die Grundwasserneubildung gefördert werden.

Auch wenn das Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume bereits vielerorts in Österreich angewandt wurde, fehlt ein standardisiertes Untersuchungsprozedere, um fundierte Kenntnisse über die bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Eigenschaften des Substrats ermitteln und kommunizieren zu können. So stellt sich beispielsweise die Frage, wie hoch die Luftkapazität, das Retentionsvolumen oder der Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser bei bestimmten Feuchtestadien sind.

Der Mangel an geeigneten Labormethoden zur Untersuchung solcher grobkörnigen Substrate bildete ursprünglich die Grundlage für die Entwicklung zweier vorläufiger Verfahren (Schüttversuch und Schlammversuch) am Bundesamt für Wasserwirtschaft. Ein Schüttversuch dient der Untersuchung des

reinen Feinsubstrats und ist mit vergleichsweise geringerem Zeit- und Materialaufwand durchführbar. Primär werden mit diesem Versuch verschiedene Feinsubstratmischungen verglichen. Beim Schlämmversuch hingegen wird das gesamte Schwammstadtsubstrat inklusive Grobschlag analysiert, wobei vor allem die Notwendigkeit eines großen Probenvolumens aufgrund des Grobschlags eine Herausforderung darstellt. Bei beiden Labormethoden werden gängige bodenphysikalische und bodenhydrologische Zielgrößen bestimmt, dazu zählen das Gesamtporenvolumen, die Wasserkapazität, die Feldkapazität, die Luftkapazität, die Trockenrohdichte und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit.

Der vorliegenden Arbeit lagen zwei Ziele zugrunde. Das erste Ziel bestand aus der Erprobung und Weiterentwicklung beider vorläufiger Laborverfahren, um repräsentative, reproduzierbare und praktikable Methoden zu schaffen. Als zweites Ziel sollten erste Ergebnisse generiert werden, die ein möglichst realistisches Bild über die bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Eigenschaften von Schwammstadtsubstraten im eingebauten Zustand zeichnen sollten.

Um die beiden genannten Ziele zu erfüllen, wurden Einflussgrößen definiert, wie beispielsweise die Zusammensetzung des Feinsubstrats oder der Feinsubstratanteil und anschließend abgestuft beziehungsweise variiert. Diese Variationen wurden miteinander kombiniert untersucht, um einerseits Aussagen über Auswirkungen der jeweiligen Einflussgrößen zu treffen und andererseits die Laborverfahren unter verschiedensten Bedingungen zu erproben.

Im Zuge der Versuchsdurchführung konnten beide Laborverfahren weiterentwickelt werden. Während beim Schüttversuch kleinere Adaptionen bezüglich des Substrateinbaus und des Ablaufs vorgenommen wurden, konnte beim Schlämmversuch erfolgreich eine Methodik entwickelt werden, die es erlaubt, neben dem Gesamtporenvolumen, der Wasserkapazität und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, durch einen gezielten Umbau auch den Wasseranteil bei niedrigeren Matrixpotenzialwerten wie bei dem weithin als Feldkapazität angesetzten Wert von 60 hPa ($p_F 1,8$) an derselben Probe zu bestimmen. Hierfür wurde eine keramische Platte eingesetzt, um unter Einstellung des definierten Unterdrucks Wasser aus dem Substratkörper zu entfernen. Zur gleichmäßigen Verteilung des Unterdrucks und um Schäden durch den Grobschlag zu verhindern, wurde eine Schicht feiner Sand zwischen Schwammstadtsubstrat und Keramikplatte eingebaut. Tensiometer dienten zur Überprüfung des Matrixpotenzials.

Die Schüttversuche zeigten auf, dass die Art und Weise, wie das Feinsubstrat in den Probenzylinder eingebracht wird, Auswirkungen auf die untersuchten hydrologischen Kennwerte hat. So führt beispielsweise ein höherer Wasseranteil des Feinsubstrats beim Probeneinbau tendenziell zu einer dichteren Lagerung.

Der Schlämmversuch lässt durch den realitätsnahen Probeneinbau des gesamten Schwammstadtsubstrats auf aussagekräftige Resultate schließen. Dabei wies der untersuchte reine Grobschlag mit einer Korngröße von 32/63 mm ein Gesamtporenvolumen von rund 43 Vol.-% auf. Wurde sandbasiertes Feinsubstrat im Ausmaß von 25 Vol.-% (geschüttetes Feinsubstrat bezogen auf das Gesamtprobenvolumen) in den Grobschlag eingeschlämmt, so reduzierte sich das Gesamtporenvolumen auf rund 22 Vol.-%. Der Wasseranteil bei Feldkapazität lag bei rund 6 Vol.-%, bei einer Luftkapazität von rund 16 Vol.-%. Außerdem wurde eine gesättigte hydraulische Leitfähigkeit von 18,6 mm/min gemessen. Jene Variante repräsentierte eine Mischung, wie sie derzeit in Österreich eingesetzt wird.

Bei einer zweistufigen Reduktion des Feinsubstratanteils auf 20 und 15 Vol.-%, konnte bei jener sandbasierten Variante des Schwammstadtsubstrats eine nahezu lineare Abnahme der Feldkapazität (5 und 4 Vol.-%), sowie eine nahezu lineare Zunahme des Gesamtporenvolumens (28 und 31 Vol.-%), der Luftkapazität (22 und 27 Vol.-%) sowie der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (24,6 und 34,0 mm/min) beobachtet werden.

Weiters wurde ein Vergleich zwischen der „österreichischen Variante“ mit 25 Vol.-% sandbasiertem Feinsubstrat und einer Variante mit 15 Vol.-% Feinsubstrat aus reiner Kompostkohle, wie sie beispielsweise in Schweden eingesetzt wird (Rose, 2020, S. 6), angestellt. Dabei zeigte sich, dass das Schwammstadtsubstrat mit reiner Kompostkohle ein höheres Gesamtporenvolumen (38 Vol.-%), eine höhere Feldkapazität (9 Vol.-%) sowie eine höhere Luftkapazität (29 Vol.-%) aufwies. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit war mit 12,1 mm/min niedriger.

Die entwickelten Laborverfahren bilden eine erste Grundlage zur Untersuchung der hydrologischen Funktionalität von Struktursubstraten, wie dem Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume. Die ersten Ergebnisse lassen auf reproduzierbare, repräsentative und praktikable Methoden schließen. Ableiten ließ sich ebenfalls, dass die Feinsubstratmischung sowie der Feinsubstratanteil die bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Eigenschaften des Schwammstadtsubstrats maßgeblich beeinflussen, was Möglichkeiten zur gezielten Adaption von Rezepturen für den realen Einbau aufzeigt.

1. Einführung

Bäume im urbanen Raum sind in der Lage, eine Vielzahl an Ökosystemleistungen zu erbringen (Salmond et al., 2016, S. 98ff). Von großer Wichtigkeit sind vor allem die Kühlungsfunktion durch Beschattung und Verdunstung, die Speicherung von CO₂ und die Verbesserung der Luftqualität (Moser-Reischl et al., 2017, S. 98ff). Als Grundvoraussetzung für die Erbringung dieser Ökosystemleistungen müssen die Stadtbäume einerseits vital sein und andererseits eine gewisse Größe sowie ein gewisses Alter erreichen (Brandenburg et al., 2015, S. 43). Gerade urbane Räume bieten einige Herausforderungen, die dafür sorgen, dass die Lebenserwartung von Stadtbäumen im Gegensatz zum Freiland deutlich reduziert ist (Roloff und Kehr, 2013, S. 8). Neben Belastungen wie Hitze und erhöhte Abgaswerte (Brandenburg et al., 2015, S. 43) findet sich ein Großteil der Störungen im Wurzelraum der Bäume (Benk et al., 2020, S. 27). Stadtböden sind meist durch anthropogene Veränderungen in ihrer natürlichen Funktionalität stark eingeschränkt, sei es als adäquater Wurzelraum, Filter oder Regulator des Wasserhaushalts (Sauerwein, 2004, S. 120). In Anbetracht dessen werden im städtischen Raum zwangsläufig spezielle Substrate und Bauweisen eingesetzt, um die Lebensbedingungen für Stadtbäume zu verbessern (FLL, 2010, S. 16).

Ein Beispiel hierfür ist das Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume, welches den Bäumen einen erweiterten Wurzelraum unter versiegelten und verdichteten Flächen bietet (Zeiser et al., 2021, S. 2). Das Schwammstadtsubstrat besteht aus einem Grundgerüst von groben Steinen, welche einerseits den Lastabtrag übernehmen und damit die Überbaubarkeit gewährleisten sowie andererseits ein System aus Hohlräumen schaffen. In diese Hohlräume wird Feinsubstrat mit Wasser und Druck eingeschlämmt, welches die Nährstoffversorgung der Bäume sicherstellen sowie die Entstehung eines wasser- und luftführendes Porensystems ermöglichen soll (Grimm et al., 2021a, S. 1). Der Einschlammvorgang bedingt das unverdichtete Vorliegen des Feinsubstrats, wodurch ein möglichst geringer Eindringwiderstand für Wurzeln gegeben ist (Zeiser et al., 2021, S. 2).

Neben dem Ziel die Wuchsbedingungen für Stadtbäume zu verbessern, soll das Schwammstadtsubstrat auch einen Teil zur Wiederherstellung eines natürlichen Wasserkreislaufs in Städten beitragen. Regenwasser von städtischen Oberflächen kann gezielt in das Schwammstadtsubstrat eingeleitet werden, wodurch einerseits ein temporärer Rückhalt des Niederschlagswassers erreicht und andererseits die Wasserversorgung des Baums sichergestellt werden soll. Überschüssiges Wasser kann entweder in den anstehenden Untergrund versickern oder wird über Notüberläufe abgeleitet (Grimm et al., 2021a, S. 1f).

Durch die Erwartungen und Anforderungen, die an Schwammstadtsubstrate gestellt werden, ergibt sich die Notwendigkeit, diese auf ihre bodenphysikalische und bodenhydrologische Funktionalität zu untersuchen. Der Mangel an standardisierten Labormethoden zur Untersuchung solcher Substrate, bildete die Grundlage für die Weiterentwicklung zweier am Bundesamt für Wasserwirtschaft vorläufig entwickelten Laborversuche im Zuge der vorliegenden Arbeit. Der dazu relevante fachliche Rahmen wird in den folgenden Grundlagenkapiteln ausführlich aufgespannt.

2. Aktueller Wissenstand zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats für Stadtbäume

Für eine umfassende Untersuchung des Schwammstadtsubstrats für Stadtbäume bedarf es einer Kombination aus Versuchen im Labor und eines Monitorings an realen Standorten. Die Abbildung 1 zeigt hierzu das Grundkonzept von Zeiser et al. (2021, S. 3). Bei den Laborversuchen werden die Substrateigenschaften analysiert, die zu einem großen Teil von der Porenstruktur abhängen. Beeinflusst werden diese Eigenschaften einerseits von den verwendeten Materialien und andererseits von den unterschiedlichen Einbauverfahren (Zeiser et al., 2021, S. 3). Ergänzt werden die Laborversuche durch Monitorings an realen Einbaustandorten. Ziele hiervon sind die Untersuchung des Baumwachstums und die Analyse des Wasserhaushalts. Gerade die Baustelleneinflüsse, wie beispielsweise ein fehlerhafter Einbau, können die Eigenschaften und Funktionsfähigkeit des Schwammstadtsubstrats erheblich beeinflussen. Dies sollte ebenfalls bei der Interpretation von Labordaten beachtet werden (Zeiser et al., 2021, S. 2f).

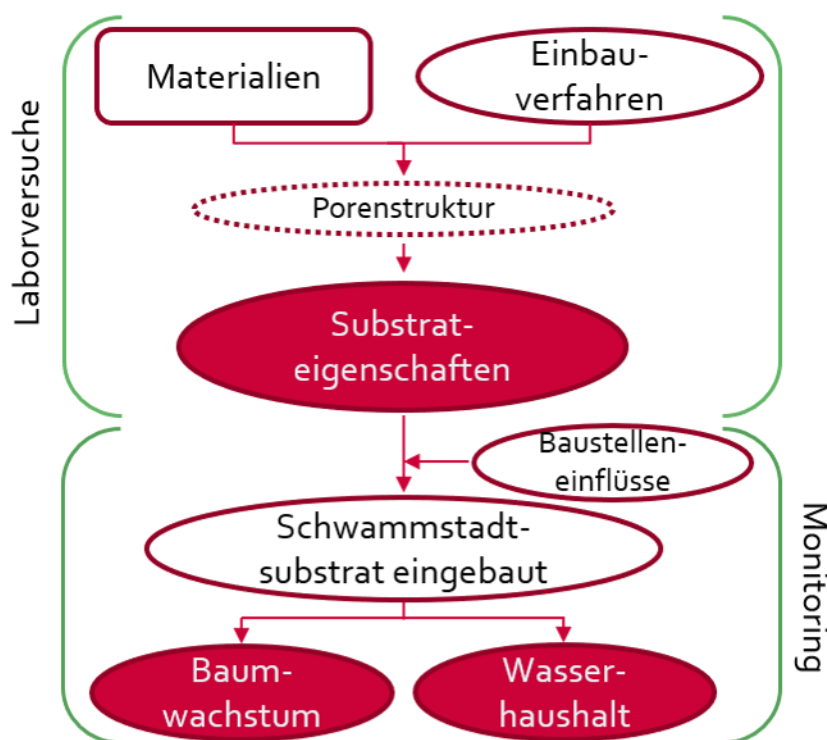


Abbildung 1: Schema zur ganzheitlichen Untersuchung des Schwammstadtsubstrats (Zeiser et al., 2021, S. 3)

Bereits im Einsatz befindliche Monitoring-Anlagen zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats sind beispielsweise in der Außenstelle der HBLFA Schönbrunn in der Jägerhausgasse (Wien) und in der Gradnerstraße in Graz situiert. Beteiligt sind hierbei das Bundesamt für Wasserwirtschaft, die HBLFA Schönbrunn sowie der Verein „Land schafft Wasser“ (Verein Land schafft Wasser, o. J.), während die Finanzierung von der Stadt Wien sowie dem Land Steiermark übernommen wurde.

Außerdem existieren derzeit zwei vorläufige Labormethoden zur bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Untersuchung des Schwammstadtsubstrats. Diese wurden am Bundesamt für Wasserwirtschaft am Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt unter der Zusammenarbeit von Erwin Murer und dem dort ansässigen Laborteam entwickelt. Es handelt sich dabei um den „Schüttversuch“ und um den „Schlammversuch“ (Zeiser et al., 2021, S. 3). Bei ersterem wird

ausschließlich das Feinsubstrat untersucht, während bei zweiterem das gesamte Schwammstadtsubstrat analysiert wird. Der Schüttversuch repräsentiert unter anderem einen ungünstigen Lagerungszustand des Schwammstadtsubstrats, indem eine mögliche Schichtbildung von reinem Feinsubstrat simuliert wird. Beim Schlammversuch hingegen wird der praxisübliche Zustand des mit Feinsubstrat eingeschlammten Grobschlags nachgebaut und anschließend untersucht (Schmidt und Murer, 2022, S. 14; Zeiser et al., 2021, S. 3).

3. Zielsetzung und Forschungsfragen

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit besteht darin, die hydrologische Funktionalität von Schwammstadtsubstraten zu bestimmen und in der Folge die Zusammensetzung der Substrate datenbasiert optimieren zu können. Schwammstadtsubstrate sind in ihrer Charakteristik nicht vergleichbar mit natürlichen Böden oder anderen Substraten, daher sind keine direkt anwendbaren Standardmethoden verfügbar. Beispielsweise wird in der FLL-Richtlinie „Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2“ für die Laboruntersuchung von überbaubaren Baumsubstraten ein Verdichtungsgrad von 95 % (Proctor-Dichte) empfohlen (FLL, 2010, S. 55). Aufgrund des unverdichteten Vorliegens des Feinsubstrats wird diese Einbaumethode für die Untersuchung des Schwammstadtsubstrats als wenig sinnvoll erachtet. Es ist davon auszugehen, dass die hydrologischen Eigenschaften des mit 95 % verdichteten Feinsubstrats nicht den realen Substrateigenschaften entsprechen und diese Methodik somit für eine hydrologische Charakterisierung nicht zielführend ist.

Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit Labormethoden zur bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Charakterisierung des Schwammstadtsubstrats erprobt und weiterentwickelt beziehungsweise adaptiert, um schlussendlich reproduzierbare und praktikable Methoden zu schaffen. Zusätzlich sollten erste repräsentative Ergebnisse generiert werden, die Aufschluss über die Eigenschaften des Schwammstadtsubstrats im eingebauten Zustand geben sollen. Daraus leiten sich folgende konkrete Forschungsfragen ab, die für die jeweiligen Versuche und Randbedingungen spezifiziert werden:

Forschungsfrage F1:

Wie können die Laborversuche zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats optimiert beziehungsweise weiterentwickelt werden, mit dem Ziel der Entwicklung einer repräsentativen, reproduzierbaren und praktikablen Methode?

Des Weiteren werden Einflussgrößen definiert, welche sich mutmaßlich auf die Eigenschaften des Schwammstadtsubstrats auswirken. Diese werden im Zuge der Laborversuche gezielt variiert und die Auswirkung auf die Ergebnisse der Messungen evaluiert. Folgende Forschungsfrage wird hierfür formuliert:

Forschungsfrage F2:

Welche Auswirkungen hat die Variation einer bestimmten Einflussgröße auf die bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Eigenschaften der untersuchten Substrate?

4. Grundlagen

4.1. Klimatische Herausforderungen im urbanen Bereich

Während in Zeiten des Klimawandels die mittlere Temperatur weltweit betrachtet seit der vorindustriellen Zeit um 1 Grad Celsius angestiegen ist, beträgt die Zunahme im Tiefland Österreichs bereits 1,8 °C (ZAMG, o. J. c). Zurückzuführen ist dieser Unterschied hauptsächlich auf die schnellere Erwärmung der Luft über Landflächen im Vergleich zu den thermisch behäbigeren Ozeanen (ZAMG, o. J. b). Erkennbar ist dies in der Abbildung 2. Die roten Linien repräsentieren die Jahresmitteltemperatur in Österreich und die violetten zeigen die globalen Werte. Während die dünnen Linien die tatsächlichen Messdaten wiedergeben, zeigen die dickeren Linien die gemittelten Trends.

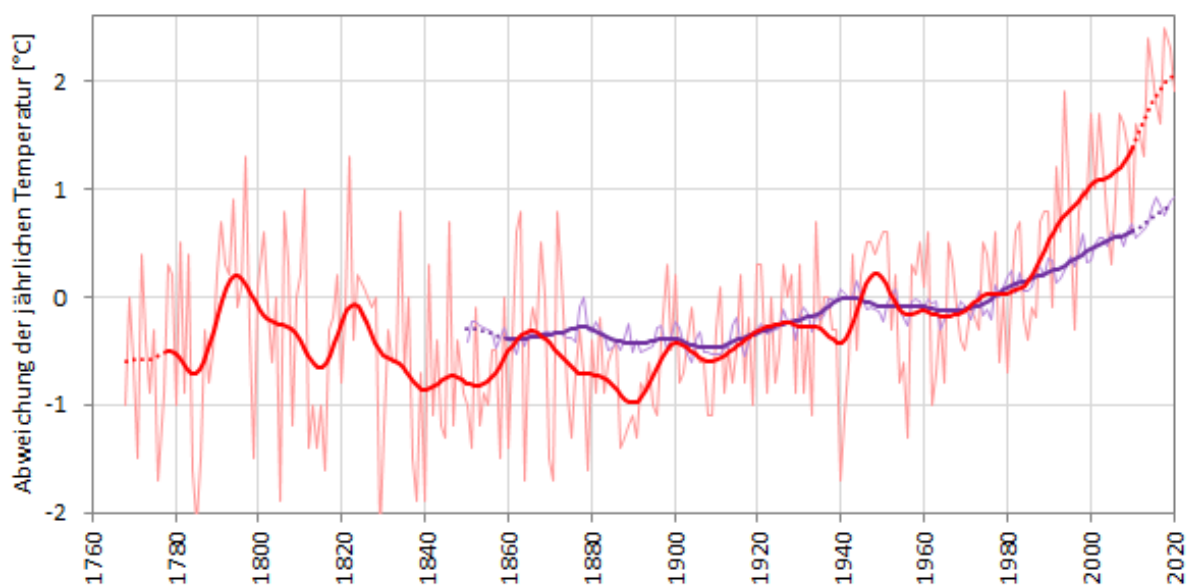


Abbildung 2: Abweichungen der mittleren Jahrestemperatur global (violett) und bezogen auf Österreich (rot) im Vergleich mit dem Durchschnitt der Jahre 1961-1990 (Auer et al., 2007; Morice et al., 2021; ZAMG, o. J. b)

Zusätzlich zum Anstieg der mittleren Jahrestemperatur nehmen warme Temperaturextreme zu. Dazu zählen beispielsweise Tropennächte, Hitzetage oder Wärmeperioden (ZAMG, o. J. a). In weiteren Klimaprognosen geht die ZAMG (o. J. d) je nach zukünftigen Treibhausgaskonzentrationen von einem weiteren Temperaturanstieg in Europa in den nächsten Jahrzehnten aus. Beim repräsentativen Konzentrationspfad „RCP 4.5“ beispielsweise wird mit einer Temperaturzunahme von 1,0 bis 4,5 °C im Vergleich zur mittleren Temperatur der Vergleichsperiode 1971-2000 bis zum Jahr 2100 gerechnet. Im Falle von höheren zukünftigen Treibhausgaskonzentrationen wird ein Anstieg der mittleren Lufttemperatur von 2,5 bis 5,5 °C erwartet, dies beschreibt der repräsentative Konzentrationspfad „RCP 8.5“ (ZAMG, o. J. d).

Wie Studien der AGES zeigen, können heiße Sommerwochen negative Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung haben und zu einer Hitze-bedingten Übersterblichkeit führen: für das Jahr 2018 wurde beispielsweise geschätzt, dass 550 Todesfälle in Österreich auf die Hitze zurückzuführen waren (AGES, 2022). Zum Vergleich übersteigt dies die Zahl der Verkehrstoten, welche 2018 bei 409 Personen lag (Statistik Austria, 2021).

Weiters bedingt eine Erwärmung der Luftmassen auch eine höhere Aufnahme von Wasserdampf. Dabei steigt der Wassergehalt in der Luft im Schnitt um 7 % für jedes Grad Celsius an

Temperaturzunahme. Daraus lässt sich wiederum theoretisch schlussfolgern, dass der Klimawandel auch stärkere flächige Niederschlagsereignisse bedingt (ZAMG, o. J. f). In der Realität lassen sich aber kaum präzise Aussagen und Prognosen zu zukünftigen Niederschlägen treffen, da hierbei noch viele weitere komplexe Faktoren eine Rolle spielen (ZAMG, o. J. e). Dennoch versucht die Studie „Prisk-Change“ aus dem Jahr 2010, durchgeführt von der Abteilung für Klimaforschung der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien, Antworten zu liefern. Dabei wurde die Anzahl vergangener Starkregenereignisse in Österreich aus dem Zeitraum 1963 bis 2006 mit der prognostizierten Anzahl für die Jahre 2007 bis 2094 verglichen (Hofstätter, 2010, S. 15–45). Die Ergebnisse zeigten im Sommerhalbjahr eine Zunahme um 15 bis 25 % für tägliche Niederschlagsereignisse mit einer 30-jährlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeit. Für das Winterhalbjahr werden österreichweit ähnliche Zunahmen prognostiziert. Im Osten und Südosten wird von einer noch deutlicheren Zunahme (20 bis 40 %) für das Szenario B1 ausgegangen.

Eine potenzielle Folge von Starkregenereignissen sind Überschwemmungen und damit einhergehende Schäden. In Wien ist das Kanalsystem darauf ausgelegt, Niederschläge mit einer Jährlichkeit von 5 Jahren problemlos abzuleiten (Grimm, 2010, S. 58). Alle Regenereignisse mit einer höheren Wiederkehrwahrscheinlichkeit können zu einem Überstau und somit zu klein- und großräumigen Überschwemmungen führen (Grimm, 2010, S. 58). Eine Adaption der Kanalisation beziehungsweise der Kläranlagen an diese Niederschlagsmengen ist einerseits technisch nicht möglich und andererseits aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll (Deinhammer et al., 2018, S. 5).

Gerade in urbanen Gebieten werden Wetterextreme wie Hitze, Trockenheit und Überflutungen durch den hohen Versiegelungsgrad und die hohe Gebäudedichte noch zusätzlich verstärkt (BBSR im BBR, 2015, S. 8). Bereits 1818 konnte Luke Howard einen im Jahresverlauf ständigen Temperaturunterschied zwischen dem städtischen London und den umgebenden ländlichen Gebieten feststellen (Howard, 1818, S. 90–105). Er führte die höheren Temperaturen in der Stadt auf ihre Struktur, die hohe Einwohnerzahl sowie die Nutzung von großen Mengen an Brennstoff zurück (Howard, 1818, S. 90–105). Brandenburg et al. (2015, S. 7) beschreiben den „Urban Heat Island-Effekt“ ebenfalls als Temperaturunterschied zwischen urbanen und ruralen Gebieten, der vor allem daher rührt, dass in urbanen Bereichen große Volumen an unbelebten Materialien Wärme aufnehmen und über die Nacht speichern.

Es tritt in dicht verbauten Gebieten weder durch Verdunstung von Pflanzen, noch durch nächtliche Ausstrahlung eine wesentliche Kühlung ein, was sowohl Mittel- als auch Extremtemperaturen am Folgetag erhöht. Somit sind Städte auch anfälliger für wetterbedingte Schäden an der Infrastruktur und stellen ein größeres gesundheitliches Risiko für die Bevölkerung dar (BBSR im BBR, 2015, S. 8).

In Anbetracht der genannten Gründe ist es somit von großer Wichtigkeit, Maßnahmen zu setzen, die einerseits zur Kühlung und andererseits zur Überflutungsvorsorge beitragen, besonders in urbanen Räumen. In den Fokus rückt dabei das sogenannte „Schwammstadt-Prinzip“ und damit einhergehend die Bedeutsamkeit von „grüner Infrastruktur“ sowie die Rückkehr zu einem natürlichen Wasserkreislauf.

4.2. Das übergeordnete Prinzip der Schwammstadt

Das Konzept einer Schwammstadt, welches international auch als „Sponge City“ bekannt ist (Griffiths et al., 2020, S. 1) bietet einen übergeordneten Lösungsansatz, um den oben beschriebenen Naturgefahren etwas entgegenzusetzen. Dabei handelt es sich um eine Strategie der Siedlungswasserwirtschaft, die unter anderem in einigen Städten Chinas seit dem Jahr 2013 umgesetzt wird (Nguyen et al., 2019, S. 147). In China wurde das übergeordnete Konzept ins Leben gerufen, um vor allem häufiger auftretende Überschwemmungen in Städten zu verhindern beziehungsweise abzuschwächen (Griffiths et al., 2020, S. 1). Die Stadt soll dabei ähnlich einem Schwamm agieren, indem so viel Regenwasser wie möglich von versickerungsfähigen Oberflächen aufgenommen wird.

Dies kann einerseits über natürliche Böden oder über eigens gebaute Systeme erfolgen. Schlussendlich soll das Regenwasser vorgereinigt, natürlichen Wasserkörpern zugeführt werden. Vor allem die Entlastung der Kanalisation soll erreicht werden und damit zur Überflutungsvorsorge beitragen (Griffiths et al., 2020, S. 2). In einer Schwammstadt wird versucht mit der Natur zu arbeiten, indem man den natürlichen Wasserkreislauf auch in dicht bebauten Gebieten weitgehend aufrechterhält. Das Ziel dabei ist es, ökologisch wertvolle und resiliente Städte zu schaffen (Yu, 2017, S. 11ff).

In anderen Ländern existiert diese Art der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung ebenfalls bereits seit längerem. Im Vereinigten Königreich wurde beispielsweise in den 1980er Jahren das Konzept der „*Sustainable Drainage Systems (SuDS)*“ entwickelt, welches die standardmäßige Ableitung des Regenwassers über die Kanalisation, durch naturnahe Versickerungssysteme ersetzen soll (Lashford et al., 2019). Ein ähnlicher Ansatz entstand in den USA unter dem Namen „*Low Impact Development (LID)*“, die ebenfalls eine naturnahe und kosteneffiziente Regenwasserbewirtschaftung zum Ziel hat (LeFevre et al., 2010, S. 333).

In Deutschland und Österreich hat sich der Terminus „Schwammstadt“ für ein naturnahes Regenwassermanagement in Städten durchgesetzt. So schreibt das deutsche Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR im BBR, 2015, S.10), dass beim Schwammstadtprinzip anfallendes Regenwasser in urbanen Räumen nicht der Kanalisation zugeführt wird, sondern vor Ort gespeichert und versickert werden soll. Dieses Wasser soll außerdem der Stadtvegetation zur Verfügung gestellt werden, die es in weiterer Folge verdunstet (BBSR im BBR, 2015, S. 10). Ergänzend führt vor allem die Retention von Regenwasser in Kombination mit „grüner Infrastruktur“ zum Ausgleich von Phasen mit unter- und überdurchschnittlich viel Wasser (Grimm und Schmidt, 2022, S. 15).

Dem übergeordneten Konzept der Schwammstadt können folglich viele verschiedene Planungen und Projekte, welche die genannten Kriterien erfüllen, zugeordnet werden. Auch für das in Österreich eingesetzte „Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume“ war das übergeordnete Schwammstadtprinzip namensgebend. Das Schwammstadtsubstrat kann somit als Teil des gleichnamigen Prinzips angesehen werden.

4.3. Grundlagen zu Stadtbäumen

Stadtbäume als Teil der urbanen „grünen Infrastruktur“ (Stangl et al., 2019, S. 17) finden sich an charakteristischen städtischen Standorten, wie beispielsweise Parks, Straßen, Parkplätzen und anderen öffentlichen Freiräumen (Moser-Reischl et al., 2017, S. 95f). Jeder einzelne Baum ist dabei in der Lage, eine Vielzahl von Ökosystemleistungen zu erbringen (Salmond et al., 2016, S. 98ff).

4.3.1. Ökosystemleistungen von Stadtbäumen

Als Ökosystemleistungen werden alle Nutzen und Vorteile von Ökosystemen bezeichnet, von welchen die Menschheit profitiert und die somit zur Steigerung des menschlichen Wohlbefindens führen. Generell werden diese in bereitstellende, regulierende, kulturelle und unterstützende Leistungen unterteilt (Millennium Ecosystem Assessment, 2005, S. v). Für Stadtbäume werden folgende Ökosystemleistungen von Moser-Reischl et al. (2017, S. 98) definiert:

- „Bereitstellend (Provisioning):“
 - Nahrung (Food)
 - Holz und Biomasse (Wood and biomass)
 - Wasser (Water)
 - Medizinische Ressourcen (Medicinal resources)
- Regulierend (Regulating):

- *Kohlenstoffbindung (Carbon storage)*
- *Abkühlung (Cooling)*
- *Beschattung (Shading)*
- *Verbesserung der Luftqualität (Air quality improvement), Feinstaubausfilterung (Particulate matter filtering)*
- *Hochwasserschutz (Mitigation of rainwater-runoff)*
- *Lärminderung (Mitigation of noise)*
- *Kulturell (Cultural):*
 - *Erholung (Recreation)*
 - *Lebensqualität (Life quality)*
- *Unterstützend (Supporting):*
 - *Lebensraum (Habitat)*
 - *Biodiversität (Biodiversity)*

In Anbetracht des Klimawandels spielen vor allem die regulierenden Dienstleistungen von Stadtbäumen eine wichtige Rolle, die von Moser-Reischl et al. (2017) wie folgt beschrieben werden. Stadtbäume sind in der Lage, durch Photosynthese das Treibhausgas CO₂ aus der Umgebung aufzunehmen und zu binden. Auch wenn sie einen geringeren Baumbestand als Wälder aufweisen, tragen sie in ihrer Gesamtheit dennoch ihren Teil zur Kohlenstoffspeicherung bei. Des Weiteren sind Bäume in der Lage, Feinstaub aus der Luft zu filtern und sorgen somit für eine Verbesserung der Luftqualität. Verantwortlich für den Ausstoß von Feinstaub sind anthropogene Prozesse. Vor allem Industrieanlagen und Abgase durch den Verkehrssektor spielen hierbei eine Rolle. Die Wichtigkeit der Feinstaubreduktion zeigt sich in dem Faktum, dass hohe Konzentrationen von Feinstaub zu gesundheitlichen Problemen, wie Herz-Kreislauf- oder Atemwegserkrankungen führen können. Stadtbäume tragen auch zur Lärmreduktion bei, indem der Schall vom Laub und Stamm gestreut wird. Besonders effektiv ist dies in unmittelbarer Nähe der Lärmquelle (Moser-Reischl et al., 2017, S. 98ff).

Zusätzlich haben Stadtbäume einen direkten und spürbaren Einfluss auf den Lebens- und Aufenthaltsraum Stadt, sowohl für Menschen, als auch für Tiere und Pflanzen. Stadtbäume sorgen für eine Erhöhung der Biodiversität und für eine Steigerung der Aufenthaltsqualität in urbanen Freiräumen (Brandenburg et al., 2015, S. 52).

Vor dem Hintergrund der Starkregenereignisse und der dadurch entstehenden möglichen Überlastungen von Kanalsystemen ist die Abflussminderung durch Stadtbäume ebenfalls eine wichtige Ökosystemleistung. Kann Regenwasser im direkten Pflanzbereich von Stadtbäumen versickern, wird der Regenwasserabfluss im Vergleich zu komplett versiegelten Flächen deutlich reduziert (Ennos et al., 2014, S. 64).

Hinsichtlich des „Urban Heat Island-Effekts“ und der Zunahme von warmen Temperaturextremen sind die mitunter wichtigsten Ökosystemleistungen die Abkühlungswirkung und die Beschattung (Moser-Reischl et al., 2017, S. 99). Bäume sind in der Lage sowohl die umgebende Lufttemperatur als auch die Oberflächentemperatur unter dem Kronenbereich zu senken. Verantwortlich dafür ist die Evapotranspiration, die Reflektierung von UV-Strahlung in einer gewissen Höhe sowie die Beschattung von Oberflächen. Dadurch kann der Temperaturunterschied zwischen einem besonnten Asphalt und einem durch Bäume beschatteten Asphalt bis zu 25 °C betragen (Armson, 2012, S. 109). Studien zeigen, dass Bäume im Nahbereich von Gebäuden für Energieeinsparungen sorgen können, indem sie durch die Beschattungs- und Verdunstungsleistung den Kühlaufwand in den Innenräumen reduzieren (Stangl et al., 2019, S. 19f). Auch spielen sie eine große Rolle in der Reduktion des Hitzestresses für Menschen, indem das thermische Wohlbefinden positiv beeinflusst wird (Stangl et al., 2019, S. 19). Selbst einzelne Stadtbäume sind in der Lage, diese Effekte zu erzielen, wenngleich Gruppenpflanzungen stärkere positive Auswirkungen auf die Temperatur und Luftqualität haben (Streiling und Matzarakis, 2003, S. 310). Die Beeinflussung des Mikroklimas hängt dabei von der Baumart, dem Baumalter und dem äußeren Erscheinungsbild ab, wie Stangl et al. (2019, S.19) aus unterschiedlichen internationalen Berichten und Publikationen aufzeigten.

All die genannten Ökosystemleistungen können jedoch nur effektiv und bestmöglich erbracht werden, wenn die Stadtbäume einerseits vital sind und andererseits ihr optimales Alter sowie ihre optimale Größe erreichen können (Brandenburg et al., 2015, S. 43). Die Grundlage für vitale Bäume bildet dabei der Boden mit den zugehörigen Bodenfunktionen (González-Méndez und Chávez-García, 2020, S. 5). Somit spielen die Eigenschaften des Wurzelraums eine wesentliche Rolle im Leben eines Baumes. Die drei wichtigsten Voraussetzungen für das Wurzelwachstum sind die Bodenluft, das Bodenwasser und der Eindringwiderstand des Bodens, also ein adäquater Wurzelraum. Wurzeln wachsen präferiert und zielgerichtet in Bodenbereiche mit der geringsten Dichte und somit dem geringsten Eindringwiderstand (Benk et al., 2020, S. 14–17).

4.3.2. Probleme und Herausforderungen für Stadtbäume

Viele Bäume in der Stadt vergreisen aufgrund der zahlreichen Herausforderungen im urbanen Raum bereits nach 10 bis 20 Jahren, manche sterben in diesem Alter sogar vollständig ab (Grimm et al., 2021a, S. 1). Roloff und Kehr (2013, S. 8) schätzen, dass Stadtbäume eine um 50 % reduzierte Lebenserwartung besitzen, wie dieselben Bäume in natürlicher Umgebung. Bei Straßenbäumen ist die Lebenserwartung nach ihren Erhebungen um 75 % reduziert. Neben üblichen Stressfaktoren wie Hitze und Abgasbelastung (Brandenburg et al., 2015, S. 43), finden viele Störungen im Wurzelraum statt (Benk et al., 2020, S. 27).

Stadtböden unterscheiden sich grundsätzlich von Böden an Naturstandorten (Benk et al., 2020, S. 13). Die FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2015, S. 177f) beschreibt Böden, deren Eigenschaften und Entwicklung von menschengemachten beziehungsweise anthropogen veränderten Materialien bestimmt wird, als Technosole. Weiters zählen zu dieser Referenzbodengruppe versiegelte Böden, sowie Böden, die durch die Verwendung von Geomembranen beeinflusst wurden. Technosole treten vor allem in urbanen und industriell geprägten Gebieten auf.

Gerade diese anthropogenen Veränderungen der urbanen Böden, schränken ihre Funktionalität erheblich ein, sei es als Wurzelraum, als Filter und Puffer gegenüber Schadstoffen oder zur Regulation des Wasserhaushalts (Sauerwein, 2004, S. 120). Sauerwein (2004, S. 119) unterscheidet bei Belastungen urbaner Böden zwischen stofflichen und bodenstrukturellen Veränderungen. Erstere beschreiben die negativen Auswirkungen von stofflichen Einträgen in die städtischen Böden, die allesamt, je nach eingebrachter Menge als potenzielle Schadstoffe gelten. Die Änderung der Bodenstruktur entsteht meist durch mechanische Eingriffe. Dazu zählen Verdichtungen oder Umlagerungen. Sowohl die stofflichen als auch die bodenstrukturellen Belastungen können deutliche Auswirkungen auf die chemischen, physikalischen, biologischen und schlussendlich die ökologischen Eigenschaften eines Bodens haben.

Explizit für Stadtbäume listen Benk et al. (2020, S. 27) folgende mögliche Störungen im Bodenbereich auf:

- „[...] *kleiner Wurzelraum*
- *Bodenversiegelung*
- *Bodenverdichtung*
- *Wassermangel*
- *Vernässung*
- *Nährstoffmangel*
- *extreme Boden-pH-Werte*
- *Wurzelschäden*
- *Bodenauftrag*
- *Bodenabtrag*

- *Fremdstoffeinträge (Streusalz, Baureststoffe, Hundeurin, Schwermetalle, Erdgas und andere Kohlenwasserstoffe usw.)“*

4.3.2.1. Begrenzter Wurzelraum

Ein Baum muss stets wachsen und Blattmasse erneuern, um vital zu bleiben. Dieses Wachstum ist jedoch nicht nur auf den oberirdischen Kronenteil beschränkt, sondern findet gleichermaßen im Bereich der Wurzeln statt (Benk et al., 2020, S. 29). Somit befinden sich Kronenvolumen und Wurzelvolumen stets in einem Gleichgewicht (FLL, 2010, S. 16). An Naturstandorten breiten sich Baumwurzeln zumeist deutlich weiter als die Kronentraufe aus und erreichen Tiefen zwischen 1,5 und einigen Metern. Im städtischen Raum werden diese Ausmaße zumeist nicht erreicht (FLL, 2010, S. 16).

Bereits bei der Planung werden oftmals Wurzelräume für Stadtbäume unterdimensioniert (Benk et al., 2020, S. 31-33f), außerdem sorgen verdichtete Bodenbereiche oder unterirdische Einbauten und damit verbundene Störungen für eine Begrenzung des durchwurzelnbaren Raums (Ow und Ghosh, 2017, S. 41). Nach Erfahrungsberichten von Benk et al. (2020, S. 22) finden sich trotz unmittelbarer Nähe von Straßenbäumen nahezu keine Wurzeln in Bereichen unter asphaltierten Straßen, die mit einem regelkonformen Aufbau errichtet wurden. Bei zumeist älteren Straßen ohne Regelaufbau konnten die Autor*innen eine Durchwurzelnung in den Bodenbereichen unter den Fahrbahnen beobachten. Ow und Ghosh (2017, S. 41) sehen die Gründe hierfür bei den möglichst stark verdichteten Bereichen unter Verkehrsflächen, die den Lastabtrag bestmöglich gewährleisten sollen. Diese Bereiche verhindern zumeist aufgrund der hohen Dichte eine Durchwurzelnung. In der Abbildung 3 ist die oberflächlich vollständig durchwurzelnende Baumscheibe eines Straßenbaums in Wien zu sehen, der von einem Gehsteig und von einer Straße umgeben ist.



Abbildung 3: Begrenzter Wurzelraum eines Straßenbaums in Wien

4.3.2.2. Bodenversiegelung

Die Bodenversiegelung ist eine weitere verbreitete Störung in urbanen Ökosystemen (Benk et al., 2020, S. 27).

„Bodenversiegelung bedeutet, dass der Boden luft- und wasserdicht abgedeckt wird, wodurch Regenwasser nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen versickern kann. Auch der Gasaustausch des Bodens mit der Atmosphäre wird gehemmt.

Innerhalb der Siedlungs- und Verkehrsflächen ist ein Teil der Böden durch darauf errichtete Gebäude versiegelt. Auch unbebaute Flächen – wie Freiflächen, Betriebsflächen, Erholungsflächen und Verkehrsflächen – sind teilweise mit Beton, Asphalt, Pflastersteinen oder wassergebundenen Decken befestigt und damit ganz oder teilweise versiegelt.“ (Umweltbundesamt, 2022)

Gaertig (2015, S. 6f) streicht heraus, dass bei zunehmendem Versiegelungsgrad im Nahbereich von Stadtbäumen ein deutlich geringeres Wachstum sowie eine verminderte Vitalität feststellbar sind. Ein Grund hierfür ist der erhöhte Oberflächenabfluss aufgrund der geringen bis nicht vorhandenen Wasserdurchlässigkeit der versiegelten Oberflächen, was in weiterer Folge zu Trockenstress bei den Bäumen führen kann (Benk et al., 2020, S. 39). Des Weiteren findet bei versiegelten Flächen kein oder nur ein eingeschränkter Gasaustausch statt, weshalb es einerseits zu einem Sauerstoffmangel und andererseits zu einer CO₂-Anreicherung im Wurzelraum kommen kann. Die beiden genannten Faktoren können in weiterer Folge die Wurzelatmung sowie das Wurzelwachstum hemmen und schlussendlich zum Absterben der Pflanze beitragen (Gaertig, 2015, S. 2ff). Laut Embrén et al. (2009, S. 7) ist die ausreichende Sauerstoffversorgung der Wurzeln der wichtigste Faktor für vitale Stadtbäume.

Benk et al. (2020, S. 130) konnten beobachten, dass Wurzeln gezielt in besser belüftete Bereiche mit einem geringeren Eindringwiderstand wachsen, dabei handelt es sich jedoch zumeist um Bettungsschichten, die um Leitungen und Rohre angelegt wurden. Vor allem Ausgleichsschichten unter Wegebelägen werden oft präferiert durchwurzelt, da sich hier die Grundvoraussetzungen Raum, Luft, Wasser und Nährstoffe befinden. In Abbildung 4 ist die Durchwurzlung der Bettungsschicht eines Betonpflasterwegs erkennbar. Die darunter befindlichen Bodenschichten sind gering oder gar nicht durchwurzelt.

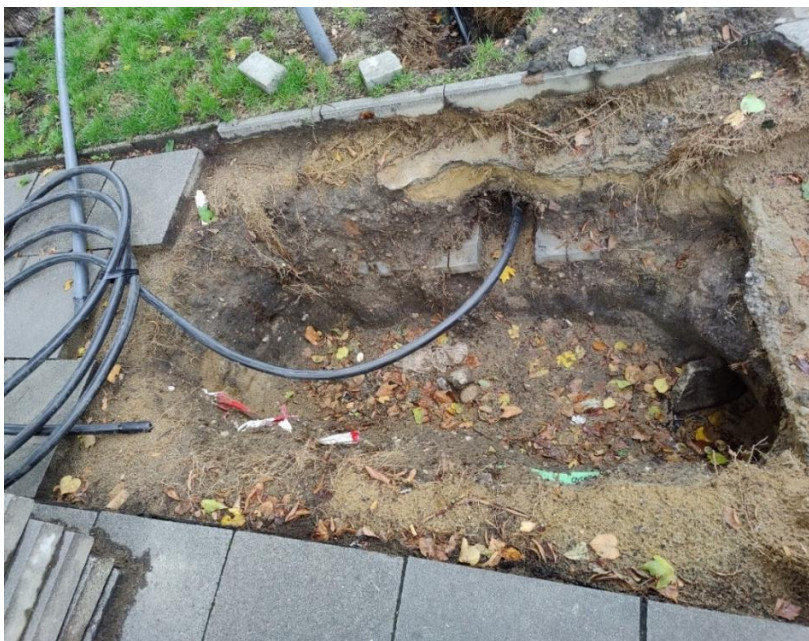


Abbildung 4: Erkennbare Durchwurzlung der Bettungsschicht eines Betonpflasterwegs in Hamburg

Hierbei kann es dann beispielsweise zur Anhebung von Belägen (Mullaney et al., 2015, S. 161) (siehe Abbildung 5) oder zum Eindringen der Wurzeln in Leitungs- und Rohrsysteme kommen (Benk et al., 2020, S. 39f). Durch das einsetzende Dickenwachstum können Wurzeln einen Druck von 12 bar aufbauen, weshalb es in Folge zu Schäden an der Infrastruktur kommen kann (Benk et al., 2020, S. 134). Ein ausreichender und adäquater Wurzelraum kann das Risiko für solche Vorkommnisse minimieren (Lucke und Beecham, 2019, S. 100).



Abbildung 5: Schäden an Pflasterungen durch Baumwurzeln

4.3.2.3. Bodenverdichtung

Gaertig (2015, S. 6) setzt die Auswirkungen von Bodenverdichtung auf Stadtbäume mit jenen der Bodenversiegelung gleich. Laut Day und Bassuk (1994, S. 11ff) wird im Zuge der Verdichtung eines Bodens der Makroporenanteil stark reduziert, was zu einer Erhöhung des Mikroporenanteils führt. Dadurch kann Wasser und Luft weniger gut in diese Bodenbereiche eindringen. Andererseits kann verdichteter Boden auch zu Staunässe und damit wiederum zu Sauerstoffmangel bei Wurzeln führen. Weiters führen die Autor*innen an, dass die Bodenverdichtung zu einer Reduktion oder zur gänzlichen Unterbindung der Durchwurzelung führt. In Abbildung 6 ist die Durchwurzelung eines Bodenprofils durch einen Stadtbaum in einer Grünfläche in Hamburg ersichtlich. Deutlich zu sehen ist die starke Durchwurzelung des vermutlich aufgeschütteten humosen Oberbodens im Vergleich mit dem äußerst gering durchwurzelteten verdichteten unteren Bereich.



Abbildung 6: Unterschiedlich starke Durchwurzlung der Schichten eines Technosols durch einen Stadtbaum in Hamburg

4.3.2.4. *Eintrag von Fremdstoffen*

Der Eintrag von Fremdstoffen, wie Hundeurin, Schwermetalle oder Streusalz in den Wurzelraum, kann negative Auswirkungen auf die Baumgesundheit haben (Benk et al., 2020, S. 27). Manche Stoffe, wie zum Beispiel bestimmte Baureststoffe (Ziegelbruch) können laut Benk et al. (2020, S. 92) jedoch auch standortverbessernd wirken.

Vor allem das im Winter eingesetzte Streusalz (NaCl) kann vermehrt bei Stadtbäumen in den Wurzelraum gelangen und zu Schäden führen. In Verbindung mit Wasser trennt sich das Streusalz in Natrium- und Chloridionen auf. Vor allem das Chlorid wird oftmals von Baumwurzeln aufgenommen und führt bei empfindlichen Baumarten zu Schäden, die von Blattnekrosen bis zum Absterben ganzer Kronenteile reichen können. Das Natrium kann in größeren Mengen die Struktur des Bodens ändern, wodurch schlussendlich Verschlammungen und Verdichtungen auftreten können (Nowotny, 2011, S. 78).

4.3.2.5. *Weitere Störungen*

Auch ein möglicher Nährstoffmangel kann für Stadtbäume ein limitierender Faktor sein. Embrén et al. (2009, S. 7) heben hierbei die Verbindung zur Bodenversiegelung hervor, die einerseits den Eintrag von organischen Stoffen verhindert und andererseits eine geringe mikrobielle Belebung des Bodens bedeutet. Weiters können extreme pH-Werte im Wurzelraum negative Auswirkungen auf Stadtbäume haben (Benk et al., 2020, S. 68).

Kommt es zu Schäden an den Bäumen, beispielsweise durch Bautätigkeiten, können an den verletzten Stellen Fäulepilze eintreten. Der Eintritt kann sowohl an den Wurzeln, als auch im Kronen- und Stammbereich erfolgen und die Bäume nachhaltig schädigen (Embrén et al., 2009, S. 7).

4.4. Struktursubstrate als spezielle Baumsubstrate

Die in Kapitel 4.3.2 genannten Störungen zeigen, dass viele Probleme und Herausforderungen für Stadtbäume im Wurzelraum zu finden sind. Daher ist es von großer Wichtigkeit genau diesen so zu gestalten, dass Bäume optimale Bedingungen vorfinden, um ihre Ökosystemleistungen bestmöglich zu erfüllen. Vor allem das Fehlen von vitalen, gesunden und natürlichen Böden im urbanen Raum, macht den Einsatz von speziellen Substraten notwendig.

4.4.1. Definition und Eigenschaften

Der Begriff „Substrat“ wird definiert als ein „[...] aus miteinander vermischten Stoffen oder aus aufbereiteten Böden nach definierten Anforderungen hergestellter Bodenersatz zur Pflanzgrubenverfüllung“ (FLL, 2010, S. 13).

„Moderne Substrate müssen daher folgende Ziele verfolgen:

- *Verkehrsfähigkeit durch die Erfüllung sämtlicher rechtlicher Vorgaben*
- *hohe Struktur- und Verdichtungsstabilität des Baumstandortes für den gesamten Lebenszyklus des Gehölzes*
- *geringe Neigung zum Porenverschluss unter anderem durch Feinstaubeinträge*
- *hoher Anteil an luftführenden Poren zur Aufrechterhaltung der Wurzelaktivitäten und der Bodenbiologie*
- *Lenkung der Wurzelentwicklung in tiefere Bodenschichten zur Vermeidung von Schäden an der technischen Infrastruktur, Erfüllung der Standsicherheit der Gehölze sowie Anbindung an das Grundwasser*
- *hohe Wasserleitfähigkeit zur Vermeidung von Vernässung und unzureichender Bodenluft*
- *ausreichende Wasserspeicherefähigkeit zur Reduktion des Pflegeaufwands*
- *ausreichende Nährstoffversorgung (Depotwirkung) mit guter Möglichkeit der späteren Nachdüngung*
- *gute Pufferkapazität oder hohe Auswaschungsfähigkeit gegenüber phytotoxischen Substanzen, unter anderem Hunde-Urin, chemischen Auftausalzen*
- *wirtschaftliche Herstellbarkeit durch eine ressourcenschonende Verwendung verfügbarer Stoffe und Mitverwendung örtlicher Böden*
- *geringer Pflegeaufwand der Oberfläche, unter anderem wenig Wildkrautentwicklung, Sauberkeit.“* (Balder, 2020, S. 13f)

In Anbetracht der Herausforderungen für Stadtbäume ist es notwendig, dass der Raum unter versiegelten Flächen beziehungsweise unter Verkehrsflächen als Wurzelraum genutzt werden kann. Hierfür müssen zwangsläufig spezielle Substrate und Bauweisen eingesetzt werden (FLL, 2010, S. 16). Wichtig ist hierbei, dass Baumwurzeln präferiert in Bereiche mit der geringsten Bodendichte und somit dem geringsten Widerstand vordringen (Benk et al., 2020, S. 14). Dies bedeutet folglich, dass die überbaubaren Baumsubstrate (Struktursubstrate) einerseits die Lasten der versiegelten Fläche aufnehmen und andererseits einen möglichst geringen Eindringwiderstand für Wurzeln aufweisen müssen (Bassuk et al., 2015, S. 11). Eine Skizze zur Funktionalität und zu den Bestandteilen von Struktursubstraten ist in der Abbildung 7 dargestellt.

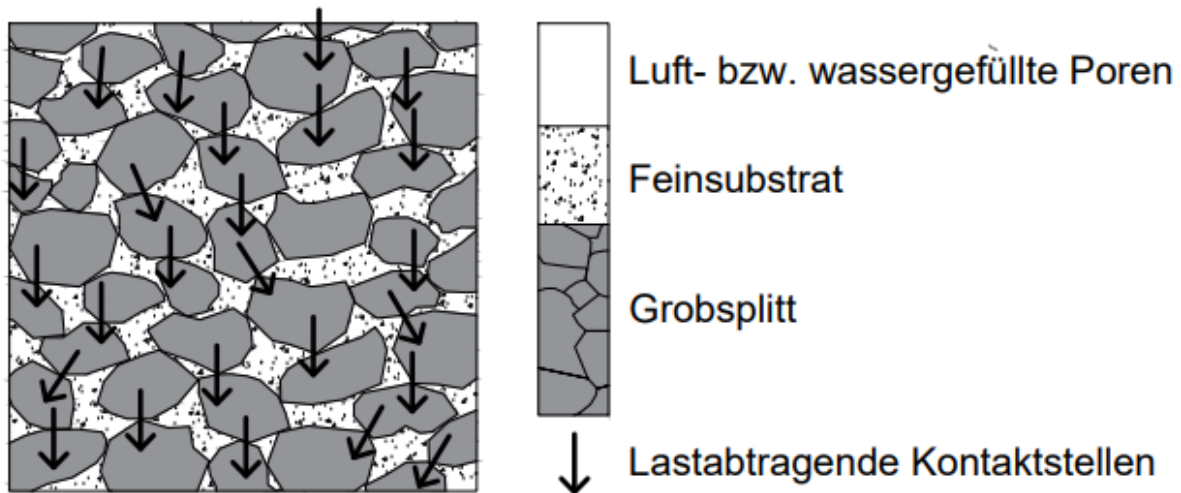


Abbildung 7: Skizze zum Aufbau und zur Funktionalität von Struktursubstraten

4.4.2. „CU-Structural Soil®“ (USA)

Die Idee der überbaubaren Baumsubstrate existiert auf internationaler Bühne bereits seit vielen Jahren. Am Urban Horticulture Institute der Cornell University in den USA wurde bereits in den 1990er Jahren ein solches entwickelt (Bassuk et al., 2015). Das Substrat ist unter dem Namen „*CU-Structural Soil®*“ patentiert. Es besteht zum einen aus lastabtragendem und verdichtbarem Grobsplitt und zum anderen aus einem unverdichteten Feinsubstrat, welches sich in den Poren zwischen dem Grobsplitt befindet (siehe Abbildung 7). Zusätzlich wird ein „*Tackifier*“, eine gelartige klebende Substanz ausgebracht, welche die Entmischung der Bestandteile verhindern soll. Das Substrat wird vorgemischt in die Baugrube eingefüllt und anschließend verdichtet. Der erste Einbau des Substrates erfolgte im Jahre 1994. Mittlerweile gibt es zahlreiche Anwendungen in den USA, Kanada und anderen Ländern (Bassuk et al., 2015, S. 11–16).

4.4.3. Stockholmer System (Schweden)

Die Stadt Stockholm hat im Jahre 2009 ein Handbuch zu Pflanzgruben veröffentlicht, in dem ein ähnliches strukturstabiles Substrat als „verdichtungsbarer Boden“ beschrieben wird. Da dieses System bereits vielfach in Stockholm angewendet wurde (Embrén et al., 2009, S. 12), wird es oftmals als „Stockholmer System“ bezeichnet (Grimm et al., 2021b, S. 2). Es besteht zum einen aus grobem Schotter (Grobsplitt, Grobschlag) mit Korngrößen zwischen 90 und 150 mm und zum anderen aus einem Feinsubstrat (Einschlammsubstrat, Schlammsubstrat) (Rose, 2020, S. 6f). Im Unterschied zum „*CU-Structural Soil®*“ werden der Grobschotter und das Feinsubstrat getrennt eingebaut (Embrén et al., 2009, S. 13). Zuerst wird der Grobschlag in einer 25 bis 30 cm starken Schicht in die Pflanzgrube eingebracht und verdichtet. Auf diese Schicht wird dann Feinsubstrat ausgebracht und mit Hilfe von Wasser und Druck in die Hohlräume des Grobschlags gespült beziehungsweise eingeschlämmt (Embrén et al., 2009, S. 41). Das Feinsubstrat, welches als „Pflanzerde Typ D“ bezeichnet wird, enthält unter anderem Lehm und Humus, um die Wasserspeicherfähigkeit und die Nährstoffverfügbarkeit zu gewährleisten sowie Sand, welcher dafür sorgt, dass das Feinsubstrat einfacher in die Hohlräume des Grobschlags eingeschlämmt werden kann (Embrén et al., 2009, S. 16).

Mittlerweile (Stand 2021) wird in Stockholm statt des beschriebenen Feinsubstrats ausschließlich Kompost und Pflanzenkohle im Mischungsverhältnis 1:1 eingeschlämmt (Rose, 2020, S. 6). Der Einschlammvorgang wird so lange durchgeführt, bis die Hohlräume vollständig mit Feinsubstrat gefüllt

sind. Dieser Zustand ist bei der „Pflanzerde Typ D“ bei einem Feinsubstratanteil von 25 bis 30 Volumenprozent je Kubikmeter Grobschlag erreicht (Embrén et al., 2009, S. 41). Bei Verwendung des „Kompost-Pflanzenkohle-Feinsubstrats“ werden ungefähr 15 Volumenprozent je Kubikmeter Grobschlag eingeschlämmt (Rose, 2020, S. 6).

Bei Verwendung der „Pflanzerde Typ D“ wird anschließend ein Langzeit-Düngermittel auf das eingeschlammte Substrat ausgebracht. Bevor die nächste Schicht Grobschotter eingefüllt wird, muss sichergestellt werden, dass die groben Steine noch sichtbar sind. Dadurch soll verhindert werden, dass Feinsubstrat kompaktiert wird. Nach dem Herstellen von 2 bis 3 Schichten folgt eine Schicht aus reinem Schotter mit der Korngröße 32 bis 63 mm, welche ebenfalls verdichtet wird. Darüber wird ein Geotextil ausgebracht, auf das der standardmäßige Aufbau für die jeweilige Oberflächengestaltung aufgebracht werden kann (Embrén et al., 2009, S. 40f).

Beim „Stockholmer System“ besteht außerdem die Möglichkeit, anfallendes Regenwasser von den versiegelten Flächen zu sammeln und gezielt in das Substrat über Einlaufschächte einzuleiten, um somit die Wasserversorgung der Stadtbäume sicherzustellen (Embrén et al., 2009, S. 14). In Abbildung 8 sind die Einlaufschächte zwischen den Baumscheiben nach Fertigstellung zu sehen. Laut einer Präsentation von Embrén (2021, S. 3) wurde das auf Grobschotter basierende Struktursubstrat, seit Beginn der Verwendung in Schweden 2002, bereits bei ungefähr 5000 Bäumen eingesetzt.



Abbildung 8: Einlaufschächte zwischen Baumscheiben in Stockholm

In weiterer Folge ist die schwedische Variante eines überbaubaren Baumsubstrats zur Erweiterung des Wurzelraums für Stadtbäume auch in anderen Ländern und Städten eingebaut worden (Umweltbundesamt GmbH, 2020). Es diente beispielsweise als Vorlage für das „Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume“, wie es derzeit in Österreich angewandt wird. Hierbei ist das Substrat für die Gegebenheiten in Österreich weiterentwickelt und adaptiert worden (Grimm et al., 2021b, S. 2).

4.4.4. Das Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume (Österreich)

In Anlehnung an das übergeordnete Schwammstadtprinzip (Kapitel 4.2), bekam die österreichische Weiterentwicklung des „Stockholmer Systems“ den Namen „Schwammstadtprinzip“ beziehungsweise „Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume“. Ein wesentlicher Grundsatz neben der beschriebenen Funktionalität ist dabei stets die Verwendung von möglichst lokal verfügbaren Materialien. Die erste Anwendung fand das Schwammstadtprinzip für Stadtbäume im Jahr 2018 in der Eggenberger Allee in der Stadt Graz (Grimm et al., 2021b, S. 3). Unterstützt wurde das Projekt von der HBLFA Schönbrunn (Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Gartenbau) sowie vom Bundesamt für Wasserwirtschaft. Weiters wurde 2018 der Arbeitskreis „Schwammstadt“ unter der Schirmherrschaft der ÖGLA (Österreichische Gesellschaft für Landschaftsarchitektur) gegründet, um das System bekannter zu machen und weiterzuentwickeln (Grimm et al., 2021a, S. 1).

Folgende bereits realisierte oder in Umsetzung befindliche Projekte in Österreich können dem Schwammstadtprinzip für Stadtbäume laut Grimm et al. (2021b, S. 3) zugeordnet werden (Stand 14.09.2021):

- Graz, Eggenberger Allee, Freiland ZT, Umsetzung bis Juni 2018
- Graz, Lendhotel, Studio Boden / LAM, Umsetzung bis August 2019
- Mödling, Guntramsdorfer Straße, 3:0 Landschaftsarchitekten, Umsetzung bis Juni 2019
- Graz, Alte Poststraße, Freiland ZT, Umsetzung bis November 2019
- Langenzersdorf, Grätzel-Oase, 3:0 Landschaftsarchitekten, Umsetzung bis Dezember 2019
- Wien, Johann-Nepomuk-Vogl-Platz, Karl Grimm Landschaftsarchitekten, Umsetzung bis September 2020
- Lanzenkirchen, Hauptplatz, 3:0 Landschaftsarchitekten, Umsetzung bis Dezember 2020
- Wien, Quartier am Seebogen, 3:0 Landschaftsarchitekten und Stoik ZT, Umsetzung ab Mai 2020
- Attnang-Puchheim, Forum Attnang-Puchheim, Umsetzung ab September 2020
- Eggenburg, Pulkauer Straße, NÖ Straßenbauabteilung 1 Hollabrunn, Umsetzung ab März 2021
- Innsbruck, Ing. Etzel-Straße, Stadtgartenverwaltung Innsbruck, Umsetzung ab März 2021
- Sierndorf, Wiener Straße, Karl Grimm Landschaftsarchitekten, Umsetzung ab April 2021
- Waidhofen/Ybbs, Freisinger Berg, Karl Grimm Landschaftsarchitekten, Umsetzung ab Mai 2021
- Obdach, Billa Filiale, lichtblauwagner architekten, Umsetzung ab Juni 2021
- Wien, Leopold-Ungar-Platz, FCP Fritsch und Chiari & Partner ZT GmbH, Umsetzung ab September 2021
- Wien, Praterstern, D/D landschaftsplanung, Umsetzung ab November 2021

Mittlerweile schätzt der Landschaftsarchitekt Daniel Zimmermann (2022) in einer schriftlichen Mitteilung die Gesamtzahl an umgesetzten Schwammstadtsubstrat-Projekten in Österreich auf rund 50 (Stand Herbst 2022).

4.4.4.1. Funktion und Zweck

Das in dieser Arbeit behandelte Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume soll die Wuchsbedingungen für Stadtbäume in stark bebauten Gebieten verbessern und somit ihre Lebensdauer erheblich verlängern. Dabei wird der Wurzelraum von Stadtbäumen erweitert, indem den Bäumen die Möglichkeit gegeben wird, auch unter versiegelten und verdichteten Flächen zu wurzeln. Dadurch können die Stadtbäume ein weitreichenderes Wurzelwerk ausbilden, um letztlich die Chancen zu erhöhen, den anstehenden Boden ebenfalls zu durchwurzeln (Zeiser et al., 2021, S. 2).

Analog zum „Stockholmer System“ sorgt der verdichtete Grobsplitt einerseits für den Lastabtrag, wodurch verkehrliche Belastungen aufgenommen werden können, und andererseits entstehen durch die groben Steine zahlreiche Hohlräume. In diese kann Feinsubstrat eingeschlämmt werden, sodass die Bäume mit pflanzenverfügbaren Nährstoffen versorgt werden und ein luft- und wasserführendes Porensystem entsteht (Grimm et al., 2021a, S. 1). Der lastabtragende Grobschlag ermöglicht außerdem, dass das Feinsubstrat dauerhaft unverdichtet vorliegen kann und somit einen geringen Eindringwiderstand für Wurzeln aufweist (Zeiser et al., 2021, S. 2).

Des Weiteren verbessert ein hoher Anteil an groben Steinen die Standfestigkeit eines Baums. Einerseits lastet durch den hohen Skelettanteil und gegebenenfalls durch die Schichten des Oberflächenbelags mehr Gewicht auf den Wurzeln und andererseits begünstigen enge Spalten zwischen Steinen die Verankerung der Wurzeln (Benk et al., 2020, S. 17).

Der sogenannte Schwammstadtkörper ist auf Grund der verbleibenden Grobporen und Hohlräume auch geeignet als temporärer Retentionskörper zu fungieren, wodurch Regenwässer von städtischen Oberflächen gezielt eingeleitet werden können. Bei Stadtbäumen, die in ihrer unmittelbaren Umgebung besonders hohe Versiegelungsgrade vorfinden, ist diese Einleitung des Regenwassers für die Wasserversorgung des Baums zwingend notwendig. Über Einlaufschächte und in weiterer Folge verteilende Sickerrohre erfolgt die Wasserzufuhr in den Wurzelraum. Außerdem erfolgt über diese Einbauten der Luftaustausch zwischen Substrat und Atmosphäre. Jenes Wasser, welches durch das Schwammstadtsubstrat nicht gespeichert werden kann, versickert ins Grundwasser oder wird im Falle eines Überstaus über Notabläufe abgeleitet (Grimm et al., 2021a, S. 1f). Der vereinfachte Wasserfluss in einem Schwammstadtsubstrat-System ist in der Abbildung 9 ersichtlich. Auf den versiegelten Flächen anfallendes Regenwasser wird über eine offene Baumscheibe in das Schwammstadtsubstrat geleitet. Das pflanzenverfügbare Bodenwasser wird vom Stadtbaum aufgenommen und über die Blattflächen verdunstet.

Wie bereits in Kapitel 4.3.1 beschrieben sind die drei wichtigsten Voraussetzungen für das Wurzelwachstum ausreichend Bodenluft, ausreichend Bodenwasser sowie ein möglichst geringer Eindringwiderstand (Benk et al., 2020, S. 15). Das Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume bietet diese Voraussetzungen. Dadurch sollen Stadtbäume wiederum ihre Ökosystemleistungen, wie beispielsweise Kühlung und Beschattung bestmöglich erfüllen können. Außerdem trägt die Einleitung von Regenwasser zur Entlastung der Kanalisation und dadurch auch zur Überflutungsvorsorge bei. Weiters kann durch die Aufrechterhaltung des natürlichen Wasserkreislaufs und der Versickerung des Regenwassers vor Ort eine Grundwasseranreicherung erfolgen (Grimm et al., 2021b; Grimm und Schmidt, 2022; Zeiser et al., 2021).

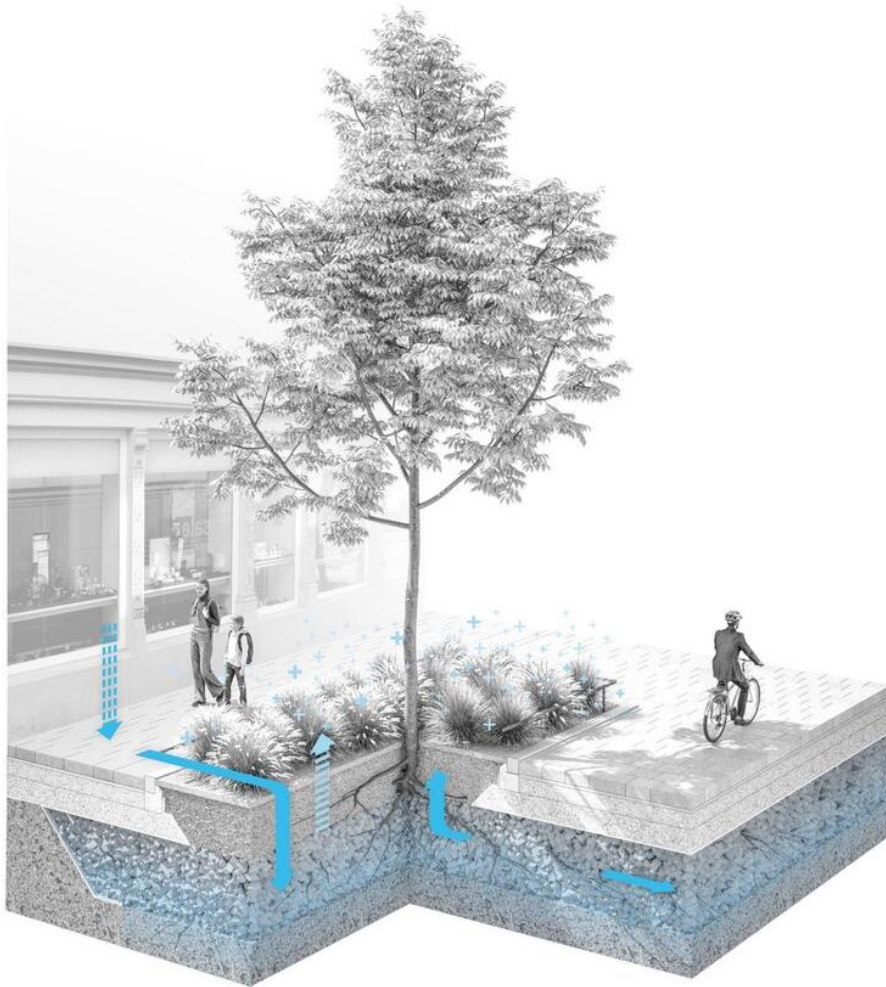


Abbildung 9: Axonometrie zum Wasserfluss im Schwammstadtsubstrat-System (3:0 Landschaftsarchitektur, o.J.)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Schwammstadtprinzip für Stadtbäume eine „[...] Bauweise ist, die

- *Bäumen einen ausreichenden Wurzelraum ermöglicht*
- *Bäume dauerhaft mit Bodenluft, Wasser und Nährstoffen versorgt*
- *Bäume in befestigten (Verkehrs)flächen ermöglicht*
- *ein Bewässerungssystem für Bäume darstellt*
- *mit gesunden, langlebigen und gut wasserversorgten Bäumen urbanen Hitzeinseln entgegenwirkt*
- *Niederschlagswasser verdunstet und versickert und so zur Verbesserung des lokalen Wasserhaushalts beiträgt*
- *mit unterirdischen Retentionsräumen urbanen Sturzfluten bei Starkregen entgegenwirkt“* (Grimm und Schmidt, 2022, S. 38)

4.4.4.2. Bautechnische Praxis und Materialien

Das folgende Kapitel basiert auf Erfahrungen von mehreren Personen, die sich intensiv mit dem Thema Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume auseinandersetzen, sei es in der Planung, der Baubegleitung oder in der Forschung. Als Quellen dienten Präsentationen, Vorträge und Tagungsbeiträge. Die Inhalte

zur bautechnischen Praxis sowie zu den verwendeten Materialien spiegeln somit den derzeitigen Wissensstand wider, der aufgrund von Weiterentwicklungen und neuen Erkenntnissen stetigen Änderungen unterworfen ist.

Bei einem Vergleich zwischen der Stockholmer Variante und dem österreichischen Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume fällt auf, dass sich der Einbau, der Aufbau sowie die verwendeten Materialien ähneln beziehungsweise gleichen. Ein Unterschied besteht vor allem in der Zusammensetzung des Feinsubstrats.

Grundvoraussetzungen:

Wie Grimm et al. (2021a, S.2) im Tagungsband der Aqua Urbanica 2021 in Innsbruck konstatieren, sollte mit dem Schwammstadtprinzip jedem Stadtbaum ein Minimum von 35 m³ an initialem durchwurzelbarem Raum zur Verfügung gestellt werden. Außerdem muss beim Einsatz des Schwammstadtsubstrats stets auf die Gegebenheiten vor Ort eingegangen werden, weshalb für jeden Standort und jedes Projekt eine spezifische Planung zu erfolgen hat. Zu berücksichtigen sind dabei unter anderem die Topografie, der anstehende Untergrund, Einbauten und Leitungen sowie die Menge und Qualität des eingeleiteten Wassers. Beispielsweise sollten stark verunreinigte Wässer normgemäß vorgereinigt werden, bevor sie in das Schwammstadtsubstrat-System gelangen. Dies kann beispielsweise über Sickerbecken mit Bodenfiltern erfolgen. Auch die durch Salzstreuung mit Chlorid verunreinigten Winterwässer sollten nicht in den Wurzelraum gelangen. Hierfür gibt es ebenfalls unterschiedliche Lösungen, wie zum Beispiel verschiedene Trennanlagen (Grimm et al., 2021a, S. 2).

Aufbau des gesamten Systems:

Der vereinfachte Aufbau des Schwammstadtprinzips für Stadtbäume ist in Abbildung 10 erkennbar. Die Grafik wurde vom Landschaftsarchitekturbüro 3:0 unter Mithilfe des Bundesamts für Wasserwirtschaft sowie der HBLFA Schönbrunn erstellt. Ersichtlich ist, dass die Stadtbäume in Baumsubstrat (siehe Nummer 9 in der Abbildung 10) gepflanzt werden und die Schwammstadt sich als Wurzelraumerweiterung erst darunter befindet. Erkennbar sind außerdem die versiegelten Oberflächen inklusive der Tragschichten (Nummer 1), welche getrennt durch ein Vlies (Nummer 2) direkt über dem Schwammstadtkörper verortet sind. Befinden sich Gebäude in der Nähe, wird die Schwammstadt auf dieser Seite durch wasserundurchlässige Schutzlagen (Nummer 11) vom anstehenden Boden abgetrennt. Die oberste Schicht des Schwammstadtkörpers wird von der Belüftungs- und Verteilungsschicht (Nummer 3) gebildet. Sie dient der Verteilung von Luft und Wasser, welche über den Einlaufschacht (Nummer 10) in den Untergrund gelangen. Unter der Verteilungsschicht befindet sich das eigentliche Schwammstadtsubstrat (Nummer 4) bestehend aus Grobschlag mit eingeschlammtem Feinsubstrat. Darunter befindet sich der anstehende Untergrund (Nummer 5), welcher im Laufe der Zeit ebenfalls durchwurzelt werden soll (3:0 Landschaftsarchitektur et al., o. J.).

der Güteklasse A+ und von Pflanzenkohle mit der Zertifizierung EBC-Urban gebildet. Schmidt (2011, S. 28) hält fest, dass Pflanzenkohle beziehungsweise Biokohle durch Pyrolyse von Biomasse entsteht. Laut Schmidt ist sie kein Düngemittel, sondern wirkt als Trägermaterial für Nährstoffe und bildet weiters ein Habitat für etliche Bodenlebewesen. Dies liegt vor allem an der hohen Porosität und der damit verbundenen großen spezifische Oberfläche von ungefähr 300 m² pro Gramm (Schmidt, 2011, S. 28). Außerdem besitzt Pflanzenkohle eine hohe Wasserspeicherkapazität. Sie ist in der Lage „[...] bis zur fünffachen Menge ihres Eigengewichts an Wasser und den darin gelösten Nährstoffen aufzunehmen“ (Schmidt, 2011, S. 28). Diese Eigenschaft ermöglicht außerdem die potenzielle Aufnahme und Fixierung von toxischen Stoffen. Pflanzenwurzeln können somit über einen längeren Zeitraum von der hohen Nährstoffverfügbarkeit sowie von Symbiosen mit Mikroorganismen im Zusammenhang mit Pflanzenkohle profitieren (Schmidt, 2011, S. 28).

Auch Studien in China haben gezeigt, dass die Beimengung von Pflanzenkohle beispielsweise in Dachbegrünungssubstraten einen positiven Einfluss auf die Wasserspeicherefähigkeit des Substrats, das pflanzenverfügbare Wasser, die Anzahl und Abundanz der Mikroorganismen sowie generell auf das Pflanzenwachstum hat (Chen et al., 2018, S. 340). Pflanzenkohle kann außerdem als eine Langzeit-Senke für atmosphärisches CO₂ dienen. Wird sie in den Boden eingebracht, wird der in der Pflanzenkohle befindliche Kohlenstoff über einen sehr langen Zeitraum gespeichert (Glaser et al., 2002, S. 225). Zu beachten ist, dass Pflanzenkohle vor der Verwendung als Substrat erst mit Nährstoffen „aufgeladen“ werden sollte. Geschieht dies nicht, nimmt die Kohle in den ersten Monaten Nährstoffe auf und bindet diese, was in weiterer Folge zu einem Nährstoffmangel bei darin wachsenden Pflanzen führen kann (Schmidt, 2011, S. 28). Eine Möglichkeit der „Aufladung“ besteht in der Vermengung mit Kompost. Dabei wird Pflanzenkohle und Kompost im Verhältnis 1:1 gemischt und anschließend für mindestens zwei Wochen gelagert. Während der Lagerung muss darauf geachtet werden, dass die Mischung zumindest zweimal gewendet wird und stets durchfeuchtet bleibt (Schmidt, 2011, S. 31).

In der Abbildung 11 ist im Bildhintergrund mittig eine Anhäufung von Feinsubstrat und rechts eine Anhäufung von Grobschlag erkennbar. Im Bildvordergrund sieht man den bereits mit Feinsubstrat eingeschlammten Grobschlag.



Abbildung 11: Feinsubstrat und Grobschlag am Praterstern

Einbau des Substrats:

Schmidt (o.J., S. 21) beschreibt in einer online abrufbaren Präsentation den Ablauf des Schwammstadtsubstrat-Einbaus. Dieser erfolgt sehr ähnlich zum „Stockholmer System“. Begonnen wird mit dem Aushub für den späteren Schwammstadtkörper (siehe Abbildung 12). Laut Murer (2022, S. 5) soll das Planum ausreichend tragfähig sein sowie eine bestimmte Wasserdurchlässigkeit erfüllen. Die Überprüfung erfolgt mit einer Lastplatte beziehungsweise mit Hilfe eines Infiltrationsversuchs. Letztlich sollte die Durchlässigkeit des Planums so hoch sein, dass bei einem zu definierenden Niederschlagsereignis Wasser so lang zurückgehalten werden kann, dass alle speicherfähigen Bestandteile gesättigt sind, und dann langsam in den Untergrund versickert.

Laut Schmidt (o.J., S. 21) wird als nächster Schritt die erste Lage Grobschlag eingebracht (siehe Abbildung 13) und mit einer Rüttelplatte verdichtet (siehe Abbildung 15). In der Abbildung 14 sind das Planum und der Grobschlag sichtbar. Im Bildvordergrund liegt dieser noch unverdichtet vor, während er im Bilderhintergrund bereits verdichtet wurde. Im Anschluss wird laut Schmidt das Feinsubstrat gleichmäßig am Grobschlag verteilt (siehe Abbildung 16) und mittels Wasserschlauchs in die Hohlräume eingeschlämmt (siehe Abbildung 17).

Analog zum ursprünglichen „Stockholmer System“ werden zwischen 25 und 30 % Feinsubstrat eingebracht. Bei aktuellen Projekten sind es nach mündlicher Aussage vom Arbeitskreis Schwammstadt (2022) zumeist 25 %. Im Zuge eines Vortrags von Schmidt und Murer (2022, S. 7) auf der Fachtagung „Bäume in der Stadt“ in Zürich, führen die Vortragenden an, dass in Bereichen des Schwammstadtkörpers, wo keine Baumpflanzung angedacht ist, der Grobschlag auch ohne Feinsubstrat eingebaut werden kann. Dieser Bereich besitzt somit ein höheres Gesamtporenvolumen und kann im Falle eines Starkregenereignisses mehr Regenwasser aufnehmen, jedoch nicht pflanzenverfügbar speichern. Diese Bereiche sind laut Schmidt und Murer ebenfalls durchwurzelbar.

Das Schwammstadtsubstrat wird in zumindest 2 Lagen mit jeweils maximal 30 cm Höhe eingebaut, um eine wirksame Verdichtung zu ermöglichen (Murer, 2022, S. 6). Während der Bauphase muss sichergestellt werden, dass das Feinsubstrat nicht durch den Grobschlag der nächsten Lage verdichtet wird und dadurch eine stauende Schicht entsteht. Aus diesem Grund ist darauf zu achten, dass nach dem Einschlämmen noch mindestens die halbe Korngröße des Grobschlags sichtbar ist (Murer, 2022, S. 11). Nach Fertigstellung der Schwammstadtsubstratschichten, erfolgt darüber die Ausbringung der Belüftungs- und Verteilschicht, welche ebenfalls verdichtet wird. Diese Schicht besteht aus demselben Material wie der Grobschlag, zumeist mit einer Korngrößenverteilung von 32/63 mm und beinhaltet die für die Funktion des Gesamtsystems unbedingt notwendigen Drän- beziehungsweise Verteilrohre. Direkt unter den Baumpflanzungen sollte sich keine Verteilschicht befinden, da diese ohne Feinsubstrat schwieriger zu durchwurzeln ist (Schmidt und Murer, 2022, S. 20). Die Verteilrohre helfen dabei, den Gasaustausch aufrecht zu erhalten sowie die Wasserverteilung effizienter zu gestalten. Dabei kann in die Rohre nicht nur Regenwasser eingeleitet werden, durch sie kann auch gezielt bewässert werden (Murer, 2022, S. 14). Als nächsten Schritt werden gegebenenfalls die Baumscheibeneinfassungen gesetzt (Schmidt, o.J., S. 22). Danach wird auf der Verteilschicht ein Geotextil ausgebracht, um zu verhindern, dass Feinanteile in diese gelangen. Hierfür müssen alle Flächen sorgfältig abgedeckt sein (Murer, 2022, S. 13). Durchwurzelungsbereiche müssen jedenfalls freigelassen werden, da Wurzeln Geotextile kaum durchdringen können (Schmidt und Murer, 2022, S. 22). Anschließend werden die Bäume in ein Baumsubstrat gepflanzt. Weiters werden direkt auf das Geotextil die standardmäßigen Tragschichten für die jeweiligen Oberflächengestaltungen ausgebracht und die Oberflächen hergestellt (Schmidt, o.J., S. 22f).



Abbildung 12: Aushub der Pflanzgrube



Abbildung 13: Einbringen des Grobschlags



Abbildung 14: Einschichtig ausgebrachter Grobschlag



Abbildung 15: Verdichtung des Grobschlags mittels Rüttelplatte



Abbildung 16: Aufbringen des Feinsubstrats auf die erste verdichtete Grobschlagschicht

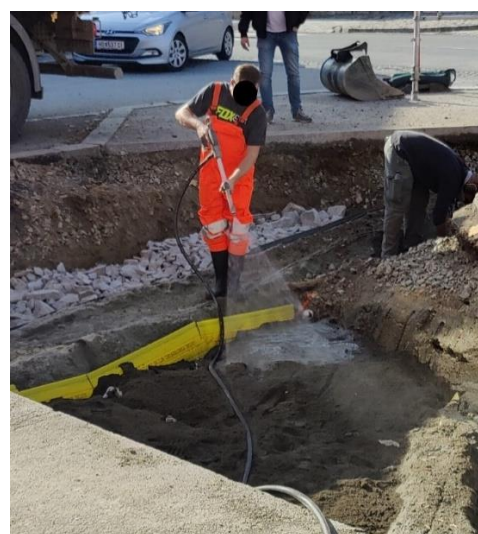


Abbildung 17: Einschlämmen des Feinsubstrats in die Hohlräume des Grobschlags

4.5. Bodenphysikalische und bodenhydrologische Grundlagen

Böden setzen sich aus Mineralen, welche in verschiedenen Größen und Arten vorkommen und organischen Teilchen zusammen. Diese beiden Bestandteile erzeugen durch ihre Anordnung ein Bodengefüge, welches wiederum ein bestimmtes System an Hohlräumen besitzt. In den unterschiedlich großen und verschieden geformten Hohlräumen, die auch als Poren bezeichnet werden, befindet sich entweder Bodenluft oder Bodenwasser mit darin gelösten Nährsalzen und Gasen (Baver, 1959, S. 1).

4.5.1. Korngröße und Bodenart

Ein wichtiger Parameter zur Beschreibung von Böden ist die Korngrößenverteilung. Diese hat großen Einfluss auf die Eigenschaften eines Bodens (Scheffer et al., 1984, S. 18). Eingeteilt werden die Korngrößen in Fraktionen. Laut ÖNORM L 1061-2 (Austrian Standards, 2019b, S. 4) werden die Körner mit einer Größe unter 2 mm als Feinboden bezeichnet, wohingegen die Fraktionen größer gleich 2 mm als Grobboden beschrieben werden. Wie Hillel (1980, S. 56f) beschreibt, gibt es international unterschiedliche Einteilungen für die Korngrößenklassen der Feinbodenfraktionen. Die ÖNORM L 1061-2 (Austrian Standards, 2019b, S. 4f) unterteilt den Feinboden in die Ton-Fraktion (0-0,002 mm), die Schluff-Fraktion (0,002-0,063 mm) und die Sand-Fraktion (0,063-2 mm).

Weiters werden laut Scheffer et al. (1984, S. 20f) auf Basis der Korngrößenfraktionen Bodenarten definiert. Unterschieden werden Sand-, Schluff-, Lehm- und Tonböden, welche noch präziser mit den Adjektiven sandig, schluffig, lehmig und tonig beschrieben werden können.

Aus der unterschiedlichen Körnung der Bodenarten resultieren auch unterschiedliche Bodeneigenschaften. Auch für Bäume spielen diese Bodeneigenschaften eine entscheidende Rolle, dies zeigt sich deutlich am unterschiedlichen Bewässerungsbedarf. Folgend wird ein Gedankenexperiment von Benk et al. (2020, S. 59f) zusammengefasst:

Angenommen es existieren drei völlig gleiche Bäume, mit völlig gleichen Standortparametern, jedoch mit dem Unterschied, dass einer in einem Sandboden, der zweite in einem Schluffboden und der dritte in einem Tonboden wurzelt. Die Bäume haben dabei keinen Anschluss zum Grundwasser und besitzen alle einen Kronendurchmesser von 10 m. Der durchwurzelte Raum entspricht dabei der Kronenprojektionsfläche mit einer Tiefe von 80 cm. Aus Tabellenwerten abgeschätzt macht der pflanzenverfügbare Wasserspeicher für den Sandboden 5.690 l, für den Schluffboden 18.960 l und für den Tonboden 9.480 l aus. Schätzungsweise kann der Wasserverbrauch pro Baum mit 3 l/m² je Tag angegeben werden. Somit ist der pflanzenverfügbare Wasserspeicher ohne weitere Wassergaben am Sandstandort nach 24 Tagen, am Schluffstandort nach 80 Tagen und am Tonstandort nach 40 Tagen leer. Ist der pflanzenverfügbare Wasserspeicher zu mehr als 40 % aufgebraucht, wird angenommen, dass Trockenstress entsteht. Wird ab diesem Wert bewässert und der Speicher vollständig aufgefüllt, so muss dem Baum im sandigen Boden nach 14 Tagen etwa 3.400 l Wasser zugeführt werden. Der Baum im Schluffboden benötigt erst nach 48 Tagen eine Wasserzufuhr, dabei jedoch in etwa 11.400 l. Nach 24 Tagen sollte der im tonigen Boden befindliche Baum mit etwa 5.700 l bewässert werden. Dies zeigt, dass die Bäume im Sand- und Tonboden kleinere einmalige Bewässerungsgaben benötigen, jedoch in einem deutlich kürzeren Gießintervall. Würde die Gießwassermenge für den Baum im schluffigen Boden, beim Sandboden angewandt werden, so würde ein Großteil des Wassers ungenutzt versickern. Beim Tonboden hingegen würde diese Menge zu einer Vernässung des Wurzelraums oder Wasserstau an der Oberfläche führen (Benk et al., 2020, S. 59f).

4.5.2. Porensystem

Baver (1959, S. 164) beschreibt den Porenanteil beziehungsweise die Porosität, als den prozentuellen Anteil am gesamten Bodenvolumen, welcher nicht von Feststoffen ausgefüllt ist. Baver macht die Anordnung der Feststoffpartikel für die Anzahl und die Beschaffenheit der Poren eines Bodens verantwortlich. Das Gesamtporenvolumen kann dabei je nach Bodenart sehr unterschiedlich ausfallen. Sandige Böden besitzen in der Regel ein niedrigeres Gesamtporenvolumen als beispielsweise tonige oder organische Böden. Laut Baver (1959, S. 164) ist die Größe der Poren und vor allem deren relative Verteilung für die Bodencharakterisierung bedeutender als das reine Gesamtporenvolumen. Der Porendurchmesser bestimmt, wie viel Wasser beziehungsweise wie viel Luft sich unter bestimmten Voraussetzungen in den Poren befinden.

Scheffer et al. (1984, S. 131f) teilen die Poren nach ihrem Äquivalentdurchmesser ein. Unterschieden wird dabei zwischen weiten und engen Grobporen, zwischen Mittelporen und zwischen Feinporen. In der Tabelle 1 sind die Porendurchmesser, sowie die dazugehörigen Kennwerte zum Matrixpotenzial angegeben. Im Regelfall ist lediglich das in den Mittelporen befindliche Wasser für Pflanzen verfügbar. Während Pflanzen auf das Feinporen-Wasser nicht zugreifen können, sind die Grobporen in terrestrischen Böden zumeist nicht mit Wasser, sondern mit Luft gefüllt. Folglich spielen sie eine wichtige Rolle für den Lufthaushalt eines Bodens. Die Autor*innen heben auch die Relevanz der Porengröße für Wurzeln und Mikroben hervor. Da der Durchmesser von Wurzelhaaren mehr als 10 µm beträgt, können diese nur in Grobporen vordringen. Aufgrund des kleineren Durchmessers sind Bakterien und Pilzmyzele in der Lage auch in Mittelporen zu überleben. Feinporen werden hingegen nicht erschlossen.

Tabelle 1: Charakterisierung der Porengrößenbereiche mit Hilfe des Porendurchmessers in µm und des Matrixpotenzials als Wassersäule in cm und als pF-Wert (siehe Kapitel 4.5.3) (Scheffer et al., 1984, S. 131)

Porengrößenbereiche	Porendurchmesser (µm)	Matrixpotenzial als Wassersäule (cm)	pF-Wert
Grobporen, weite	> 50	1 - 60	0 - 1,8
Grobporen, enge	50 - 10	60 - 300	1,8 - 2,5
Mittelporen	10 - 0,2	300 - 15 000	2,5 - 4,2
Feinporen	< 0,2	> 15 000	> 4,2

Baver (1959, S. 164f) charakterisiert die Bodenarten aufgrund ihrer typischen Porengrößenverteilung. Die hohe Anzahl an Poren mit geringem Durchmesser bei tonigen Böden erhöhen dessen Wasserhaltekapazität, sind aber auch für die niedrigere Wasserdurchlässigkeit verantwortlich. Die größeren Poren bei sandigen Böden führen zu einer höheren Wasserdurchlässigkeit, jedoch auch zu einer verringerten Fähigkeit Wasser zu halten.

Auch Scheffer et al. (1984, S. 132) thematisieren die Porengrößenverteilung. Sie beschreiben diese als volumetrischen Anteil jedes Porengrößenbereichs am gesamten Porenvolumen eines Bodens. Die Autor*innen konstatieren, dass im Regelfall grobkörnigere Böden, wie beispielsweise Sandböden einen höheren Grobporenanteil besitzen als feinkörnigere Böden. Betrachtet man den Feinporenanteil, so verhält es sich genau umgekehrt und der Feinporenanteil sinkt je grobkörniger ein Boden ist. Ersichtlich ist dies in Tabelle 2. Auch der Gehalt an organischen Substanzen eines Bodens hat Auswirkungen auf den Anteil der Porengrößenbereiche. Bei steigendem Humusgehalt in Sandböden, wird auch der Anteil an Mittel- und Feinporen größer. Bei organischen Böden, wie Mooren zeigt sich, dass bei fortschreitender Zersetzung der Anteil an Grobporen abnimmt, während der Feinporenanteil zunimmt.

Tabelle 2: Porenvolumina und volumetrische Anteile von Porengrößenbereichen bezogen auf mineralische und organische Böden (Scheffer et al., 1984, S. 132)

Bodenart	Porenvolumen (%)	Grobporen (%)	Mittelporen (%)	Feinporen (%)
Sandböden	42 ± 7	30 ± 10	7 ± 5	5 ± 3
Schluffböden	45 ± 8	15 ± 10	15 ± 7	15 ± 5
Tonböden	53 ± 8	8 ± 5	10 ± 5	35 ± 10
Anmoor	70	5	40	25
Hochmoor	90	25	50	15

4.5.3. Bodenwasser

Dirksen (1999, S. 10) definiert das Bodenwasser als jenen Anteil, welcher bei Ofentrocknung im Labor bei 105 °C verdunstet. Der Wassergehalt eines Bodens wird mit Hilfe des genannten Trocknungsvorgangs gravimetrisch, also durch Messung der Masse bestimmt. Angegeben wird der Bodenwassergehalt beziehungsweise -anteil in Gewichts-Prozent (Gew.-%) oder in Volumen-Prozent (Vol.-%) (Dirksen, 1999, S. 10).

Hillel (1980, S. 124) definiert den höchsten Bodenwasseranteil als Sättigungswasseranteil, bei dem alle Poren mit Wasser gefüllt sind. Als geringsten Wasseranteil bezeichnet Hillel den lufttrockenen Zustand in der Natur und den ofentrockenen Zustand im Labor.

Gespeist wird das Bodenwasser über Niederschläge durch Infiltration, über das Grundwasser durch kapillaren Aufstieg und zu einem kleinen Teil durch kondensiertes Wasser aus der Atmosphäre. Dabei beinhaltet es Gase und Salze, welche zu unterschiedlichen Maßen im Wasser gelöst sind (Scheffer et al., 1984, S. 151).

Das Bodenwasser unterliegt unterschiedlichen Bindungsarten, die von der Bodenmatrix abhängen, weshalb das Wasser auch nur zu einem Teil frei beweglich ist. Einerseits wird ein Teil des Wassers gegen die Schwerkraft in den Poren als Haftwasser gehalten und andererseits sickert ein Teil in tiefere Schichten, welches als Sickerwasser bezeichnet wird (Scheffer et al., 1984, S. 152). Unterschieden wird weiters zwischen dem Grund- und Stauwasser sowie dem Adsorptions- und Kapillarwasser. Bei ersterem handelt es sich um Sickerwasser, welches sich über einer undurchlässigen Schicht sammelt. Während Grundwasser permanent vorhanden ist, bildet sich Stauwasser nur für einen begrenzten Zeitraum (Scheffer et al., 1984, S. 152). Das Adsorptions- und Kapillarwasser hingegen wird gegen die Schwerkraft im Boden gehalten. Dies geschieht mit Hilfe von Kräften, welche zwischen der Bodenmatrix und den Wassermolekülen sowie den Wassermolekülen untereinander auftreten (Scheffer et al., 1984, S. 152).

Durch die Komplexität der auftretenden Kräfte, wird meist ihre Arbeit beziehungsweise ihre Fähigkeit Arbeit zu verrichten, also das Potenzial zur Charakterisierung herangezogen (Scheffer et al., 1984, S. 154). In Bezug auf das Bodenwasser steht das Potenzial für die Arbeit, die erbracht werden muss, um eine bestimmte Menge Wasser von einem definierten Punkt zu einem anderen zu befördern. Damit können alle Vorgänge des Bodenwassertransports, beispielsweise die Infiltration oder der kapillare Aufstieg beschrieben werden (Scheffer et al., 1984, S. 154).

„Immer bewegt sich das Wasser von Stellen höheren Potentials (= höherer spezifischer Energie) zu solchen niedrigeren Potentials, weil bei diesem Vorgang Energie frei wird.“
(Scheffer et al., 1984, S. 154)

Dies geschieht so lange, bis das Gesamtpotenzial überall gleich ist. Das Gesamtpotenzial setzt sich wiederum aus Teilpotenzialen zusammen (Scheffer et al., 1984, S. 154). Dazu zählt beispielsweise das Gravitationspotenzial, welches jene Arbeit beschreibt, die aufgebracht werden muss, um Wasser gegen die Schwerkraft auf eine bestimmte Höhe zu transportieren. Als weiteres Teilpotenzial beschreibt das Matrixpotenzial alle Kräfte, die von der Bodenmatrix ausgehend auf das Bodenwasser einwirken. Genauer gesagt wird darunter die Arbeit verstanden, die verrichtet werden muss, um der Bodenmatrix Wasser zu entziehen. Dies ist umso schwieriger je weniger Wasser der Boden enthält, da hierbei die festhaltenden Kräfte der Bodenmatrix am stärksten sind. Das Matrixpotenzial wird dabei als negativer Wert angegeben, wobei die Grundwasseroberfläche als Bezugspunkt definiert ist. Dies bedeutet, dass das Matrixpotenzial umso stärker negativ ist, je größer der Abstand zum Grundwasser ist. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass keine Bodenwasserbewegung vonstattengeht. Angegeben wird das Matrixpotenzial meist als negativer hydrostatischer Druck, wobei der Wert auch als Wasserspannung bezeichnet wird und dabei ein positives Vorzeichen besitzt. Bei steigendem Potenzial nimmt somit die Wasserspannung ab (Scheffer et al., 1984, S. 155).

Ein mit Wasser gesättigter Boden weist somit ein Matrixpotenzial beziehungsweise eine Wasserspannung von null auf. Wird dem Boden Wasser entzogen, beginnend bei den größeren Poren, wird das Matrixpotenzial stärker negativ und die Wasserspannung nimmt zu. Dies geschieht so lange, bis nur mehr die kleinsten Poren wassergefüllt sind. Neben dem Wasserentzug aus den Poren, werden auch die Wasserhäutchen, welche die Bodenpartikel umgeben, dünner. Diese beiden Faktoren sind verantwortlich für die Abnahme des Wasseranteils bei stärker negativ werdendem Matrixpotenzial (Austrian Standards, 2020, S. 6).

Als Einheiten für das Matrixpotenzial werden zumeist hPa beziehungsweise cm Wassersäule verwendet. Hierbei entspricht der Druck einer 1 cm langen Wassersäule dem von 1 hPa. Zusätzlich gilt der pF-Wert als Maßeinheit für das Matrixpotenzial (Jost, 2012, S. 6). Dieser *„entspricht dem dekadischen Logarithmus des negativen Matrixpotentials in [hPa].“* (Jost, 2012, S. 6) Die Zusammenhänge zwischen Porengröße und Matrixpotenzial als cm Wassersäule sowie als pF-Wert sind in Tabelle 1 dargestellt.

Gemessen wird das Matrixpotenzial mit Tensiometern. An deren Spitze befindet sich eine poröse Zelle, danach folgt ein mit Wasser gefüllter Raum und daran anschließend ein Manometer. Mit steigender Austrocknung des Bodens wird immer mehr Wasser aus der Keramikzelle gesaugt, weshalb der Manometer in Folge einen stärker negativen Druck registriert (Dirksen, 1999, S. 58f).

Ein Instrument zur Charakterisierung des Bodenwasserhaushalts ist die sogenannte pF-Kurve. Dabei wird die Beziehung zwischen dem Wasseranteil eines Bodens und dem Matrixpotenzial mit Hilfe einer Kurve dargestellt (Dirksen, 1999, S. 2). Die ÖNORM EN ISO 11274 (2020, S. 6) spricht dabei vom Wasserrückhaltevermögen eines Bodens und bezeichnet die pF-Kurve als Wasserretentionskennlinie. Laut Scheffer et al. (1984, S. 159) weisen Sandböden zu Beginn der Entwässerung einen flachen Kurvenverlauf auf, was bedeutet, dass ein Großteil des Wassers nur schwach gebunden ist. Außerdem führen die Autor*innen an, dass ein flacher Verlauf für einen einheitlichen Durchmesser der Poren in diesem Bereich steht.

Da das Wasser im Boden zumeist in Bewegung ist, wird der Wert der Wasserdurchlässigkeit beziehungsweise der hydraulischen Leitfähigkeit herangezogen, um das potenzielle Ausmaß dieser Bewegung zu charakterisieren. Beschrieben wird dies unter anderem durch die Darcy-Gleichung, die jene Wassermenge angibt, die in einer bestimmten Zeit durch eine definierte Fläche strömt (Scheffer et al., 1984, S. 160). Beeinflusst wird die Wasserdurchlässigkeit von der Körnung beziehungsweise dem Gefüge eines Bodens. Vor allem die Porengröße, -anzahl, -art und -durchgängigkeit spielen hierbei eine wichtige Rolle (Scheffer et al., 1984, S. 162). In Tabelle 3 sind häufige gesättigte Durchlässigkeitswerte für unterschiedliche Bodenarten dargestellt.

Tabelle 3: Gesättigte Wasserleitfähigkeit unterschiedlicher Bodenarten (Scheffer et al., 1984, S. 163)

Bodenart	Wasserleitfähigkeit in cm/s	Wasserleitfähigkeit in cm/d
Sandböden	$\approx 4 \cdot 10^{-1}$ bis $\approx 4 \cdot 10^{-3}$	$\approx 3 \cdot 10^4$ bis $\approx 3 \cdot 10^2$
Schluffböden	$\approx 4 \cdot 10^{-1}$ bis $\approx 5 \cdot 10^{-5}$	$\approx 3 \cdot 10^4$ bis ≈ 4
Lehmböden	$\approx 4 \cdot 10^{-1}$ bis $\approx 10^{-5}$	$\approx 3 \cdot 10^4$ bis ≈ 1
Tonböden	$\approx 4 \cdot 10^{-1}$ bis $\approx 10^{-7}$	$\approx 3 \cdot 10^4$ bis $\approx 10^{-2}$

Weiters hat auch der Wasseranteil eines Bodens Einfluss auf die Wasserleitfähigkeit. Bei abnehmendem Wasseranteil nimmt auch die Leitfähigkeit ab, dies liegt vor allem daran, dass die luftgefüllten Poren nur mehr zu einem gewissen Teil Wasser leiten können (Scheffer et al., 1984, S. 163). Aufgrund dessen wird in gesättigte und ungesättigte Wasserleitfähigkeit unterschieden (Scheffer et al., 1984, S. 164).

Wasser ist in Böden nicht nur in flüssiger Form enthalten, sondern auch als Wasserdampf sofern der Boden nicht vollständig wassergesättigt ist. Der Sättigungsgrad in luftgefüllten Poren ist dabei meist höher als 90 %. Lediglich für die oberste Bodenschicht gilt dies aufgrund der Evaporation nicht (Scheffer et al., 1984, S. 169).

Um Aussagen über den Wasserhaushalt eines Bodens treffen zu können, wird die Feldkapazität (FK) sowie der Permanente Welkepunkt (PWP) herangezogen. Beide stehen jeweils für einen Wasseranteil, welcher sich unter bestimmten Rahmenbedingungen fortwährend einstellt. Scheffer et al. (1984, S. 171) beschreiben die Feldkapazität als jenen Wasseranteil, der trotz Schwerkraft im Boden zurückgehalten werden kann. Im Freiland gehen die Autor*innen davon aus, dass nach der Wasserzufuhr, beispielsweise nach einem intensiven Regenereignis der Wasseranteil im Boden im Laufe der Zeit abnimmt. Nach ein bis zwei Tagen ist die Wasseranteilsabnahme so stark reduziert, dass von einem Gleichgewichtszustand gesprochen werden kann. Der Bodenwasseranteil in diesem Zustand wird dabei als Feldkapazität beschrieben. Angegeben wird er in Gewichts- oder Volumenprozent, wobei sich der Wasseranteil auf die bei 105°C getrocknete Bodenmasse bezieht (Scheffer et al., 1984, S. 171). Prinzipiell weisen grobkörnige Böden einen geringeren Wasseranteil bei Feldkapazität auf als feinkörnige. Auch der Anteil an Humus bewirkt eine Erhöhung des Wasseranteils im Zustand der Feldkapazität (Scheffer et al., 1984, S. 172).

Laut Wessolek et al. (2009, S. 6) wurde der Wasseranteil eines Bodens bei einem pF-Wert von 1,8 beziehungsweise einem Matrixpotenzial von -60 hPa als Feldkapazität festgelegt. Die Autor*innen machen darauf aufmerksam, dass diese Vereinheitlichung der FK-Bestimmung mit einer Unter- oder Überschätzung der tatsächlichen FK-Werte im Feld einhergehen kann. Dies gilt somit auch für die aus der FK abgeleiteten Werte, wie zum Beispiel für die nutzbare Feldkapazität oder für die Luftkapazität bei FK, die in Folge noch beschrieben werden. De Jong van Lier (2017, S. 214) gibt an, dass neben dem Matrixpotenzial von -60 hPa, auch -100 sowie -330 hPa herangezogen werden, um die Feldkapazität eines Bodens zu schätzen.

Der Permanente Welkepunkt ist jener Bodenwasseranteil, bei dem die darin wurzelnde Pflanze unwiderruflich welkt, also auch bei anschließender Bewässerung die Turgeszenz nicht mehr zurückkehrt. Bei Sonnenblumen und Kiefern ist der Permanente Welkepunkt bei einem Matrixpotenzial von $1,5 \cdot 10^4$ cm Wassersäule beziehungsweise einem pF-Wert von ungefähr 4,2 erreicht. Da der genannte Wert auch für viele andere Kulturpflanzen gültig ist, wird er standardmäßig verwendet (Scheffer et al., 1984, S. 172).

Wird zwischen der Feldkapazität und dem Permanenten Welkepunkt die Differenz gebildet, so entspricht dies dem Wert der nutzbaren Feldkapazität (nFK). Dieser Wert beschreibt den Bodenwasseranteil der von Pflanzenwurzeln aufgenommen werden kann (Wessolek et al., 2009, S. 6).

Dies impliziert, dass jener Bodenwasseranteil, der über der Feldkapazität liegt (0-1,8 pF), nicht mehr pflanzenverfügbar ist, da dieses Wasser zu schnell aus den Poren drainiert (de Jong van Lier, 2017, S. 214). Studien von de Jong van Lier (2017, S.214) haben gezeigt, dass Pflanzen sehr wohl in der Lage sind, auf dieses Wasser zuzugreifen. 10 bis 50 Prozent des von den untersuchten Mais- und Weidepflanzen verdunsteten Wassers stammte aus dem Bereich zwischen Wassersättigung und Feldkapazität. Laut von de Jong van Lier ist die Aussagekraft der Feldkapazität bei einem gegebenen pF-Wert zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Wassers zu hinterfragen. Bei bodenhydrologischen Untersuchungen von im Gartenbau eingesetzten Substraten wird das Bodenwasser, welches zwischen 20 und 100 hPa gebunden ist, von Schindler et al. (2018, S. 175) als für Pflanzen leicht verfügbares Wasser bezeichnet.

4.5.4. Bodenluft

Laut Hillel (1980, S. 266f) sind jene Poren, die kein Bodenwasser enthalten, zwangsläufig mit Luft gefüllt. Je weniger Wasser im Boden ist, desto mehr Luft strömt in die freiwerdenden Poren nach, beginnend bei den größten Poren, die schnell entwässern. Das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung spielen hierbei also eine bedeutende Rolle.

Scheffer et al. (1984, S. 185) konstatieren, dass der Anteil an Bodenluft im Normalfall zwischen 0 und 40 Vol.-% liegt. Vor allem die Zugabe von organischer Substanz sowie von Sanden kann laut Baver (1959, S. 200) die Luftkapazität bei schweren Böden erhöhen.

Ein wichtiger Kennwert ist der Luftanteil eines Bodens im Zustand der Feldkapazität. Dies liegt vor allem daran, dass im Zustand der Feldkapazität das Porensystem den maximalen Wasseranteil aufweist, welcher sich auch über einen längeren Zeitraum halten kann. Denn der wassergesättigte Zustand eines Bodens, bei dem der Luftanteil bei 0 % liegt, ist nach Beendigung der Wasserzufuhr nur von kurzer Dauer (Scheffer et al., 1984, S. 185). In Tabelle 4 sind mittlere Luftanteile bei Feldkapazität von verschiedenen Bodenarten aufgelistet.

Tabelle 4: Mittlere Luftvolumina bei Feldkapazität verschiedener Bodenarten (Scheffer et al., 1984, S. 185)

Bodenart	Mittlere Luftvolumina bei Feldkapazität in Vol.-%
Sandböden	30 - 40
Schluffböden	10 - 25
Lehmböden	10 - 25
Tonböden	5 – 10 (und weniger)

Während nach Wessolek (2009, S. 6) die Luftkapazität bei FK bei einem Matrixpotenzial von -60 hPa gemessen wird, geben Schindler et al. (2018, S. 175) bei ihren Versuchen von gartenbaulichen Substraten die Luftkapazität bei einem Matrixpotenzial von -20 hPa an.

Hillel (1980, S. 268) gibt zu bedenken, dass die Luftvolumina allein wenig über die Sauerstoffversorgung eines Bodens aussagen. Ein wichtiger Faktor ist die Rate, mit welcher der Gasaustausch vonstattengeht. Ein Boden mit hoher Luftkapazität ist als Pflanzenstandort dennoch eher ungeeignet, sollte durch undurchlässige Schichten im oberen Bereich kein Anschluss an die Atmosphäre vorhanden sein. Neben ausreichender Luftkapazität muss somit auch der Gasaustausch gewährleistet sein.

4.5.5. Hydrologische Bodeneigenschaften und zugehörige Labormethoden

Um Böden, beziehungsweise Substrate, auf ihre physikalischen und hydrologischen Eigenschaften zu untersuchen, werden bestimmte Bodenparameter mit Hilfe von Labormethoden analysiert. In den folgenden Unterkapiteln werden die hydrologisch relevantesten Eigenschaften mit den zugehörigen Labormethoden beschrieben.

4.5.5.1. Trockenrohdichte nach ÖNORM EN ISO 11272 (Austrian Standards, 2017)

Mit Hilfe der Trockenrohdichte lassen sich Aussagen zum Feststoffgehalt sowie zur Porosität eines Bodens treffen (Austrian Standards, 2017, S. 5). Definiert wird die Trockenrohdichte als „*Verhältnis der ofentrockenen Masse der Feststoffe zum Volumen des Bodens*“ (Austrian Standards, 2017, S. 6). Das zur Berechnung herangezogene Volumen beinhaltet somit sowohl die Feststoffe als auch den zugehörigen Porenraum der untersuchten Bodenprobe. Als Einheit wird für die Trockenrohdichte kg/m^3 beziehungsweise g/cm^3 verwendet (Austrian Standards, 2017, S. 6).

Die Bodenproben mit einem bekannten Volumen werden zur Bestimmung der Trockenrohdichte in einem Trockenschrank bei $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ getrocknet, bis diese eine konstante Masse erreicht haben. Im Anschluss wird die ofengetrocknete Probe in einem Exsikkator platziert, wo sie abkühlen kann, ohne Wasser aufzunehmen. Direkt nach der Entnahme aus dem Exsikkator wird die Probe gewogen, um die Trockenmasse zu bestimmen. Folglich lässt sich die Trockenrohdichte berechnen, indem der Quotient aus Trockenmasse und Probenvolumen gebildet wird (Austrian Standards, 2017, S. 7f).

4.5.5.2. Gesamtporenvolumen nach ÖNORM EN ISO 11274 (Austrian Standards, 2020)

Das Gesamtporenvolumen (GPV) beschreibt den gesamten Porenraum eines Bodens, welcher je nach Matrixpotenzial Wasser und/oder Luft enthält (Austrian Standards, 2011, S. 4). Beträgt das Matrixpotenzial null, so ist der Boden wassergesättigt und somit alle Poren mit Wasser gefüllt (Austrian Standards, 2020, S.6).

Um das Gesamtporenvolumen beziehungsweise das maximale Wasserrückhaltevermögen eines Bodens zu bestimmen, werden die Proben mit Leitungswasser vollständig gesättigt. Der Sättigungszustand ist erreicht, wenn an der Probenoberfläche ein Wasserfilm erkennbar ist. Anschließend wird die Probe unverzüglich gewogen (Austrian Standards, 2020, S.10).

In weiterer Folge wird die Massendifferenz zwischen der Probe im wassergesättigten und ofengetrockneten Zustand berechnet. Die somit erhaltene Masse des Wassers im Sättigungszustand wird durch das Probenvolumen dividiert, um den Wert des Gesamtporenvolumens zu erhalten. Der Wert kann auch als volumetrischer Wasseranteil bei einem Matrixpotenzial von 0 hPa definiert werden (Austrian Standards, 2020, S.13). Dies gilt unter der vereinfachten Annahme, dass die Dichte von Wasser 1 g/cm^3 beträgt.

4.5.5.3. Wasserkapazität nach FLL (2010) sowie nach ÖNORM EN 13041 (Austrian Standards, 2011)

Grundsätzlich wird unter dem Begriff Wasserkapazität (WK) der volumetrische Anteil einer Bodenprobe verstanden, der bei einem bestimmten Matrixpotenzial mit Wasser gefüllt ist (Austrian Standards, 2011, S. 5). In anderen Regelwerken wird vereinfacht und statt einem Wert für das Matrixpotenzial eine Entwässerungsdauer im Laborversuch angegeben. Im zweiten Teil der FLL-Richtlinie „Empfehlungen für Baumpflanzungen“ wird die Wasserkapazität (WK 2h) beziehungsweise die maximale Wasserkapazität als jener Wasseranteil definiert, der nach zweistündiger freier Dränierung in der Probe zurückbleibt. Hierfür wird die Probe gesättigt und anschließend mit einem Verdunstungsschutz auf einer Lochplatte platziert (FLL, 2010, S. 56).

Berechnet wird die Wasserkapazität auf gleichem Wege wie das Gesamtporenvolumen. Die Masse des Wassers nach zweistündiger Dränierung wird durch die Massendifferenz zwischen der Probe bei Wasserkapazität und der ofengetrockneten Probe gebildet. In weiterer Folge wird der erhaltene Wert durch das Probenvolumen dividiert und anschließend mit dem Faktor 100 multipliziert, um den prozentualen volumetrischen Wasseranteil bei Wasserkapazität zu erhalten (FLL, 2010, S. 56).

In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Wasserkapazität gemäß der bereits genannten FLL-Richtlinie verwendet, sie entspricht somit dem volumetrischen Wasseranteil einer Probe nach zweistündiger freier Dränierung.

4.5.5.4. Feldkapazität angelehnt an ÖNORM EN ISO 11274 (Austrian Standards, 2020) sowie an Multistep-Outflow-Methode (Durner und Iden, 2011; Germer und Braun, 2019; Nasta et al., 2011)

Im Zuge der Masterarbeit wurde für die Feldkapazität ein pF-Wert von 1,8 festgelegt. Dies entspricht einem Matrixpotenzial von -60 hPa an der Unterkante der Probe und damit dem Druck einer 60 cm langen Wassersäule. Somit sind die weiten Grobporen einer Probe im Zustand der Feldkapazität entwässert.

Für die Bestimmung der Feldkapazität im Labor gibt es unterschiedliche Verfahren. Eine Möglichkeit bildet die Verwendung einer Druckkammer in Verbindung mit einer porösen Keramikplatte (Austrian Standards, 2020, S. 18f). Hierbei werden die gesättigten Bodenproben direkt auf die Keramikplatte innerhalb einer Druckkammer platziert. In der Druckkammer wird der gewünschte Druck erzeugt, im Falle der Feldkapazität 60 hPa beziehungsweise 0,06 bar. Dadurch wird jenes in den Proben befindliche Wasser, das mit einem Druck geringer als 60 hPa gebunden ist, aus der Probe durch die Keramikplatte entfernt. Sobald sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat, also kein Wasser mehr aus den Proben austritt, ist der Zustand der Feldkapazität erreicht. Ablesbar ist der Gleichgewichtszustand an einer Messbürette, welche sich am Auslass der Keramikplatte befindet. Anschließend werden die Proben gewogen (Austrian Standards, 2020, S. 18f). Die Berechnung der Feldkapazität erfolgt analog zum Gesamtporenvolumen sowie zur Wasserkapazität.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Feldkapazität erfolgt durch das Anlegen eines Unterdrucks an eine Bodenprobe (Durner und Iden, 2011; Germer und Braun, 2019; Nasta et al., 2011). Hierfür wird die Probe auf eine poröse Keramikplatte platziert, an der über einen Schlauch ein Unterdruck von 60 hPa angelegt wird. Das in der Probe befindliche Wasser, welches mit einem Druck geringer als 60 hPa gebunden ist, wird somit über die Keramikplatte abgesaugt. Zusätzlich können Tensiometer in die Probe eingesetzt werden, welche zur Überprüfung des Matrixpotenzials dienen. Die beschriebene Vorgehensweise bei dieser Variante ist angelehnt an die Multistep-Outflow-Methode (Durner und Iden, 2011; Germer und Braun, 2019; Nasta et al., 2011).

4.5.5.5. Luftkapazität nach ÖNORM EN 13041 (Austrian Standards, 2011)

Die Luftkapazität (LK) beschreibt jenen volumetrischen Anteil einer Bodenprobe, der bei einem bestimmten Matrixpotenzial mit Luft gefüllt ist (Austrian Standards, 2011, S. 4). Die Luftkapazität beziehungsweise das Luftvolumen einer Probe kann durch die Bildung der Differenz zwischen dem Gesamtporenvolumen und dem volumetrischen Wasseranteil, beispielsweise der Wasserkapazität oder der Feldkapazität einer Probe bestimmt werden. Folglich erhält man die Luftkapazität bei Wasserkapazität beziehungsweise bei Feldkapazität (p_F 1,8) (Austrian Standards, 2011, S. 11).

4.5.5.6. Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach ÖNORM L 1065 (Austrian Standards, 2006) sowie nach ÖNORM EN 12616 (Austrian Standards, 2022)

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit beschreibt die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens im mit Wasser gesättigten Zustand (Scheffer et al., 1984, S. 160). Dieser sogenannte k_f -Wert bildet den „Proportionalitätsfaktor aus dem Durchfluss q und dem hydraulischen Gradienten Δh (Gleichung nach Darcy)“ (Austrian Standards, 2006, S. 3). Der hydraulische Gradient wiederum ist der „Quotient aus hydraulischem Höhenunterschied h und der durchströmten Länge L des Probenkörpers“ (Scheffer et al., 1984, S. 3). Es wird somit die Menge an Wasser gemessen, die in einem bestimmten Zeitintervall die Probe durchströmt (Scheffer et al., 1984, S. 160).

Prinzipiell müssen alle Parameter der Darcy-Gleichung, bis auf den k_f -Wert bekannt sein, um die Wasserdurchlässigkeit einer Probe zu bestimmen. Dabei werden die restlichen Parameter entweder mit Hilfe des Versuchsaufbaus definiert oder direkt gemessen (Scheffer et al., 1984, S. 164). Grundsätzlich kann die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit entweder bei konstanter oder bei fallender Druckhöhe beziehungsweise hydraulischem Höhenunterschied bestimmt werden (Austrian Standards, 2006, S. 4).

Die Bestimmung mit Hilfe eines konstanten hydraulischen Höhenunterschieds nach ÖNORM L 1065 (2006, S. 4) beginnt mit der Platzierung der vollständig von unten mit Wasser gesättigten Probe in einer Messapparatur. Diese besteht aus einer Wanne mit Auslass sowie einer Apparatur zur Aufrechterhaltung einer konstanten Wasserzufuhr. Im Falle einer Wasserzufuhr von oben, wird ein wassergefüllter Rundkolben in eine Kolbenhalterung eingehängt. Über den Auslass der Wanne wird die Masse an Wasser gemessen, welche die Probe in einer bestimmten Zeiteinheit durchfließt. Der Wasserspiegel bleibt per Design konstant, es wird in mehreren Zeitschritten der Durchfluss, das heißt die unten ausströmende Wassermenge gemessen, bis ein konstanter Durchfluss pro Zeiteinheit erreicht ist. Berechnet wird der k_f -Wert nach ÖNORM L 1065 (Austrian Standards, 2006, S. 4) bei konstanter Druckhöhe mit folgender Formel:

$$k_f = \frac{V \cdot L}{F \cdot t \cdot h}$$

V....Volumen an Wasser in Kubikmeter

L....Länge der Probe in Meter

F....Querschnitt der Probe in Quadratmeter

t....Zeit in Tagen

h....Druckhöhe in Meter

Bei der Methode mit fallender Druckhöhe wird die Differenz des ab- oder zunehmenden Wasserspiegelstandes oberhalb der Probe sowie die dafür benötigte Zeiteinheit gemessen. Diese Messungen werden ebenfalls mehrmals wiederholt, bis in mehreren Durchläufen ein konstantes Ergebnis erzielt wird (Austrian Standards, 2006, S. 6). Beispielsweise wird dieses Verfahren in der ÖNORM EN 12616 für Sportböden beschrieben. Dabei wird die Zeit gemessen, in der eine definierte Wasserspiegeldifferenz beobachtet werden kann (Austrian Standards, 2022, S. 6).

4.6. Schwammstadtsubstrat und Bodenhydrologie

Auch wenn das Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume bereits in Anwendung ist, gibt es erst wenige bodenphysikalische und bodenhydrologische Erkenntnisse zum Substrat selbst. So stellt sich beispielsweise die Frage, wie hoch das Retentionsvolumen oder die Wasserspeicherfähigkeit schlussendlich ist. Des Weiteren fehlen standardisierte Richtwerte sowie standardisierte Labormethoden zur Untersuchung und Beurteilung des Schwammstadtsubstrats.

4.6.1. Anforderungen und Richtwerte für das Schwammstadtsubstrat

Zumeist werden für das Feinsubstrat die Anforderungen der FLL-Richtlinie (FLL, 2010, S. 41) für Baumsubstrate herangezogen, um Qualitätsstandards gewährleisten zu können:

- Wasserdurchlässigkeit $\geq 5,0 \cdot 10^{-6}$ m/s beziehungsweise $\geq 0,3$ mm/min
- Wasserkapazität ≥ 25 Vol.-%
- Luftkapazität bei Feldkapazität (pF 1,8) ≥ 15 Vol.-%
- pH-Wert zwischen 5,0 und 8,5
- organische Substanz zwischen 1-4 Masse-%
- Salzgehalt < 150 mg/100 g im Wasserauszug

Des Weiteren wird für das gesamte Schwammstadtsubstrat bezüglich der Tragfähigkeit oftmals folgender Richtwert nach FLL (2010, S. 41) angegeben:

- Verformungsmodul ≥ 45 MN/m²

Beim Schwammstadtsubstrat handelt es sich jedoch nicht um ein herkömmliches Baumsubstrat, sondern um ein Substrat zur Wurzelraumerweiterung. Aus diesem Grund sind diese Richtwerte aus der FLL-Richtlinie kritisch zu hinterfragen und im Realbetrieb kann auf der Basis einer bodenhydrologischen Bewertung davon abgewichen werden.

In der ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) werden Anforderungen an durchwurzelbare Unterbauten angeführt. Dabei wird speziell auf das Schwammstadtprinzip sowie auf überbaubare Baumsubstrate verwiesen. Prinzipiell sollte ein durchwurzelbarer Unterbau laut Norm aus einem Gerüstbaustoff und einem Feinsubstrat bestehen. Außerdem wird auf die Notwendigkeit einer ständigen Durchlüftung hingewiesen, um anaerobe Verhältnisse zu verhindern.

Die Anforderungen an durchwurzelbare Unterbauten werden laut ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25) wie folgt definiert und sind somit ident zu jenen der FLL-Richtlinie für Baumsubstrate (siehe oben):

- Wasserdurchlässigkeit $\geq 5,0 \cdot 10^{-6}$ m/s
- Luftkapazität bei Feldkapazität (pF 1,8) ≥ 15 Vol.-%

Weiters werden Anforderungen speziell für das Feinsubstrat definiert, die von jenen der FLL abweichen (Austrian Standards, 2019a, S. 25f):

- pH-Wert zwischen 5,5 und 8,5
- pflanzenverfügbare Wasserspeicherfähigkeit (pF 1,8 bis pF 4,2) > 10 Vol.-%
- organische Substanz ≤ 6 % der Masse, davon 50 % nicht abbaubar (beispielsweise aktivierte Pflanzenkohle)
- spezifische Leitfähigkeit ≤ 30 mS/m

5. Methodik

5.1. Versuchsdesign

Um die in Kapitel 3 erwähnten Ziele zu erreichen, sowie die Forschungsfragen zu beantworten, wurden im Labor des Instituts für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT) am Bundesamt für Wasserwirtschaft (BAW) in Petzenkirchen bodenphysikalische und bodenhydrologische Versuche durchgeführt. Grundsätzlich wurde ein mehrfaktorielles Versuchsdesign verfolgt, in dem verschiedene Einflussgrößen (Faktoren) stufenweise variiert und miteinander kombiniert untersucht wurden. Als Output wurden Kennwerte zur hydrologischen und bodenphysikalischen Funktionalität von Schwammstadtsubstraten als Zielgrößen definiert, dazu zählen GPV, WK (2h), FK, LK, Trockenrohdichte und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit. Beeinflusst wurden diese Zielgrößen neben den Einflussgrößen auch von Störgrößen, die im Zuge von Versuchsdurchführungen auftreten können (siehe Abbildung 18). Die Ergebnisse der Laborversuche wurden schlussendlich miteinander verglichen und lieferten somit Erkenntnisse zu den Auswirkungen der Variationen der Einflussgrößen auf die hydrologische Funktionalität der Schwammstadtsubstrate. Außerdem zeigten sich während der Durchführung der Versuche mögliche Potenziale für Adaptionen beziehungsweise für Weiterentwicklungen der Labormethodik.

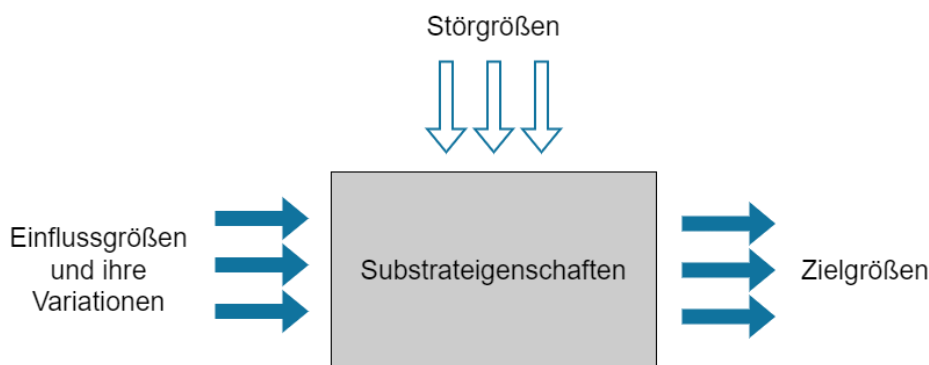


Abbildung 18: Übergeordnetes Versuchsdesign

Die Labormethoden zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats gliederten sich in zwei Versuche, für die jeweils ein eigenes spezifiziertes mehrfaktorielles Versuchsdesign erstellt wurde (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20). Für den Schüttversuch wurden drei (Feinsubstratmischung, Einbaumethodik, Einbau-Wasseranteil; siehe Abbildung 19) und für den Schlammversuch zwei Einflussgrößen (Feinsubstratmischung, Feinsubstratanteil; siehe Abbildung 20) definiert, die wiederum zwei beziehungsweise drei Variationen beinhalteten. Somit ergaben sich 12 Kombinationen für den Schüttversuch und 4 Kombinationen für den Schlammversuch. Die Versuche wurden zweifach (Schüttversuch) beziehungsweise dreifach (Schlammversuch) wiederholt. In Summe ergab dies 36 Versuchsläufe.

Schüttversuch (Feinsubstrat)

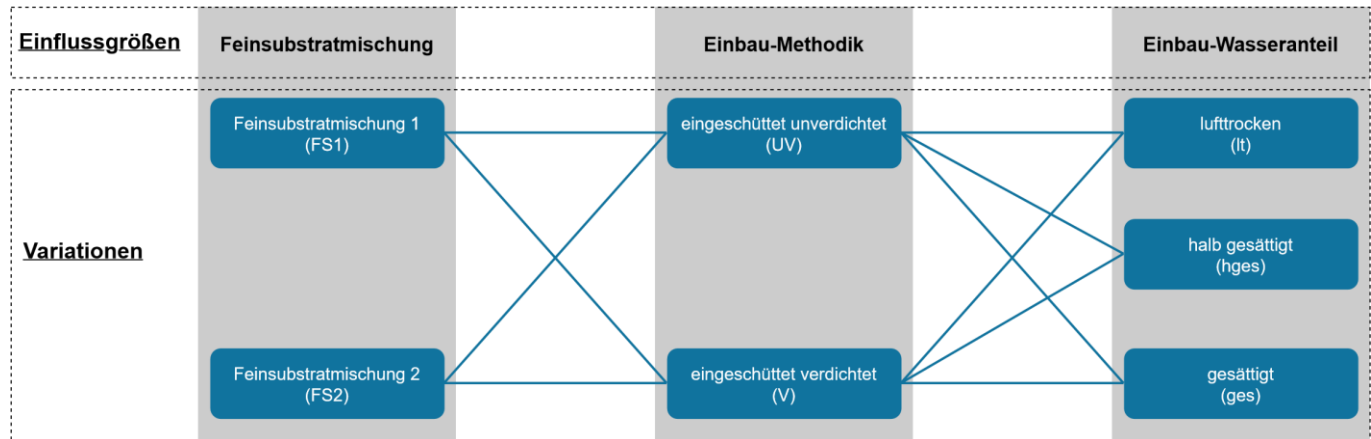


Abbildung 19: Versuchsdesign Schüttversuch

Schlammversuch (Schwammstadtsubstrat)

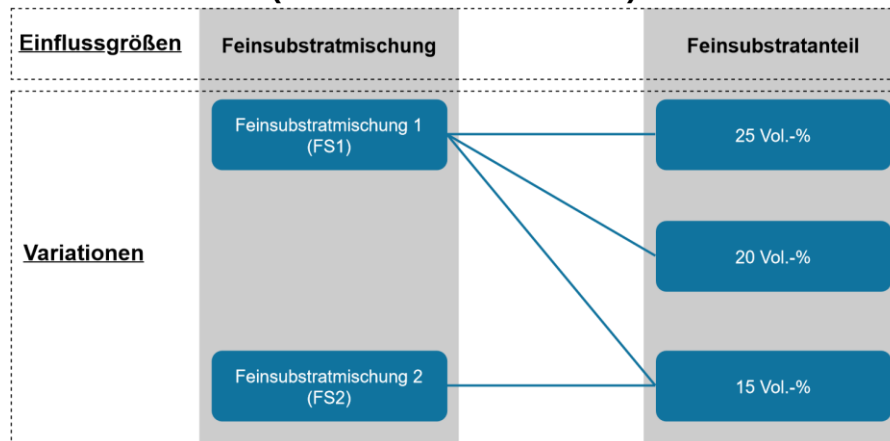


Abbildung 20: Versuchsdesign Schlammversuch

5.2. Laborversuche

Wie in den Forschungszielen und -fragen dargestellt, sollten Laborversuche zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats entwickelt werden, die folgende Kriterien erfüllen sollten: Repräsentativität, Reproduzierbarkeit und Praktikabilität. In Folge werden diese drei Kriterien näher definiert.

Repräsentativität bezüglich der hydrologischen Kennwerte:

Für Meyer (2007, S. 203) ermöglicht Repräsentativität vor allem einen Wissenstransfer, beispielsweise von der Messebene zur Anwendungsebene. In dieser Arbeit wurden zur Bewertung des Kriteriums Repräsentativität zwei Aspekte evaluiert. Einerseits wurden Ergebnisse als repräsentativ angesehen, wenn das Substrat ohne Komplikationen während des Versuchsablaufs untersucht werden konnte, sodass von aussagekräftigen Ergebnissen ohne den Einfluss von Störgrößen ausgegangen werden konnte. Andererseits wurde auf Basis der in Kapitel 4.4.4 erläuterten bautechnischen Praxis des Schwammstadtsubstrats evaluiert, inwiefern bei bestimmten Versuchsvarianten die Lagerungszustände des Substratgemischs die Realität widerspiegeln.

Reproduzierbarkeit bezüglich der Versuchsabläufe:

Laut Matarese (2022, S. 649ff) gibt es keine einheitliche Definition für den Begriff Reproduzierbarkeit. Matarese führt unter anderem eine Definition an, wonach Reproduzierbarkeit erreicht wird, indem Wiederholungen dieselben Ergebnisse liefern, wenn relevante Aspekte unverändert bleiben, wobei weniger relevante geändert werden können.

Die Definition der Reproduzierbarkeit in dieser Arbeit orientierte sich an der eben genannten. Die Laborversuche wurden als reproduzierbar angesehen, wenn diese bei unabhängig durchgeführten Versuchsläufen unter Verwendung derselben Materialien und unter denselben Bedingungen vergleichbare Ergebnisse lieferten.

Praktikabilität bezüglich der Versuchsabläufe:

Da die in dieser Arbeit durchgeführten Laborversuche die Grundlage für Standardlabormethoden zur Untersuchung von Struktursubstraten bilden sollten, wurde ihre Praktikabilität als weiteres Kriterium betrachtet. Als praktikabel wurden Versuche angesehen, die unter Verwendung von einfach verfügbaren Materialien, von maximal zwei geschulten Personen, ohne nennenswerte Komplikationen und mit vertretbarem zeitlichem Aufwand durchgeführt werden konnten. Auch die Möglichkeit zur simultanen Untersuchung mehrerer Proben zur selben Zeit bildete einen Aspekt der Praktikabilität.

5.2.1. Schüttversuch: Feinsubstrat

Der Schüttversuch dient generell der Untersuchung des reinen Feinsubstrats und liefert Aussagen zu einer der beiden Hauptkomponenten des Schwammstadtsubstrats. Namensgebend war der Vorgang des Einschüttens von Feinsubstrats in den Probenzylinder. Mit Hilfe des Schüttversuchs können die Eigenschaften von unterschiedlichen Feinsubstratmischungen analysiert und miteinander verglichen werden. Dadurch können Mischungsreihen erstellt werden und in weiterer Folge ermöglicht dies die Auswahl einer auf die jeweiligen Gegebenheiten vor Ort abgestimmten Feinsubstratmischung. Je nach Projekt muss das Schwammstadtsubstrat zumeist unterschiedliche Zielvorgaben erfüllen, weshalb eine gezielte Substratherstellung von großer Wichtigkeit ist.

Laut Zeiser et al. (2021, S. 2) sind manche Parameter wie zum Beispiel die Wasserspeicherkapazität, die Luftkapazität sowie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit gegenläufig, was für die Feinabstimmung des Substrats eine Herausforderung darstellt. Ein weiteres Ziel des Schüttversuchs ist die Simulation eines ungünstigen Zustands des Schwammstadtsubstrats, indem eine Schichtbildung beziehungsweise eine Akkumulation des reinen Feinsubstrats angenommen wird. Entstehen könnte eine solche Akkumulation durch Verlagerungen des Feinsubstrats in den unteren Bereich des Schwammstadtkörpers oder durch etwaige Fehler während der Bauphase. Somit kommt dem Schüttversuch eine zentrale Bedeutung zu, da eine Anreicherung von Feinsubstrat bezüglich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit sowie der Luftkapazität den anzunehmenden Worst-Case darstellt (Zeiser et al., 2021, S. 3).

Nachfolgend wird der ursprüngliche, am BAW-IKT angewandte Ablauf des Schüttversuchs erläutert, welcher an folgenden ÖNORMEN angelehnt ist: ÖNORM EN ISO 11272 (siehe Kapitel 4.5.5.1), ÖNORM EN ISO 11274 (siehe Kapitel 4.5.5.2), ÖNORM EN 13041 (siehe Kapitel 4.5.5.3) und ÖNORM L 1065 (siehe Kapitel 4.5.5.6). Außerdem diente für die Bestimmung der Wasserkapazität und der Luftkapazität die FLL (2010) als Vorlage (siehe Kapitel 4.5.5.3 und 4.5.5.5). Die Erläuterung erfolgt in hohem Detailgrad, da als Nebenprodukt dieser Arbeit eine Aktualisierung der Standardarbeitsprotokolle im ausführenden Labor entwickelt werden soll.

Tabelle 5: Ablauf Schüttversuch

<u>Vorbereitungen</u>		
	Die Tara-Gewichte aller verwendeten Materialien werden bestimmt.	1
	Das zu untersuchende Feinsubstrat wird unter manuellem Rühren mit Wasser vermengt, bis zum Eintreten der augenscheinlichen Wassersättigung (siehe Abbildung 21).	2
	Zwei runde Faltenfilter (Durchmesser 24 cm) werden übereinandergelegt und mit Wasser vollständig gesättigt.	3
	Die Faltenfilter werden mit Hilfe zweier Gummibänder an einer Öffnung des Probenzylinders (PVC-Rohr; Innendurchmesser 10,4 cm; Höhe 20 cm) befestigt, um ein Herausrutschen des Substrats zu verhindern. Lufteinschlüsse zwischen den beiden Filtern sind zu vermeiden beziehungsweise zu entfernen (siehe Abbildung 22: Anbringen der gesättigten Faltenfilter am Probenzylinder).	4
	Der Probenzylinder wird mit dem Faltenfilter an der Unterseite auf eine Metalllochplatte (Lochdurchmesser 5 mm; Kreisabstand der Lochung 3 mm) gestellt.	5
	Das gesättigte Feinsubstrat wird bis zur Zylinderoberkante in den Probenzylinder geschüttet und mittels Lineals glattgestrichen.	6
	Um den Wasseranteil des Substrats bei Sättigung zu bestimmen, wird der gesamte Probenaufbau erstmalig gewogen.	7

Bestimmen der Wasserkapazität 2h



Abbildung 23: Plastikbecher als Verdunstungsschutz während der Bestimmung der WK 2h

Anschließend wird die Wasserkapazität (2h) bestimmt, indem die Probe für zwei Stunden auf einer Lochplatte platziert wird, wo diese frei dränieren kann. Um den Einfluss der Verdunstung möglichst geringzuhalten, wird ein Kübel beziehungsweise ein Plastiksack über die Probe gestülpt (siehe Abbildung 23).

8

Die Probe wird gewogen, um den Wasseranteil bei WK (2h) zu bestimmen. Falls Hebungen oder Setzungen des Substrats auftreten, werden diese gemessen und das Probenvolumen neu bestimmt. Gemessen wird die Abweichung von der Zylinderoberkante an 10 Stellen mit Hilfe eines Zollstocks. Durch Bildung des Mittelwerts der 10 am selben Zylinder gemessenen Werte wird das Probenvolumen für den Zustand der WK (2h) neu berechnet.

9

Bestimmen der Feldkapazität



Abbildung 24: Platzieren der Proben auf einer gesättigten Keramikplatte

Im nächsten Schritt wird die Feldkapazität bestimmt, indem die Probe in einem Drucktopf bis zur Massekonstanz entwässert wird. Hierfür wird zunächst eine keramische Platte (0,5 bar) in einer Sättigungsvorrichtung mit entionisiertem Wasser gesättigt.

10

Die Probe wird nach Bestimmung der WK (2h) inklusive Faltenfilter auf die gesättigte Keramikplatte gestellt (siehe Abbildung 24). Auf einen guten Kontakt zwischen Faltenfilter und Keramikplatte ist zu achten. Dies ist der Fall, wenn sich die Probe nicht mehr verschieben lässt.

11

Die Keramikplatte wird daraufhin mitsamt Probenzylinder in den Drucktopf gehoben.

12



Abbildung 25: Proben im Drucktopf

Ein Keramikplattenschlauch wird sowohl an den Auslass der keramischen Platte als auch an den Auslass im Inneren des Drucktopfs angeschlossen und ermöglicht damit ein Austreten des Wassers (siehe Abbildung 25).

13

Der Drucktopf wird verschlossen, ein Druck von 60 hPa wird eingestellt und die Einlassventile werden vorsichtig geöffnet.

14

Der entstehende Überdruck im Drucktopf presst jenes Wasser, welches mit einem geringeren Druck als 60 hPa in der Bodenmatrix gebunden ist, aus der Probe über die keramische Platte nach außen. Gesammelt wird das entfernte Wasser in einer Messburette.

15

	Der Zustand der Feldkapazität und somit ein hydrostatisches Gleichgewicht sind erreicht, sobald über einen Zeitraum von zumindest einem Tag kein Wasser mehr austritt. Abgelesen wird dies über den Wasserstand in der Messburette.	16
	Die Einlassventile werden geschlossen, ein Auslassventil vorsichtig geöffnet und der Deckel des Drucktopfs entfernt.	17
	Die Probe wird entnommen und anschließend gewogen, um den Wasseranteil bei FK zu bestimmen. Setzungen beziehungsweise Hebungen werden gemessen.	18
 Abbildung 26: Proben im Wasserbad zum Sättigen	Im nächsten Schritt wird die Probe gesättigt. Hierfür wird der Zylinder inklusive Lochplatte auf eine Unterlage in eine Wanne oder einen Kübel gestellt. Die Wanne oder der Kübel wird langsam und schrittweise mit Wasser befüllt, damit die in der Probe befindliche Luft entweichen kann. Der Wasserstand soll sich am Ende 1 cm unter Substrathöhe befinden (siehe Abbildung 26). Die Probe wird so lange stehen gelassen, bis das Substrat gesättigt ist (erkennbar an einem Wasserfilm an der Substratoberfläche). Durch Probewägungen wird untersucht, ob die Massekonstanz eingetreten ist und die Probe vollständig gesättigt ist.	19
<u>Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit</u>		
 Abbildung 27: Aufbau zur Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit	Der nächste Schritt beinhaltet die Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mit konstanter Druckhöhe. Hierfür werden zuerst die Faltenfilter sowie die Gummibänder entfernt. Dabei kann der Probenzylinder leicht gekippt werden. Herabfallendes sowie an den Faltenfiltern anhaftendes Substrat wird sorgfältig gesammelt und in eine ofenfeste Schale überführt.	20
	Die Probe wird mit der Unterseite auf eine Metalllochplatte (Lochdurchmesser 5 mm; Kreisabstand der Lochung 5-7 mm) sowie ein Gaze-Gewebe (Maschenweite 1 mm) gestellt.	21

	Auf den Probenzylinder wird ein weiterer Zylinder (PVC-Rohr; Innendurchmesser 10,4 cm; Höhe 5,3 cm) gesetzt und der Übergang mit Hilfe einer Gummiabdichtung beziehungsweise mit Klebeband (Breite 5 cm; wasserfest) abgedichtet.	22
	Auf die Substratoberfläche wird ein Gaze-Gewebe (Maschenweite 1 mm) gelegt, um ein Aufwirbeln von Substratfeinteilen zu verhindern.	23
	Dieser Aufbau wird in ein mit Wasser gefülltes Behältnis auf einer erhöhten Unterlage platziert. Bedingt durch den Gesamtaufbau befindet sich der Auslass der Wanne 0,5 cm über der Substratunterkante, was einen konstanten Außenwasserspiegel ermöglicht.	24
	Ein Rundkolben (500 ml) wird verkehrt in eine Kolbenhalterung gehängt, sodass sich die Öffnung des Kolbens mittig über der Substratoberfläche befindet.	25
	Die Höhe des Kolbens beziehungsweise des Probenaufbaus wird so verändert, dass der Abstand zwischen Kolben und Substrat genau 0,5 cm beträgt. Dadurch entspricht die Druckhöhe des Wassers genau der Länge der Probe, was in weiterer Folge die Berechnung der Durchlässigkeit vereinfacht.	26
	Um eine konstante Wasserzufuhr sowie einen konstanten Innenwasserspiegel zu generieren, wird der Rundkolben erneut aus der Vorrichtung entnommen, randvoll mit Wasser befüllt und wieder in die Kolbenhalterung eingehängt. Ein Stück Faltenfilter als Abdichtung des Kolbens vereinfacht das verkehrte Einhängen. Beim Abziehen des Faltenfilters strömt Wasser unter konstantem Überstau durch das Substrat.	27
	Sobald sich augenscheinlich stationäre Fließverhältnisse eingestellt haben, kann mit der Messung begonnen werden.	28

	Zum Start der Messung wird ein Erlenmeyerkolben (300 ml) unter den Auslass der Wanne gestellt und zeitgleich eine Stoppuhr gestartet (siehe Abbildung 27). Je nach Durchlässigkeit wird die Stoppuhr nach einer gewissen Zeit (zumeist zwischen 1 und 5 Minuten) angehalten, sowie der Kolben entfernt und gewogen. Somit lässt sich die Menge an Wasser bestimmen, die in einer bestimmten Zeiteinheit durch die Probe perkoliert. Insgesamt werden 5 störungsfreie Messungen benötigt, von denen ein Mittelwert berechnet wird. Extremwerte sowie Messungen mit einem erkennbaren Trend sind zu verwerfen.	29
Ofentrocknung		
 Abbildung 28: Überführung des Substrats in eine ofenfeste Schale	Nach Beendigung der Wasserdurchlässigkeitsbestimmung, wird das Substrat aus dem Zylinder in eine ofenfeste Schale überführt (siehe Abbildung 28).	30
	Alle verwendeten Utensilien, welche mit dem Substrat in Berührung gekommen sind, werden mit einer Spritzflasche über der ofenfesten Schale abgespült. Dies soll einen möglichen Substratverlust verhindern.	31
	Die ofenfeste Schale wird anschließend bei 105 °C in den Trockenschrank gestellt und das Substrat bis zum Erreichen einer konstanten Masse getrocknet. Überprüft wird dies durch mehrmalige Probewägungen.	32
	Danach wird die Probe zum Abkühlen in den Exsikkator gestellt.	33
	Abschließend wird das Behältnis direkt nach dem Entnehmen aus dem Exsikkator gewogen, um die Trockenmasse der Probe zu bestimmen.	34

5.2.2. Schlämmversuch: Schwammstadtsubstrat

Prinzipiell wird mit dem Schlämmversuch das Ziel verfolgt, das Schwammstadtsubstrat in seiner Gesamtheit zu untersuchen. Somit wird im Zuge des Versuchs der Grobschlag in einen Probenzylinder kompakt eingeschichtet und anschließend das Feinsubstrat in die Hohlräume geschlämmt. Aufgrund der Korngröße des Grobschlags bedarf es eines größeren Untersuchungsvolumens als beim Schüttversuch.

Für die durchgeführten Schlämmversuche wurde ein Grobschlag, bestehend aus dolomitischem Kalkstein mit einer Korngrößenverteilung von 32/63 mm eingesetzt. Vor allem die beschränkten Dimensionen im Labor sowie die Handhabung der Proben verhinderten den Einsatz von Grobschlag mit einer größeren Körnung, wie dieser im Normalfall im realen Einbau verwendet wird (90 bis 150 mm). Eine exakte Replikation des Schwammstadtsubstrats ist somit im Labor nur schwer zu bewerkstelligen. Ziel war es dennoch, eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Einbauzustands zu schaffen und gleichzeitig eine handhabbare und einfach reproduzierbare Labormethodik zu entwickeln.

Folglich wird der ursprüngliche, am BAW-IKT angewandte Ablauf des Schlämmversuchs beschrieben, der in seiner Durchführung an ÖNORM EN ISO 11274 (siehe Kapitel 4.5.5.2), ÖNORM EN 12616 (siehe Kapitel 4.5.5.6) sowie an die FLL (2010) (siehe Kapitel 4.5.5.3 und 4.5.5.5) angelehnt ist.

Tabelle 6: Ablauf Schlämmversuch

<u>Vorbereitungen</u>		
	Der Probenzylinder (PVC-Rohr; Innendurchmesser 23,6 cm; Höhe 21 cm) wird auf eine Kunststoffplatte (Durchmesser 25 cm) mit zentralem Ablauf und seitlichem Auslass in Form eines dünnen Schlauches gesetzt. Am Auslass befindet sich eine Klemme.	1
	Auf die Kunststoffplatte werden eine Metalllochplatte (Lochdurchmesser 5 mm; Kreisabstand der Lochung 3 mm) sowie ein Gaze-Gewebe (Maschenweite 1 mm) mit dem Durchmesser des Zylinders gelegt, um das Ausschwemmen von Feinsubstrat zu minimieren (Abbildung 29). Hierfür befindet sich in der Kunststoffplatte eine Ausnehmung (siehe Abbildung 29).	2
	Um den Übergang zwischen Kunststoffplatte und Zylinder abzudichten, wird Klebeband (Breite 5 cm; wasserfest) eingesetzt.	3
	Der leere Aufbau wird gewogen, um das Tara-Gewicht zu ermitteln.	4
	Zwischen dem Ablauf der Kunststoffplatte und der Metalllochplatte befindet sich ein Zwischenraum, der im gesättigten Zustand vollständig mit Wasser gefüllt ist. Um das Gewicht dieses Wassers zu ermitteln, wird bei geschlossener Klemme Wasser in den Probenzylinder geleert. Die Klemme wird geöffnet und erst wieder geschlossen, wenn sich der Wasserspiegel exakt auf der Höhe der Lochplatte befindet. Anschließend wird der Aufbau auf die Waage gestellt, um das Gewicht des Wassers zu ermitteln.	5

Abbildung 29: Leerer Versuchsaufbau zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats



Abbildung 30: Einbringen des Grobschlags in den Probezylinder

Im nächsten Schritt wird der Grobschlag (dolomitischer Kalkstein; Korngröße 32/63) in den Zylinder eingebaut (siehe Abbildung 30). Um eine Verdichtung zu simulieren, wird dieser so kompakt wie möglich eingeschichtet. Durch erneutes Wiegen wird die Masse des eingesetzten Grobschlags bestimmt.

6



Abbildung 31: Einfüllen des Feinsubstrats

Anschließend wird lufttrockenes Feinsubstrat in den Probenzylinder eingefüllt (siehe Abbildung 31). Um das Feinsubstrat in die Hohlräume des Grobschlags zu schlämmen, wird Wasser nachgefüllt (siehe Abbildung 32). Dies geschieht jeweils abwechselnd. Die Klemme ist dabei stets offen, um ein Abrinnen des Wassers zu ermöglichen. Es wird so lange Feinsubstrat und Wasser eingebracht, bis die Hohlräume des Grobschlags möglichst gefüllt sind. Dies ist der Fall, wenn sich das Feinsubstrat nicht mehr in tiefere Bereiche spülen lässt. Durch eine Differenzwägung des Behälters mit dem Feinsubstratvorrat wird nach dem Einschlammvorgang die Masse des verwendeten Feinsubstrats ermittelt.

7

Bestimmen des Gesamtporenvolumens



Abbildung 32: Einschlämmen des Feinsubstrats

Um den Wasseranteil bei Sättigung (GPV) zu bestimmen, wird der Aufbau auf eine Waage gestellt und Wasser in den Probenzylinder geleert. Dies geschieht so lange bis keine Luftblasen mehr aufsteigen und der Wasserspiegel die Substratoberkante erreicht hat. Hierfür muss die Klemme geschlossen sein.

8

Bestimmen der Wasserkapazität 2h

Zum Bestimmen der WK (2h) wird ein Plastiksack als Verdunstungsschutz auf die Zylinderoberfläche gelegt und anschließend die Klemme geöffnet, damit das Wasser in der Probe frei dränieren kann. Nach zwei Stunden wird die Klemme geschlossen und die Probe gewogen.

9

Bestimmen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit

Um die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit zu messen, wird zuerst ein weiterer Zylinder (PVC-Rohr; Innendurchmesser 23,6 cm; Höhe 5 cm) auf den bereits vorhandenen Probenzylinder gesetzt. Abgedichtet wird der Übergang mit Klebeband (Breite 5 cm; wasserfest).

10

Anschließend wird der Probenzylinder von oben mit Wasser befüllt, bis der Wasserspiegel die Oberkante des zweiten aufgesetzten Zylinders erreicht (25 cm Gesamthöhe).

11

Nun wird ein Zollstock innen am zweiten Zylinder befestigt, sodass die 0 cm-Markierung des Zollstocks sich auf Höhe der Substratoberfläche befindet.

12



Abbildung 33: Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Schwammstadtsubstrats

Die Klemme wird geöffnet und mit Hilfe einer Stoppuhr wird die Zeit gemessen, in der eine Wasserspiegelabnahme von 1 cm (von 3,5 cm auf 2,5 cm über der Substratoberfläche) beobachtet werden kann (siehe Abbildung 33). Die Messungen werden so oft wiederholt, bis 5 aussagekräftige Werte generiert wurden.

13

5.3. Einflussgrößen und deren Variationen

Für den Schüttversuch sowie für den Schlammversuch wurden jeweils Einflussgrößen bestimmt, von denen ausgegangen wurde, dass diese einen Einfluss auf die Eigenschaften der untersuchten Substrate haben. Im Normalfall werden zur bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Charakterisierung ungestörte Bodenproben verwendet. Da dies beim Schwammstadtsubstrat nicht möglich ist, fokussierten sich die Einflussgrößen auf die Substratkomponenten und auf die Art des Substrateinbaus. Eine gezielte Variation dieser Einflussgrößen sollte sowohl repräsentative Messergebnisse liefern als auch der Erprobung der Labormethoden dienlich sein.

5.3.1. Feinsubstratmischungen (Schütt- und Schlammversuch)

Die Einflussgröße „Feinsubstratmischung“ wurde bei beiden Versuchen variiert. Es kamen zwei unterschiedliche Mischungen zum Einsatz, Feinsubstratmischung 1 (**FS1**) und Feinsubstratmischung 2 (**FS2**). Der Fokus lag dabei auf ersterer, da diese Mischung so oder so ähnlich in Österreich eingesetzt wird (siehe Abbildung 34). Genauer gesagt, wurde diese angelehnt an eine Feinsubstratmischungen, die in der Lysimeteranlage Jägerhausgasse in Wien eingesetzt wurde.

FS1:

8 Teile Rundkornsand (gewaschen, 0/4 mm) - rund 86 % des Gesamtgewichts

1 Teil Murschwemmmaterial (fluviatiles Feinsediment von der Mur) - rund 8 % des Gesamtgewichts

1 Teil Kompost (Güteklasse A+) - rund 86 % am Gesamtgewicht) - rund 4 % des Gesamtgewichts

1 Teil Pflanzenkohle (aus unbehandeltem Waldhackgut der EnergieWerk Ilg GmbH) - rund 2 % des Gesamtgewichts



Abbildung 34: Feinsubstratmischung FS1

Im Gegensatz zu in Österreich angewandten Feinsubstratmischungen, welche häufig zu einem Großteil aus mineralischen Komponenten bestehen (Murer, 2022, S. 8), setzt die Stadt Stockholm, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, mittlerweile nur noch Kompostkohle (siehe Abbildung 35) als Feinsubstrat ein (Rose, 2020, S. 6). Um auch hierfür Daten zu generieren beziehungsweise um die beiden Varianten miteinander vergleichen zu können, wurde diese Mischung (**FS2**) ebenfalls untersucht. Auch für die Erprobung der Labormethoden waren zwei sehr unterschiedliche Feinsubstratmischungen von Vorteil.

FS2:

1 Teil Kompost (Güteklasse A+) – rund 72 % des Gesamtgewichts

1 Teil Pflanzenkohle (aus unbehandeltem Waldhackgut der EnergieWerk Ilg GmbH) – rund 28 % des Gesamtgewichts



Abbildung 35: Separate Bestandteile der Feinsubstratmischung FS2 (oben Kompost, unten Pflanzenkohle)

5.3.2. Einbau-Methodik (Schüttversuch)

Die zweite Einflussgröße war die „Einbau-Methodik“, welche die Art und Weise beschreibt, wie das Feinsubstrat in den Probenzylinder gelangt und wie dieses bis zur Durchführung der ersten Untersuchung behandelt wird. Diese Einflussgröße bezog sich ausschließlich auf den Schüttversuch. Variiert wurde die „Einbau-Methodik“ auf zwei verschiedene Arten. Bei ersterer wurde das Feinsubstrat in den Probenzylinder eingeschüttet und unverdichtet untersucht (**UV**). Die zweite Variation beschrieb das Einschütten des Substrats und eine anschließende moderate Verdichtung (**V**). Diese Verdichtung erfolgte durch definiertes, kontrolliertes Fallenlassen des Zylinders aus einer geringen Höhe (5 cm).

Ziel war es herauszufinden, welche Auswirkungen die „Einbau-Methodik“, beziehungsweise die moderate Verdichtung auf die Eigenschaften der Feinsubstrate hat. Auch sollten etwaige spätere Setzungen des untersuchten Substrats durch vorherige Verdichtung minimiert beziehungsweise vermieden werden. Weiters sollte die Verdichtung dazu beitragen, möglichst nahe an den Realitätszustand des Feinsubstrats heranzukommen. Dies galt unter der Annahme, dass sich das Feinsubstrat in Realität durch verschiedene Einflüsse zumindest ein wenig verdichtet, beziehungsweise setzt. Gründe hierfür könnten beispielsweise Vibrationen durch den Straßenverkehr oder Setzungen durch wiederholte Wasserzufuhr sein.

5.3.3. Einbau-Wasseranteil (Schüttversuch)

Unter „Einbau-Wasseranteil“ wurde in diesem Zusammenhang jener Wasseranteil verstanden, den das Feinsubstrat während des Einfüllens in den Probenzylinder aufweist. Die Variation des Einbau-Wasseranteils erfolgte, indem die Versuche mit drei unterschiedlichen Wassermengen durchgeführt wurden. Die Untersuchung dieser Einflussgröße fand ausschließlich beim Schüttversuch Anwendung.

Das Feinsubstrat wurde lufttrocken (**lt**), gesättigt (**ges**) oder mit halber Sättigung (**hges**) in den Probenzylinder eingebracht und die Auswirkungen auf die Werte der Zielgrößen evaluiert. Als lufttrocken wurde Feinsubstrat bezeichnet, wenn dieses über einen längeren Zeitraum bei Raumtemperatur trocknen konnte, sodass davon ausgegangen werden kann, dass sich ein konstantes Gewicht eingestellt hat. Der Einbau mit Sättigungs-Wasseranteil erfolgte, indem eine bestimmte Menge lufttrockenes Substrat vor dem Einbau mit einer definierten, zur Sättigung führenden Menge Wasser vermischt wurde. Die für die Sättigung benötigte Menge an Wasser wurde durch Vorversuche bestimmt. Exakt die Hälfte des Sättigungs-Wasseranteils wurde verwendet, um Feinsubstrat mit „halber Sättigung“ herzustellen.

Diese Einflussgröße sollte zeigen, welchen Einfluss der „Einbau-Wasseranteil“ auf die Eigenschaften der untersuchten Feinsubstratmischungen hat und ob die Abstufungen zu unterschiedlichen Ergebnissen für die Zielgrößen führen.

5.3.4. Feinsubstratanteil (Schlammversuch)

Die Einflussgröße „Feinsubstratanteil“ wurde nur für den Schlammversuch definiert. Diese Einflussgröße beschreibt den volumetrischen Anteil des Feinsubstrats am gesamten Probenvolumen und wird in Volumenprozent angegeben. Die in Österreich verwendeten Feinsubstrate werden im Zuge von Schwammstadtsubstrat-Baustellen zumeist mit 25 Volumenprozent eingebaut (Arbeitskreis Schwammstadt, 2022), wohingegen die aktuell in Schweden eingesetzte Kompostkohle-Mischung, repräsentiert durch die FS2-Feinsubstratmischung, mit 15 Volumenprozent eingebracht wird (Rose, 2020, S. 6).

Es wurde eine Abstufung des Anteils vorgenommen und der Einfluss der Variationen auf die Messergebnisse für die Zielgrößen evaluiert. Dies sollte zeigen, wie und ob sich die bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Eigenschaften des Schwammstadtsubstrats bei verschiedenen Feinsubstratanteilen ändern.

5.3.5. Zusätzliche Varianten (Schüttversuch)

Neben den definierten Varianten aus dem mehrfaktoriellen Versuchsdesign wurden für den Schüttversuch noch zwei weitere untersucht. Diese ließen sich nicht ins Versuchsdesign eingliedern, da sie nur bei bestimmten Einflussgrößen und Variationen durchgeführt wurden. Die unten angeführte Variante der „Übersättigung“ wurde beispielsweise nur unverdichtet untersucht, während die „Durchschlamm-Methode“ nur an der FS1-Mischung erprobt wurde. Von den Zusatzvarianten wurden keine Erkenntnisse zur Labormethodik selbst erwartet, jedoch sollten dadurch konkrete Ergebnisse gewonnen werden, die folgend beschrieben werden.

Für beide Feinsubstratmischungen wurde eine vierte Abstufung des „Einbau-Wasseranteils“ vorgenommen, dabei wurde eine „Übersättigung“ (**üges**) des Feinsubstrats simuliert. Hierfür wurde das Substrat mit einer deutlich größeren Menge an Wasser als für den Sättigungszustand benötigt wurde, vermengt und unverdichtet analysiert. Vor allem sollte hierbei untersucht werden, ob es aufgrund des hohen Wasseranteils zu Entmischungsvorgängen durch Aufschwimmen der organischen Bestandteile kommt und inwiefern sich dies in den Ergebnissen niederschlägt.

Eine weitere zusätzliche Variation der „Einbau-Methodik“ wurde ausschließlich für FS1 angewandt, es handelte sich um die Simulation des Einschlämmvorgangs (**SCHLÄMM**). Dafür wurde das Feinsubstrat durch eine vorgelagerte Schicht Grobschlag geschlämmt, unterhalb eines Trenngitters mit Probenzylindern aufgefangen und wie unter Kapitel 5.2.1 erläutert hinsichtlich der resultierenden Zielgrößen analysiert. Durch die gewählte Vorgehensweise war es möglich, den Prozess des Einschlämmens im Labormaßstab nachzubilden, aber gleichzeitig eine reine Feinsubstratprobe zu gewinnen, ähnlich einer ungestörten Bodenprobenziehung. Die Fallhöhe, die das Feinsubstrat nach dem Durchschlämmen bis zum Probenzylinder überwinden musste, stellt allerdings eine Abweichung zum Einschlämmvorgang im Realbetrieb dar. Ziel war es, das reine Feinsubstrat möglichst nahe am realen Lagerungszustand zu untersuchen. Durchgeführt wurde der Versuch unter der Annahme, dass in der Realität beim Einbau des Feinsubstrats ein Teil davon lufttrocken in die Hohlräume fällt und anschließend der Rest mit Wasserdruck eingeschlämmt wird.

Da die Variation der Übersättigung an beiden Feinsubstratmischungen in Doppelbestimmung durchgeführt wurde und die Simulation des Einschlämmvorgangs bei FS1 mit Hilfe von drei Wiederholungen bestimmt wurde, steigt die Gesamtsumme an Versuchsläufen auf 43 an.

5.4. Zielgrößen

Als Zielgrößen der Untersuchungen wurden einige hydrologische Kennwerte definiert, die eine umfassende Einschätzung der hydrologischen Funktionalität von Substraten im urbanen Raum, insbesondere von Schwammstadts substraten, ermöglichen. Dazu zählen die Trockenrohdichte in g/cm³, das Gesamtporenvolumen in Vol.-%, die Wasserkapazität (2h) in Vol.-%, die Feldkapazität in Vol.-%, die Luftkapazität in Vol.-% sowie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min. Beschrieben wurden die genannten Zielgrößen in den Unterkapiteln des Kapitels 4.5.5. In den nachfolgenden Formeln sind Normwerke zur Bestimmung und Berechnung der jeweiligen bodenhydrologischen Kennwerte kurz zusammengefasst:

Formel 1: Berechnung der Trockenrohdichte

Trockenrohdichte nach ÖNORM EN ISO 11272 (Austrian Standards, 2017):

$$\rho = \frac{m}{V}$$

m Masse des bei 105 °C getrockneten Substrats

V Probenvolumen

Formel 2: Berechnung des Gesamtporenvolumens, der Wasserkapazität (2h) und der Feldkapazität

Gesamtporenvolumen, Wasserkapazität (2h) und Feldkapazität angelehnt an ÖNORM EN ISO 11274 (Austrian Standards, 2020), ÖNORM EN 13041 (Austrian Standards, 2011) und FLL (2010):

$$\theta_{GPV/WK\ 2h/FK} = \frac{m_{GPV/WK\ 2h/FK} - m_t}{\rho_W * V} * 100$$

θ_{GPV} volumetrischer Wasseranteil des Substrats im wassergesättigten Zustand

$\theta_{WK\ 2h}$ volumetrischer Wasseranteil des Substrats im Zustand der Wasserkapazität (2h) (nach zweistündiger freier Dränierung)

θ_{FK} volumetrischer Wasseranteil des Substrats im Zustand der Feldkapazität (Matrixpotenzial von -60 hPa)

m_{GPV} Masse des Substrats im wassergesättigten Zustand

$m_{WK\ 2h}$ Masse des Substrats im Zustand Wasserkapazität (2h)

m_{FK} Masse des Substrats im Zustand der Feldkapazität

m_t Masse des bei 105 °C getrockneten Substrats

ρ_W Dichte des Wassers (=1 g/cm³)

V Probenvolumen

Formel 3: Berechnung der Luftkapazität

Luftkapazität nach ÖNORM EN 13041 (Austrian Standards, 2011):

$$LK_{WK\ 2h/FK} = \theta_{GPV} - \theta_{WK\ 2h/FK}$$

$LK_{WK\ 2h}$ Luftkapazität des Substrats im Zustand der Wasserkapazität (2h) (nach zweistündiger freier Dränierung)

LK_{FK} Luftkapazität des Substrats im Zustand der Feldkapazität (Matrixpotenzial von -60 hPa)

θ_{GPV} volumetrischer Wasseranteil des Substrats im wassergesättigten Zustand

$\theta_{WK\ 2h}$ volumetrischer Wasseranteil des Substrats im Zustand der Wasserkapazität (2h) (nach zweistündiger freier Dränierung)

θ_{FK} volumetrischer Wasseranteil des Substrats im Zustand der Feldkapazität (Matrixpotenzial von -60 hPa)

Formel 4: Berechnung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mit konstanter Druckhöhe

Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit mit konstanter Druckhöhe (Schüttversuch) angelehnt an ÖNORM L 1065 (Austrian Standards, 2006):

$$k_f = \frac{V * L}{F * t * h}$$

k_f	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in cm/min
V	Volumen an Wasser in g (bei einer angenommenen Dichte des Wassers von 1 g/cm ³)
L	Länge der Probe in cm
F	Querschnitt der Probe in cm ²
t	Zeit in min
h	Druckhöhe in cm

Durch den Probenaufbau zur Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit beschrieben in Kapitel 5.2.1 entspricht die Druckhöhe h der Länge der Probe L. Das Volumen V des perkolierenden Wassers wird nach exakt einer Minute gemessen, womit die Zeit t dem Wert 1 entspricht. Wird die somit vereinfachte Formel mit 10 multipliziert, ergibt sich die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min.

$$k_f = \frac{V}{F} * 10$$

k_f	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min
V	Volumen an Wasser in g (bei einer angenommenen Dichte des Wassers von 1 g/cm ³)
F	Querschnitt der Probe in cm ²

Formel 5: Berechnung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mit fallender Druckhöhe

Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit mit fallender Druckhöhe (Schlammversuch) angelehnt an ÖNORM L 1065 (Austrian Standards, 2006):

$$k_f = \frac{V * L}{F * t * h}$$

k_f	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in cm/min
V	Volumen an Wasser in cm ³ (bei einer angenommenen Dichte des Wassers von 1 g/cm ³)
L	Länge der Probe in cm
F	Querschnitt der Probe in cm ²
t	Zeit in min
h	mittlere Druckhöhe in cm (= 33 cm)

Im Zuge der Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mit fallender Druckhöhe beim Schlammversuch wird ein Überstau innerhalb des Probenzylinders erzeugt. Nach dem Öffnen der Klemme und der damit verbundenen Entwässerung der Probe wird die Zeit gemessen, in welcher der Überstau von 3,5 cm auf 2,5 cm über der Substratoberfläche abfällt. Zur Berechnung wird somit eine mittlere Druckhöhe h von 33 cm herangezogen. Das Volumen an perkolierendem Wasser pro Zeiteinheit errechnet sich aus dem Querschnitt der Probe F multipliziert mit der Wasserspiegelabnahme von 1 cm. Folgend ist die vereinfachte Formel angeführt:

$$k_f = \frac{L}{t * h} * 10$$

k_f	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min
L	Länge der Probe in cm
t	Zeit in min
h	mittlere Druckhöhe in cm (= 33 cm)

6. Ergebnisse

6.1. Zwischenergebnisse und Adaptierungen

Im Laufe der schrittweisen Abwicklung der Versuche wurden regelmäßig Zwischenergebnisse bestimmt, die für den weiteren Ablauf relevant waren. Im Sinne der Nachvollziehbarkeit werden diese in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben. Außerdem wurden aufgrund solcher Zwischenergebnisse und den Erkenntnissen daraus Adaptierungen am Versuchsablauf vorgenommen, um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu verbessern und sicherzustellen.

6.1.1. Feinsubstrat: Schüttversuch

6.1.1.1. Einbau-Wasseranteil

In Vorversuchen wurde der augenscheinliche Sättigungs-Wasseranteil der Feinsubstratmischungen bestimmt. Dieser Wert wurde fortan verwendet, um die verschiedenen Einbau-Wasseranteile kontrolliert herzustellen und eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu erzielen. Dabei wurde stets lufttrockenes Feinsubstrat mit der in Tabelle 7 angegebenen Menge Wasser vermischt. Außerdem wurde der volumetrische Wasseranteil der lufttrockenen Feinsubstrate durch Ofentrocknung bestimmt. Dieser betrug für FS1 rund 1 Vol.-% und für FS2 rund 5,5 Vol.-%.

Tabelle 7: Zur Probenherstellung verwendete Einbau-Wasseranteile der untersuchten Feinsubstratmischungen

	FS1	FS2
	Substrat:Wasser in l	Substrat:Wasser in l
Gesättigt (ges)	2,5:1	1,7:1
Halbe Sättigung (hges)	5:1	3,3:1
Übersättigt (üges)	1,7:1	1:1

Im Zuge der durchgeführten Versuche zur Einflussgröße Einbau-Wasseranteil wurde festgestellt, dass nach Bestimmung der FK das Substrat seinen stabilsten Zustand einnimmt, da durch den Einsatz der Druckstufe von 60 hPa die größten beobachteten Setzungen auftreten. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass das untersuchte Feinsubstrat in diesem Zustand womöglich dem Realitätszustand am nächsten kommt. Die Versuche zeigten auch, dass sich die Werte für GPV und WK 2h, vor und nach Durchführung der Feldkapazitätsuntersuchung unterschieden. Aus diesem Grund wird der Ablauf des Schüttversuchs dahingehend geändert. Das GPV und die WK 2h werden erst nach der FK bestimmt. Dieser Umstand muss beim Vergleich der Ergebnisse des Schüttversuchs bedacht werden. Während das GPV für alle Proben auch nach der FK gemessen wurde, fehlen die Werte der WK 2h für die Kombinationen FS1_UV_l, ges, hges, üges und FS1_UV_l, ges, hges, üges, da sie ausschließlich vor der FK bestimmt wurden.

6.1.1.2. Einbau-Methodik: Moderate Verdichtung

Im Zuge mehrerer Vorversuche zur moderaten Verdichtung wurde eine Methodik entwickelt, welche sich eignet, um eine Verdichtung des Feinsubstrats zu erzeugen, ohne die Probe durch

Entmischungsvorgänge zu zerstören. Die Verdichtung sollte moderat erfolgen, da das unverdichtete Vorliegen des Feinsubstrats im realen Einbau eine Notwendigkeit für die optimale Funktionsweise des Schwammstadtsubstrats darstellt. Es wird somit bei ordnungsgemäßem Einbau im realen Setting nicht davon ausgegangen, dass sich das Feinsubstrat stark verdichtet. Ziel war es, eine reproduzierbare, praktikable und ohne größeren Zeit- und Materialaufwand durchführbare Verdichtungsmethodik zu schaffen.

Hierfür wurde das Substrat in den Probenzylinder eingeschüttet, an dem im Vorhinein zwei gesättigte Faltenfilter angebracht wurden. Anschließend wurde der gefüllte Probenzylinder auf einer Metalllochplatte (Lochdurchmesser 5 mm; Kreisabstand der Lochung 5-7 mm) mit erhöhter Außenkante positioniert (siehe Abbildung 36). Als erste Variante wurde das Anbringen auf verschiedenen horizontalen Rüttelvorrichtungen probiert, es trat jedoch eine schnelle Entmischung in den Substraten auf. Bessere Ergebnisse wurden durch das kontrollierte Fallenlassen der Proben erzielt. Zur Bestimmung einer anwendbaren Methodik wurden verschiedene Fallhöhen und Anzahlen der Fallvorgänge erprobt. Es sollte die mindeste Intensität bestimmt werden, ab der keine merkbaren Setzungen mehr auftraten. Erreicht wurde dies durch das 5-malige Fallenlassen des Probenzylinders aus 5 cm Höhe.



Abbildung 36: Aufbau zur Durchführung der moderaten Verdichtung

6.1.1.3. Einbau-Methodik: „Durchschlämmen“

Durch einige Vorversuche wurde ein Aufbau entwickelt, der es erlaubt, Feinsubstrat durch eine Schicht Grobschlag (Korngröße 32/63 mm) zu schlämmen und es anschließend mit Hilfe der Probenzylinder aufzufangen. Ausschlaggebend hierbei war vor allem die Aufbauhöhe der Grobschlagschicht. Wurde diese zu niedrig gewählt (10-14 cm), fiel ein Großteil des lufttrockenen Feinsubstrats durch den Grobschlag in die Probenzylinder. War sie zu hoch (20 cm und mehr), reichte der Druck des Gartenschlauchs nicht mehr aus, um ausreichend Feinsubstrat in die Probenzylinder „durchzuschlämmen“. Das Feinsubstrat blieb in den Hohlräumen des Grobschlags zurück und verursachte einen Rückstau, weshalb nur Wasser und kein Feinsubstrat in die Probenzylinder gelangte. Eine Aufbauhöhe des Grobschlags von 12 bis 16 cm erwies sich als zielführend. Zunächst wurde der Aufbau für den „Durchschlämmvorgang“ hergestellt (siehe Abbildung 37). Dieser bestand aus einem Kübel mit darauf befindlichem Gitter (Maschenweite 1,5 mal 12 cm). Auf das Gitter wurde zentral ein Zylinder (PVC-Rohr; Innendurchmesser 23,6 cm; Höhe 21 cm) platziert, in welchem der

Grobschlag ausgelegt werden konnte. Im Kübel direkt unter der Grobschlagschicht wurden drei leere Probenzylinder platziert, welche zuvor mit Faltenfiltern präpariert wurden. In Folge wurde eine definierte Menge (1,6 l) lufttrockenes Feinsubstrat auf die Grobschlagschicht ausgebracht.



Abbildung 37: Versuchsaufbau zur Durchführung des „Durchschlämmens“

Ein übergestülpter Plastiksack diente als Spritzschutz. Beim Aufbringen des Feinsubstrats fiel bereits ein geringer Teil durch die Grobschlagschicht in die Probenzylinder. Anschließend wurde das Feinsubstrat mit Hilfe eines Gartenschlauchs mit Brauseaufsatz durch die Grobschlagschicht in die Probenzylinder gespült. Es wurde abwechselnd so lange Feinsubstrat ausgebracht und eingeschlämmt, bis die Probenzylinder nahezu zur Gänze mit Substrat gefüllt waren. Zwischenzeitlich musste zugewartet werden bis überschüssiges Wasser in den Probenzylindern durch die Faltenfilter gesickert war, um ein Überschwappen von Substratbestandteilen zu vermeiden. Die Entstehung von präferentiellen Fließwegen führte dazu, dass ein Zylinder schneller gefüllt war als die anderen, weshalb dieser frühzeitig entnommen wurde. Mit den auf diese Weise hergestellten Proben wurden in weiterer Folge die Analysen hinsichtlich der Zielgrößen durchgeführt.

6.1.2. Schwammstadtsubstrat: Schlammversuch

Für die Durchführung der Schlammversuche wurde der methodische Ablauf abgeändert beziehungsweise erweitert. Die Änderungen zum in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Ablauf werden folgend beschrieben. Die dazugehörigen Abbildungen sind am Ende des Unterkapitels zusammengefasst.

6.1.2.1. *Veränderungen im Versuchsablauf und bezüglich der verwendeten Materialien*

Um möglichst repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurde das Probenvolumen erhöht und ein Zylinder mit einer Höhe von 35 cm und einem Durchmesser von 23,6 cm gewählt (siehe Abbildung 38). Eingbracht wurde das Schwammstadtsubstrat bis zu einer Höhe von 30 cm, was einer Schicht des Schwammstadtsubstrats im realen Einbau entspricht. Die restlichen 5 cm des Probenzylinders dienten zur einfacheren Durchführung der Durchlässigkeitsbestimmung.

Um die Wahrscheinlichkeit eines Wasseraustritts zu minimieren, wurde zwischen der Kunststoffplatte und dem Probenzylinder, zusätzlich zur Abdichtung mit Klebeband, eine Gummiabdichtung mit Schelle verwendet (siehe Abbildung 38). Weiters wurde festgestellt, dass beim Ablassen von Wasser aus dem Versuchsaufbau stets eine bestimmte Menge Wasser auf der Kunststoffplatte zurückblieb. Durch mehrere Wiederholungen wurde diese Menge für jede Kunststoffplatte bestimmt, um sie anschließend bei der Berechnung der WK 2h zu berücksichtigen.

Nach dem Einbau des Grobschlags wurde außerdem das Porenvolumen des reinen Grobschlags bestimmt. Es wurde Wasser bis zur 30 cm Markierung eingefüllt und durch eine Differenzwägung zum Tara-Gewicht ohne Wasserinhalt das Volumen berechnet.

Um einen möglichst realistischen Zustand des Schwammstadtsubstrats abzubilden, wurde eine definierte Menge an Feinsubstrat in den Probenzylinder eingebracht, anstatt wie beim ursprünglichen Schlammversuch die maximal mögliche Menge. In Vorversuchen lag dieser maximale Feinsubstratanteil bei rund 30 Vol.-% für die Mischung FS1. Für die Berechnung der einzubringenden Feinsubstratanteile (25, 20, 15 Vol.-%) wurde eine Feinsubstratdichte von $1,6 \text{ g/cm}^3$ für FS1 und $0,48 \text{ g/cm}^3$ für FS2 festgelegt. Diese Werte entsprachen jeweils dem gerundeten Mittelwert der Trockenrohdichten von lufttrocken (unverdichtet) und gesättigt (unverdichtet) eingebautem Feinsubstrat bei den durchgeführten Schüttversuchen nach der FK-Bestimmung.

Der gesamte Versuchsaufbau wurde nach dem Einbau des Substrats auf Wägezellen platziert (siehe Abbildung 39), die in regelmäßigen Abständen die Messwerte an einen Datenlogger (DataTaker DT85) übertrugen. Das Messintervall betrug zu Beginn 1 Minute und im weiteren Versuchsablauf 15 Minuten. Das GPV sowie die WK 2h wurden auf der Wägezelle bestimmt.

Auch der Sättigungsvorgang wurde abgeändert, indem die Proben von unten über den Auslass an der Kunststoffplatte mit Hilfe einer Mariotteschen Flasche gesättigt wurden (siehe Abbildung 40). Durch den Sättigungsvorgang von unten sollten Luft einschüsse vermieden werden.

Der chronologische Ablauf zur Bestimmung der einzelnen Parameter wurde ebenfalls evaluiert und abgeändert. Begonnen wurde mit der Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (siehe Abbildung 41). Durch das mehrmalige Durchströmen der Probe im Zuge der Messung kann danach von einem stabilen und realitätsnahen Lagerungszustand des Feinsubstrats ausgegangen werden, weshalb dieser Parameter bei allen Schlammversuchen zuerst bestimmt wurde. Danach erfolgte die Bestimmung des GPV. In Vorversuchen wurde außerdem untersucht, wie groß die Unterschiede der WK 2h vor und nach Bestimmung der FK sind. Da die Differenz beider Werte unter 0,2 Vol.-% lag, wurde die WK 2h bei allen Schlammversuchen aufgrund der einfacheren Handhabung vor Bestimmung der FK durchgeführt.

6.1.2.2. Bestimmen der Feldkapazität

Ein weiteres Ziel für die Weiterentwicklung des Schlammversuchs war die Bestimmung der FK des Schwammstadtsubstrats. Wegen des größeren Probenvolumens war eine Untersuchung im Drucktopf nicht möglich, weshalb eine eigene Methodik entwickelt wurde, die die Multi-Step-Outflow-Methode (siehe Kapitel 4.5.5.4) zum Vorbild hatte. Mit Hilfe einer keramischen Platte sollte Wasser mit einem Unterdruck von 60 hPa aus dem Substrat gesaugt werden. Dafür bedurfte es einer Änderung des Versuchsaufbaus, der einen Tausch der Kunststoffplatte durch eine Keramikplatte voraussetzte. Für diesen Tausch musste der gesamte Versuchsaufbau gewendet werden. Zuerst wurde ein „Deckel“ aus Styrodur, welcher dem Innendurchmesser des Probenzylinders entsprach, auf der Substratoberfläche platziert (siehe Abbildung 42). Dieser Deckel ermöglichte das Wenden des gesamten Versuchsaufbaus und sorgte dafür, dass das Substrat nicht verrutscht. In Folge konnten die Kunststoffplatte, die Lochplatte und das Gaze-Gewebe entfernt werden (siehe Abbildung 43). An diesen Teilen befindliches Feinsubstrat wurde gesammelt und anschließend wieder der Probe zugeführt.

Um die Keramikplatte vor Beschädigungen durch den Grobschlag zu bewahren und einen ganzflächigen Kontakt mit dem Feinsubstrat herzustellen (siehe Abbildung 44), wurde eine Schicht feiner Sand (0,1-0,3 mm) zwischen Keramikplatte und Schwammstadtsubstrat eingebaut (siehe Abbildung 46). Dafür wurde ein Zylinder (PVC-Rohr) mit einer Höhe von 5 cm und demselben Innendurchmesser wie der des Probenzylinders auf den Probenzylinder aufgesetzt (siehe Abbildung 45) und mit Hilfe von Klebeband, Gummiabdichtung und Schelle befestigt. Direkt auf das Schwammstadtsubstrat wurde der feine Sand im feuchten Zustand bis zur Oberkante des zusätzlichen Zylinders eingebracht und durch Druck verdichtet (siehe Abbildung 47). Anschließend konnte die gesättigte Keramikplatte aufgesetzt werden (siehe Abbildung 48). In diesem Zustand wurde der geänderte Versuchsaufbau erneut gewendet und auf die Wägezellen gestellt (siehe Abbildung 49). In weiterer Folge konnte an den Schlauch der Keramikplatte ein Unterdruck von 60 hPa angelegt werden. Somit wurde das Wasser aus dem Substrat durch die Sandschicht und die Keramikplatte abgesaugt. Abgefangen wurde dieses Wasser mit Hilfe eines zwischengeschalteten Auffangbehältnisses. Als Verdunstungsschutz diente ein übergestülpter Plastiksack (siehe Abbildung 50).

Nach Beendigung der jeweiligen Versuche wurden die verwendete Menge Sand und die Keramikplatte gewogen, um beide bei der Berechnung der FK zu berücksichtigen. Die Tara-Gewichte der restlichen Materialien wurden bereits im Vorfeld des Versuchs bestimmt.

In einem Vorversuch wurde außerdem die maximale gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des leeren Versuchsaufbaus bestimmt. Diese lag im Mittel bei 43,6 mm/min. Versuche mit reinem Grobschlag zeigten ähnliche Werte, wodurch geschlussfolgert werden kann, dass bei der Messung des reinen Grobschlags der Versuchsaufbau der limitierende Faktor ist und mittels dieser Versuche die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Grobschlags nicht bestimmt werden kann.



Abbildung 38: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats



Abbildung 39: Versuchsaufbau auf Wägezelle



Abbildung 40: Sättigen der Probe



Abbildung 41: Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit



Abbildung 42: Platzieren des Deckels



Abbildung 43: Entfernen des Gaze-Gewebes



Abbildung 44: Freigelegte Unterseite des Schwammstadtsubstrats



Abbildung 45: Aufsetzen des Rings



Abbildung 46: Einbau des Sands



Abbildung 47: Verdichten des Sands



Abbildung 48: Aufsetzen der Keramikplatte



Abbildung 49: Aufbau zur Bestimmung der FK auf einer Wägezelle



Abbildung 50: Versuchsaufbau mit angelegtem Unterdruck



Abbildung 51: Verwendete Tensiometer

6.1.2.3. Überprüfung des Matrixpotenzials

Zur Überprüfung des Matrixpotenzials während der FK-Bestimmung wurden Tensiometer (T5, METER Group AG) eingesetzt. Je Probe kamen zwei Stück mit einer Schaftlänge von 5 cm zum Einsatz (siehe Abbildung 51). Eingebracht wurden die Tensiometer vertikal ausgehend von der Substratoberfläche. Bei dieser Art von Installation muss bei der Datenauswertung 1 hPa je cm Schaftlänge zum Messwert addiert werden. Dies liegt am zusätzlichen Druck der Wassersäule im Inneren des Tensiometerschafts (METER Group AG München, 2018, S. 17). Konkret bedeutet dies, dass bei einem Messwert von -30 hPa und einer vertikalen Verwendung eines Tensiometers mit 5 cm Schaftlänge der korrigierte Messwert bei -25 hPa liegt. Auch die Substrathöhe spielte eine Rolle bei der Messung des Matrixpotenzials. Der angelegte Unterdruck von 60 hPa wird an der Substratunterkante erreicht, je cm Substrataufbau sollte sich die Wasserspannung um 1 hPa aufgrund der Wassersäule innerhalb des Substrats und des damit zusammenhängenden Gravitationspotenzials erhöhen. Bei einer Substrathöhe von 30 cm und der Verwendung von 5 cm langen Tensiometer müsste der korrigierte Messwert somit bei -85 hPa liegen. Die in Tabelle 8 dargestellten Messwerte der Tensiometer zeigen die bereits korrigierten Matrixpotenziale aller Schlammversuch-Proben. Dabei wiesen die Proben für FS1 mit 25 Vol.-% Feinsubstratanteil die zu erwartenden Werte auf, während bei sinkendem Feinsubstratanteil die gemessenen Wasserspannungen abnahmen. Die Gründe hierfür sind vermutlich ein nicht oder nur schlecht zusammenhängendes Feinsubstrat, weshalb der angelegte Unterdruck nur zu einem gewissen Grad bis zu den mit Tensiometer ausgestatteten Bereichen vordrang. Für die eingeschlammte FS2-Mischung wurde der angelegte Unterdruck von den Tensiometern gar nicht registriert.

Tabelle 8: Matrixpotenziale der Schlammversuch-Proben im Zustand der FK

Feinsubstratmischung	Feinsubstratanteil in Vol.-%	Probe	Matrixpotenzial in hPa
FS1	25	1	-82
			-83
		2	-86
			-85
		3	-81
			-82
	20	1	-71
			-76
		2	-78
			-82
		3	-76
			-81
	15	1	-62
			-66
		2	-50
			-49
		3	-67
			-72
FS2	15	1	-19
			-24
		2	-30
			-34
		3	-18
			-18

6.2. Hydrologische Kenngrößen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Schütt- und Schlammversuche dargestellt. Die Beschreibung der einzelnen Versuche mit Abbildungen und Erkenntnissen befindet sich in Anhang B.

6.2.1. Feinsubstrat: Schüttversuch

Die Ergebnisse der durchgeführten Schüttversuche sind in Tabelle 9 und Tabelle 10 angeführt. Es handelt sich jeweils um den gemittelten Wert der einzelnen Versuchsläufe. Die Werte zu den einzelnen Versuchsläufen finden sich in Anhang A. Bei Variante FS1_SCHLÄMM wurden drei Wiederholungen durchgeführt, weshalb eine Standardabweichung gerechnet werden konnte und in Tabelle 10 angeführt ist. Die restlichen Versuche des Schüttversuchs wurden in Doppelbestimmung durchgeführt.

Tabelle 9: Ergebnisse Schüttversuche (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)

Laborversuch	Schüttversuche											
Feinsubstratmischung	FS1						FS2					
Einbau-Methodik	UV			V			UV			V		
Einbau-Wasseranteil	lt	hges	ges	lt	hges	ges	lt	hges	ges	lt	hges	ges
Trockenrohdichte nach FK in g/cm ³	1,53	1,58	1,68	1,70	1,47	1,69	0,47	0,42	0,49	0,47	0,41	0,39
GPV nach FK in Vol.-%	33	30	33	31	33	31	67	65	60	67	69	60
WK 2h nach FK in Vol.-%	/	/	/	28	31	29	/	/	/	62	66	57
LK im Zustand der WK 2h in Vol.-%	/	/	/	3	3	2	/	/	/	5	4	4
FK in Vol.-%	17	20	25	20	19	23	45	42	51	47	40	43
LK im Zustand der FK in Vol.-%	15	10	8	11	14	8	22	23	9	20	30	18
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min	1,2	0,2	0,2	0,6	0,4	0,2	3,0	1,1	0,1	4,4	4,8	0,9

UV: unverdichtet; V: verdichtet; lt: lufttrocken; hges: halb gesättigt; ges: gesättigt

Tabelle 10: Ergebnisse der zusätzlichen Schüttversuche (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen beziehungsweise bei FS1_SCHLÄMM 3 Wiederholungen mit Standardabweichung)

Laborversuch	Zusatz Schüttversuch		
Feinsubstratmischung	FS1		FS2
Einbau-Methodik	SCHLÄMM	UV	UV
Einbau-Wasseranteil	/	üges	üges
Trockenrohdichte nach FK in g/cm ³	1,53±0,05	1,63	0,42
GPV nach FK in Vol.-%	34±1,2	30	66
WK 2h nach FK in Vol.-%	31±0,3	/	/
LK im Zustand der WK 2h in Vol.-%	3±0,9	/	/
FK in Vol.-%	17±0,6	18	41
LK im Zustand der FK in Vol.-%	17±0,6	12	25
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min	0,9±0,2	0,3	2,1

SCHLÄMM: durchgeschlämmt; UV: unverdichtet; üges: übersättigt

6.2.1.1. Feinsubstratmischung 1 (FS1)

Die Ergebnisse zeigen, dass bei unverdichtetem Einbau der FS1-Mischung, das lufttrocken und das gesättigt eingebrachte Feinsubstrat jeweils die Minimal- und Maximalwerte für alle untersuchten Parameter bei gleichem Gesamtporenvolumen bilden. Konkret bedeutet dies, dass FS1_UV_It eine geringere Trockenrohddichte und eine geringere Feldkapazität besitzt bei einer höheren Luftkapazität im Zustand der FK sowie einer höheren gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Vergleich mit FS1_UV_ges (siehe Abbildung 52). Es konnte somit ein Einfluss des Einbau-Wasseranteils auf die hydrologischen Eigenschaften des FS1-Feinsubstrats festgestellt werden. Die Untersuchung der FS1-Mischung mit halbem Sättigungswasseranteil erwies sich aufgrund von instabilen Substratverhältnissen und dadurch entstandenen Rissbildungen im Probenkörper als problematisch (siehe Anhang B FS1_UV_hges). Die Repräsentativität für jene Werte ist aufgrund dessen geringer.

Eine weitere Erkenntnis lieferte der Zusatzversuch mit unverdichtet und übersättigt eingebauter FS1-Mischung (FS1_UV_üges). Durch den hohen Wasseranteil kam es beim Einbau zu einer Entmischung der Substratbestandteile, indem ein Teil der organischen Komponenten an der Substratoberfläche aufschwamm (siehe Anhang B FS1_UV_üges). Da mit diesen Vorgängen auch bei realen Einschlammvorgängen zu rechnen ist (siehe Abbildung 11), wurde untersucht, inwiefern Kompostkohleschichten Auswirkungen auf die hydrologischen Eigenschaften, vor allem auf die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit haben. An den Ergebnissen ist abzulesen, dass die beschriebenen Entmischungsvorgänge bei den durchgeführten Versuchen keine Reduktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit zur Folge hatten. Die übersättigt eingebauten Proben weisen demnach eine höhere Leitfähigkeit als die gesättigt eingebauten Proben auf (siehe Abbildung 52).

Auch im Zuge der „durchgeschlämmten“ Variante (FS1_SCHLÄMM) kam es während der Versuchsdurchführung zum mehrmaligen Aufschwimmen der organischen Bestandteile, sichtbar an der Schichtenbildung im Probenkörper (siehe Anhang B FS1_SCHLÄMM). Auf die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit hatte dies ebenfalls keine mindernden Auswirkungen, wie der Vergleich der Werte von FS1_SCHLÄMM mit den gesättigt eingebauten FS1-Varianten zeigt (siehe Tabelle 9 und Tabelle 10). Es konnten keine wasserstauenden Wirkungen der durch Entmischungsvorgänge entstehenden Kompostkohleschichten nachgewiesen werden.

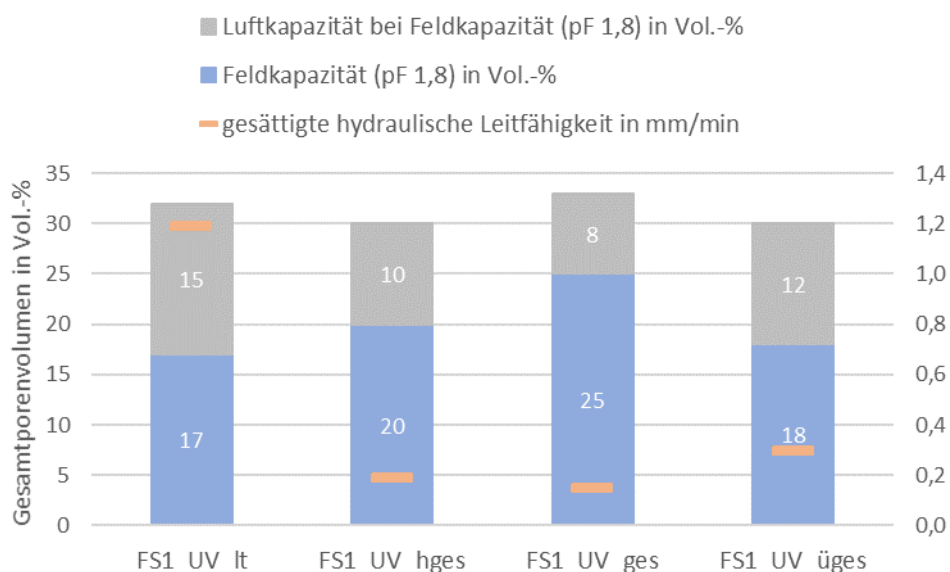


Abbildung 52: Vergleiche unterschiedlicher Einbau-Wasseranteile der FS1-Mischung im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)

Im Hinblick auf die moderate Verdichtung der FS1-Mischung sind Unterschiede zwischen den verschiedenen Einbau-Wasseranteilen feststellbar. Die größte Auswirkung hat die Verdichtungsmethodik auf das lufttrocken eingebaute Feinsubstrat, dabei traten die zu erwartenden Ergebnisse ein. Durch die Verdichtung erhöhten sich die Trockenrohdichte und die Feldkapazität, während die Luftkapazität, das Gesamtporenvolumen sowie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit abnahmen (siehe Abbildung 53). Bei Verdichtung der Proben mit halbem Wassersättigungsgehalt traten durch instabile Substratverhältnisse wieder Spalten und Risse auf (siehe Anhang B FS1_V_hges). Aus diesem Grund sind die Ergebnisse für FS1_V_hges nicht repräsentativ für die untersuchten Einflussgrößen. Dies erklärt auch die unerwartete Zunahme der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit sowie die Abnahme der Trockenrohdichte von FS1_V_hges nach der moderaten Verdichtung im Vergleich mit FS1_UV_hges.

Die Unterschiede der unverdichtet und verdichtet eingebauten gesättigten FS1-Mischung sind dagegen gering. Die Ergebnisse zeigen ähnliche Werte für die untersuchten Parameter (siehe Abbildung 53). Dies spricht für stabile Substratverhältnisse im Falle eines gesättigten Einbaus, auch ohne zusätzliche Verdichtung.

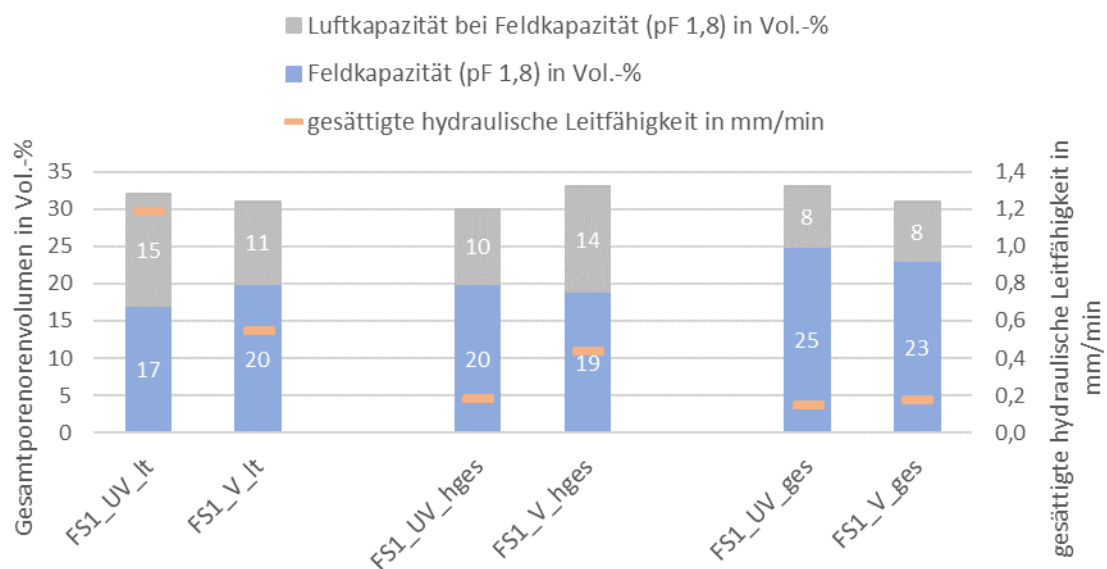


Abbildung 53: Vergleich unverdichteter und moderat verdichteter Einbau der FS1-Mischung im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)

Die Zusatzvariante des „Durchschlämmens“ wurde durchgeführt, um den Einschlämmvorgang zu simulieren und schlussendlich dem realen Lagerungszustand des Feinsubstrats möglichst nahe zu kommen. Im Anbetracht der Ergebnisse dieser Variante ist zu erkennen, dass die Werte sehr ähnlich zu jenen von FS1_UV_it sind. Unterschiede gibt es vor allem bei der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, die bei der „durchgeschlämmten“ Variante etwas geringer als bei FS1_UV_it ist (siehe Abbildung 54).

Unter der Annahme, dass die „Durchschlamm-Methodik“ den Einschlammvorgang nachbilden kann und somit den tatsächlichen Lagerungszustand des Feinsubstrats in einem Schwammstadtkörper simuliert, liefert die unverdichtet und lufttrocken eingebaute Variante repräsentative Ergebnisse für eine realitätsnahe Lagerungszustand des Feinsubstrats mit geringerem Versuchsaufwand als bei FS1_SCHLÄMM.

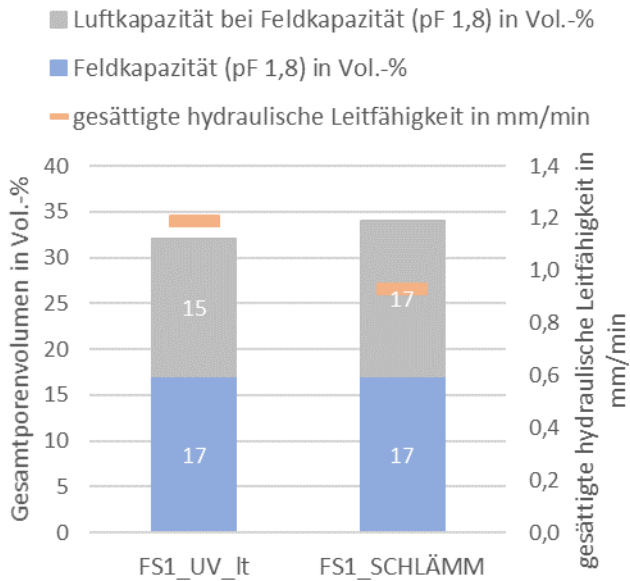


Abbildung 54: Vergleich der durchgeschlämmten Variante mit lufttrocken und unverdichtet eingebauten Proben des FS1-Substrats im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen bei FS1_UV_It und 3 Wiederholungen bei FS1_SCHLÄMM)

6.2.1.2. Feinsubstratmischung 2 (FS2)

Bei der Untersuchung der reinen FS2-Mischung traten einige Schwierigkeiten auf (siehe Anhang B FS2_UV_It bis FS2_V_ges). Vor allem die stetige Abnahme der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und die deutliche Auswaschung von feinen Partikeln bei den lufttrocken und halb gesättigt eingebauten Varianten lassen auf Umlagerungsvorgänge innerhalb des Substrats während der Versuchsdurchführung schließen. Aus diesem Grund konnten keine konstanten Messungen durchgeführt werden. Die Repräsentativität der Werte für FS2_UV_It und FS2_UV_hges ist somit als gering einzustufen. Wurde die Kompostkohle hingegen gesättigt oder übersättigt eingebaut, lässt sich keine (bei FS2_UV_ges) beziehungsweise nur eine geringe (bei FS2_UV_üges) Auswaschung sowie eine konstante gesättigte hydraulische Leitfähigkeit feststellen. Daher können die Werte der Varianten FS2_UV_ges und FS2_UV_üges als repräsentativ für die FS2-Mischung angesehen werden. Dabei liefert die gesättigt eingebaute FS2-Mischung die Minimal- beziehungsweise Maximalwerte für die untersuchten Parameter. FS2_UV_ges zeigt die geringste Leitfähigkeit, das geringste Gesamtporenvolumen, die geringste Luftkapazität bei Feldkapazität, die höchste Trockenrohdichte sowie die höchste Feldkapazität (siehe Abbildung 55). Die übersättigt eingebaute Variante zeigte nach dem Probenabbau mehr große Lufteinschlüsse als die gesättigt eingebauten Proben (siehe Anhang B FS2_UV_üges). Dafür verantwortlich dürfte der hohe Einbau-Wasseranteil sein, der ein Aufschwimmen der Bestandteile und somit eine weniger dichte Lagerung zur Folge hatte. Ablesbar ist dies an der niedrigeren Trockenrohdichte und an der höheren gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von FS2_UV_üges (siehe Abbildung 55).

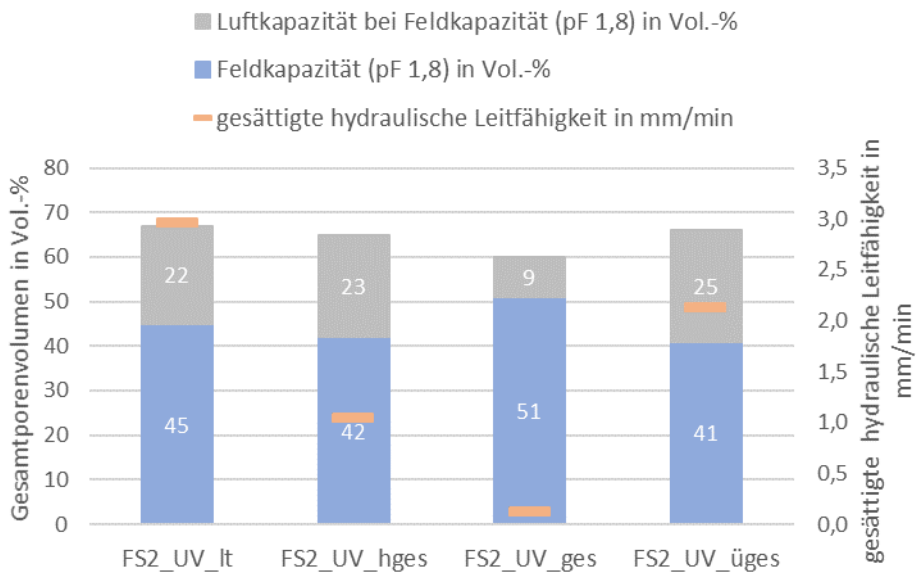


Abbildung 55: Vergleich unterschiedlicher Einbau-Wasseranteile der FS2-Mischung im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)

Bei moderater Verdichtung des FS2-Substrats traten bei allen Einbau-Wasseranteilen Probleme während des Versuchs auf. Aus diesem Grund sind die Werte der verdichteten Kompostkohle nicht repräsentativ. Verantwortlich dafür ist vor allem die Bildung von Spalten zwischen dem Probenkörper und der Zylinderinnenwand (siehe Anhang B FS2_V_It bis FS2_V_ges). Dies erklärt die höhere gesättigte hydraulische Leitfähigkeit bei allen Verdichtungsvarianten im Vergleich zu den unverdichteten Proben (siehe Abbildung 56). Zusätzlich kam es zu starken Auswaschungen von feinen Kohlepartikeln sowie zu stetig abnehmenden hydraulischen Leitfähigkeiten bei FS2_V_hges und FS2_V_It.

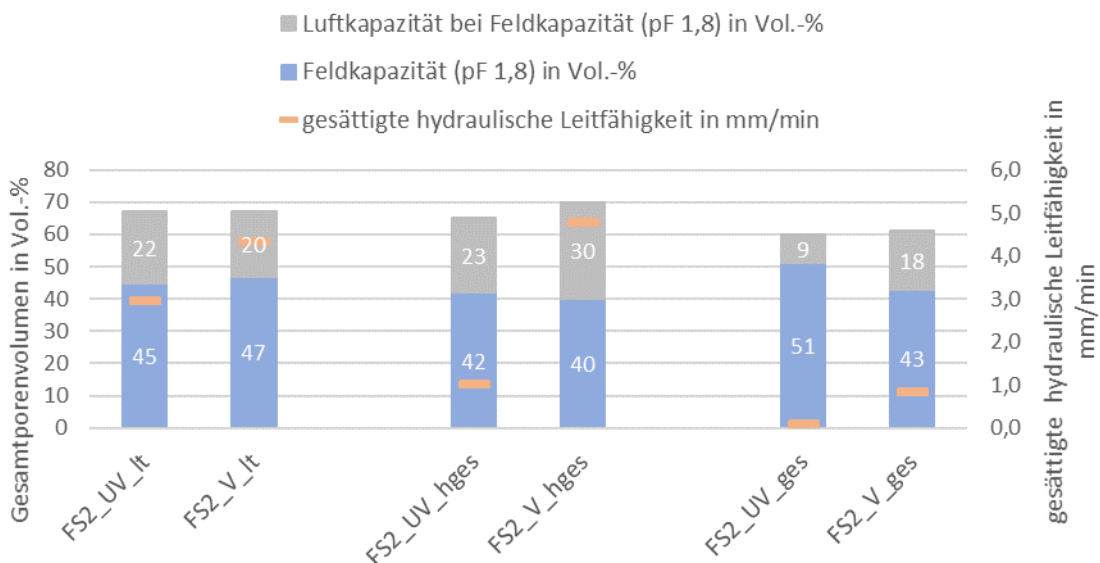


Abbildung 56: Vergleich zwischen unverdichtet und verdichtet eingebauten FS2-Proben im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)

6.2.1.3. Vergleich FS1 und FS2

In Abbildung 57 werden die beiden Feinsubstratmischungen miteinander verglichen. Dabei werden jeweils die beiden repräsentativsten Varianten mit Minimal- und Maximalwerten herangezogen. Unterschiede sind vor allem im Gesamtporenvolumen und in der Feldkapazität ersichtlich. Diese Parameter sind bei der FS2-Mischung annähernd doppelt so hoch wie bei FS1. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der gesättigt eingebauten Varianten ist bei beiden Mischungen ähnlich, während FS2_UV_üges den höchsten Wert besitzt.

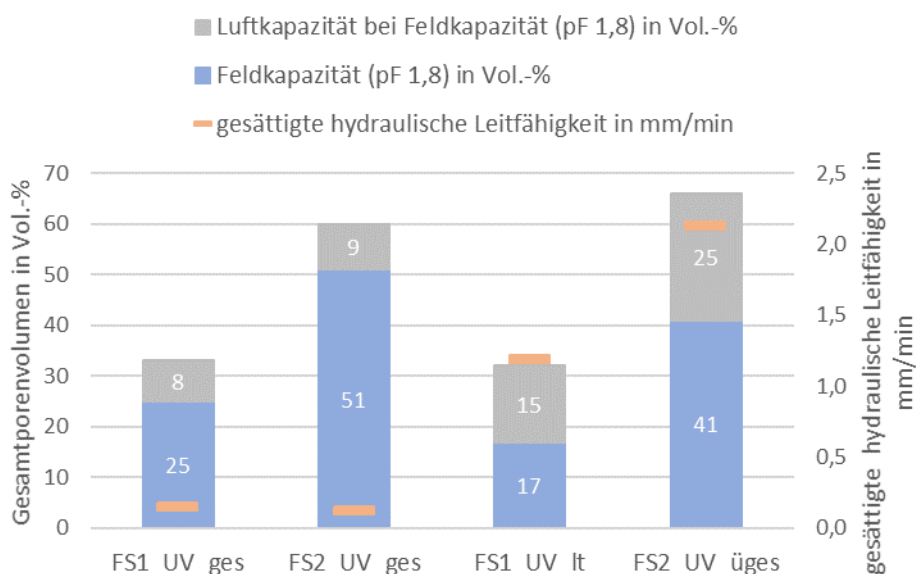


Abbildung 57: Vergleiche der repräsentativsten Varianten beider Feinsubstratmischungen im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)

6.2.2. Schwammstadtsubstrat: Schlämmversuch

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Schlämmversuche. Angegeben ist der gemittelte Wert von 3 Wiederholungen der jeweiligen Variationen der Einflussgrößen inklusive der Standardabweichung. Die Ergebnisse der einzelnen Proben finden sich in Anhang A.

Tabelle 11: Ergebnisse Schlämmversuche (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Standardabweichung)

Laborversuch	Schlämmversuche			
Feinsubstratmischung	FS1			FS2
Feinsubstratanteil	25 Vol.-%	20 Vol.-%	15 Vol.-%	15 Vol.-%
Porenvolumen Grobschlag in Vol.-%	43±0,9	43±0,3	42±1,3	/
Trockenrohdichte Grobschlag in g/cm³	1,58±0,00	1,58±0,00	1,58±0,00	1,58±0,00
Trockenrohdichte gesamtes Substrat in g/cm³	1,98±0,00	1,90±0,00	1,82±0,00	1,64±0,00
GPV in Vol.-%	22±1,1	28±0,6	31±0,8	38±0,6
WK 2h in Vol.-%	10±0,3	8±0,2	7±0,5	12±1,0
LK im Zustand der WK 2h in Vol.-%	12±1,0	20±0,7	25±1,0	26±1,6
FK in Vol.-%	6±0,2	5±0,1	4±0,4	9±0,5
LK im Zustand der FK in Vol.-%	16±1,0	22±0,8	27±1,1	29±0,5
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min	18,6±4,6	24,6±1,7	34,0±9,0	12,1±2,3

6.2.2.1. Abstufung des Anteils der Feinsubstratmischung 1 (FS1)

Die Variationen des Feinsubstratanteils bei FS1 von 25, 20 und 15 Vol.-% zeigen einen annähernd linearen Zusammenhang mit den untersuchten Parametern. Das Gesamtporenvolumen, die Luftkapazität bei FK und WK 2h sowie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nehmen bei abnehmenden Feinsubstratanteil zu, während die WK 2h sowie die FK geringer werden (siehe Abbildung 58).

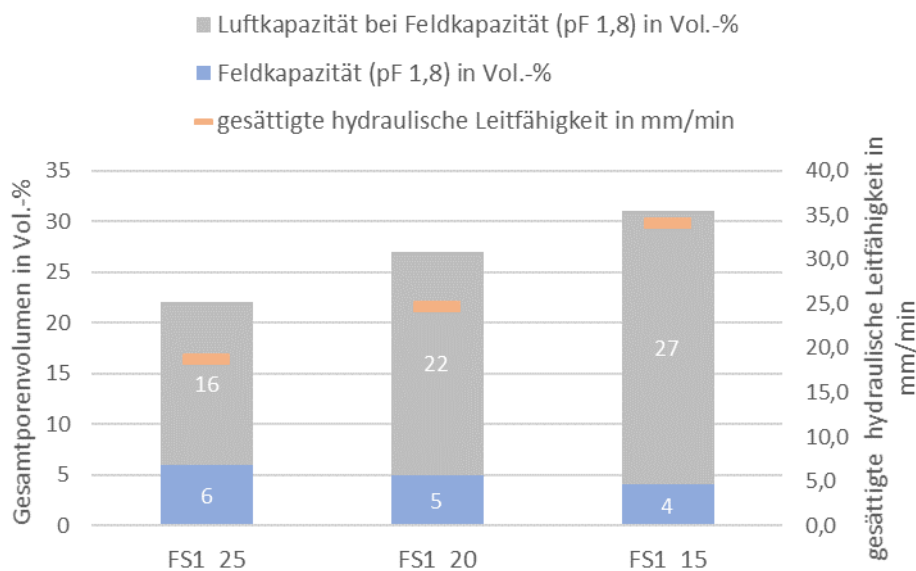


Abbildung 58: Vergleiche unterschiedlicher Feinsubstratanteile (15 Vol.-%, 20 Vol.-% und 25 Vol.-%) des mit FS1-Feinsubstrat eingeschlämmten Schwammstadtsubstrats im Schlämmversuch (Mittelwerte aus je 3 Wiederholungen)

Bei der Versuchsdurchführung wurde darauf geachtet, dass vor allem bei FS1_20 und FS1_15 eine möglichst homogene Verteilung des Feinsubstrats im gesamten Probenkörper erreicht wird. Dadurch konnten die Tensiometer bei allen drei Varianten im Feinsubstrat platziert werden. Ausschlaggebend für eine homogene vertikale Verteilung sind sowohl die Dauer als auch die Intensität der Einschlammvorgänge. Umso länger der Einschlammvorgang andauerte beziehungsweise umso mehr Wasserdruck eingesetzt wurde, desto eher lagert sich das Feinsubstrat ausschließlich in den unteren Bereichen an. Dies gilt vor allem für FS1_15. Dementsprechend wurden die Einschlammvorgänge kurzgehalten und mit einer geringen Wassermenge durchgeführt. Somit gelten die Leitfähigkeitswerte bei FS1_15 für ein eher homogen verteiltes Feinsubstrat und es ist davon auszugehen, dass sich die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit reduziert, sollte sich das Feinsubstrat ausschließlich in den unteren Bereichen ansammeln.

6.2.2.2. Vergleich FS1 und FS2

Wird ein Vergleich zwischen den Proben der Variante FS1_25 und jenen von FS2_15 gezogen, sind klare Unterschiede erkennbar. Erstere steht für eine österreichische Variante des Schwammstadtsubstrats, während FS2_15 die schwedische Version darstellt (siehe Kapitel 5.3.1). In Abbildung 59 sind die Gesamtporenvolumina beider Varianten sowie des reinen Grobschlags dargestellt. Die durchgeführten Schlämmversuche zeigen, dass das Gesamtporenvolumen des reinen Grobschlags (32/63 mm) rund 43 Vol.-% beträgt. Wird Feinsubstrat der FS1-Mischung mit einem Anteil

von 25 Vol.-% eingeschlämmt, reduziert sich das Gesamtporenvolumen auf 22 Vol.-%. Bei FS2 mit 15 Vol.-% Feinsubstratanteil ergibt sich ein deutlich höheres Gesamtporenvolumen von 38 Vol.-%.

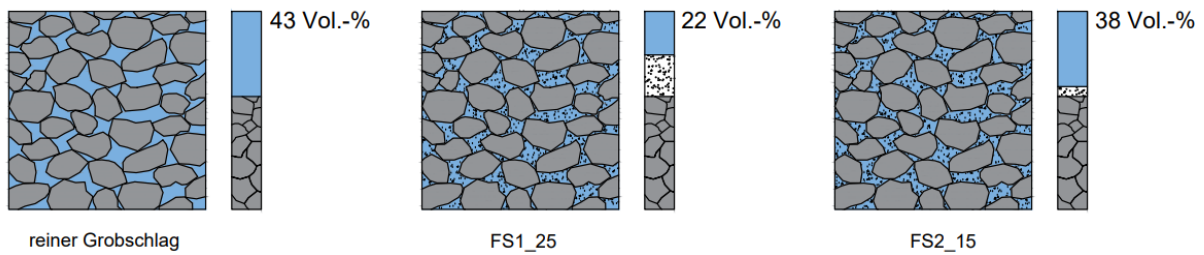


Abbildung 59: Vergleiche des Gesamtporenvolumens des reinen Grobschlags mit einer österreichischen (FS1_25) und einer schwedischen Variante (FS2_15) des Schwammstadts substrats

Neben dem höheren Gesamtporenvolumen besitzt die schwedische Variante eine deutlich höhere Luftkapazität, eine höhere Feldkapazität sowie eine höhere Wasserkapazität (2h). Auffallend ist die niedrigere gesättigte hydraulische Leitfähigkeit von 12,1 mm/min (FS2_15) im Vergleich zu 18,6 mm/min der Variante FS1_25 (siehe Abbildung 60). Vermutlich verschließen größere Kohlepartikel die Fließwege zwischen dem Grobschlag, während die sich darauf sammelnden feineren Partikel eine stauende Wirkung besitzen (siehe Anhang B FS2_15). Auch im unteren Bereich der Probenkörper zeigten sich kompakte Schichten von feinen Kohlepartikeln (siehe Abbildung 141 und Abbildung 139).

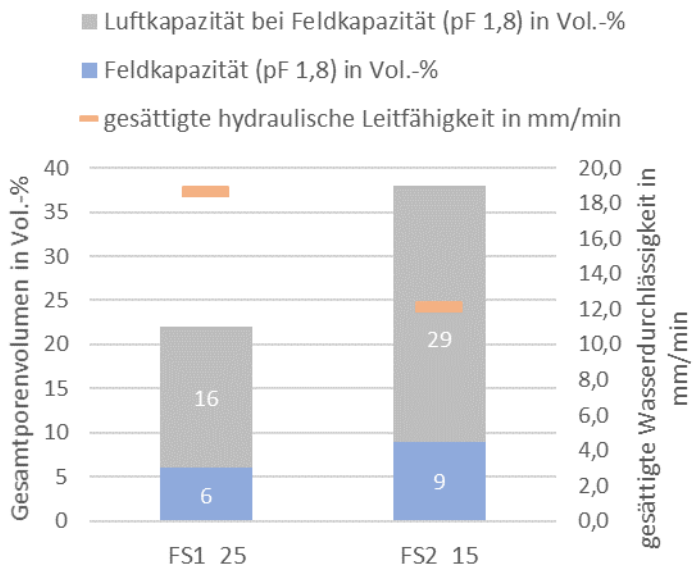


Abbildung 60: Vergleich einer österreichischen (FS1_25) und einer schwedischen Variante (FS2_15) des Schwammstadts substrats im Schlammversuch (Mittelwerte aus je 3 Wiederholungen)

7. Diskussion

7.1. Beantwortung der Forschungsfragen bezogen auf die Schüttversuche

Forschungsfrage F1:

Wie kann der Schüttversuch zur Untersuchung des Feinsubstrats optimiert beziehungsweise weiterentwickelt werden, mit dem Ziel der Entwicklung einer repräsentativen, reproduzierbaren und praktikablen Methode?

Allgemeiner Versuchsablauf:

Der Ablauf des Schüttversuchs wurde dahingehend abgeändert, den Wasseranteil bei Feldkapazität als ersten Parameter zu bestimmen. Diese Änderung fußt auf der Erkenntnis, dass die Untersuchung im Drucktopf zu einer moderaten Verdichtung des Feinsubstrats führte, wodurch ein stabiler Zustand erreicht wurde. Bei den nachfolgenden Untersuchungen konnten keine Änderungen der Dichte oder des Probenvolumens trotz Sättigungsvorgängen festgestellt werden. Dies lässt darauf schließen, dass die untersuchten Feinsubstrate nach der Feldkapazitätsbestimmung im Drucktopf den womöglich repräsentativsten, also realitätsnächsten Lagerungszustand einnehmen. Die nachfolgende Bestimmung der restlichen Parameter (Gesamtporenvolumen, Wasserkapazität 2h, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit) soll dadurch repräsentative Ergebnisse liefern.

FS1:

Bei der Untersuchung der FS1-Mischung erwiesen sich jene unverdichteten Proben mit lufttrocken (FS1_UV_It) sowie gesättigt (FS1_UV_ges) in die Probenzylinder eingebrachtem Feinsubstrat als am praktikabelsten (siehe Anhang B). Auch erzielten jene zwei Varianten hinsichtlich der untersuchten Parameter jeweils die Minimal- und Maximalwerte aller untersuchten FS1-Proben. Diese Minimal- und Maximalwerte stellen somit den best- und Worst-Case für die untersuchten Parameter dar. Es ist damit anzunehmen, dass sich die bodenhydrologischen Eigenschaften des Feinsubstrats im realen Einbau zwischen diesen beiden Werten bewegen. Sie bieten hydrologische Kennwerte für eine weniger dichte (FS1_UV_It) und eine dichtere (FS1_UV_ges) Lagerung dieser Feinsubstratmischung. Mit dieser Erkenntnis kann bei zukünftigen Schüttversuchen je nach Fragestellung eine der beiden Varianten gewählt werden.

Die moderate Verdichtung ergab im Vergleich zu den unverdichtet untersuchten Proben keine neuen Minimal- oder Maximalwerte. Dennoch kann sie bei gesättigt eingebauten Proben angewandt werden, um Setzungen, die durch die Feldkapazitätsbestimmungen entstehen, vorwegzunehmen. Die verdichteten Varianten FS1_V_It und FS1_V_ges erwiesen sich in der Versuchsdurchführung als praktikabel (siehe Anhang B).

Um die Frage zu klären, welche Variante des Schüttversuchs dem Realitätszustand des eingeschlammten Feinsubstrats am nächsten kommt, rücken vor allem die Varianten FS1_SCHLÄMM, FS1_UV_It und FS1_UV_ges in den Fokus. Bei der Simulation des Einschlammvorgangs (FS1_SCHLÄMM) konnte eine vertikale Schichtenbildung innerhalb der Probenkörper festgestellt werden (siehe Abbildung 91 und Abbildung 92). Eine ähnliche Schichtenbildung war auch bei den Schlammversuchen mit FS1-Mischung zu sehen (siehe Abbildung 119 und Abbildung 120). Dies könnte dafürsprechen, dass die FS1_SCHLÄMM-

Proben sich dem realen Einschlammvorgang und dem tatsächlichen Lagerungszustand des Feinsubstrats im Schwammstadtkörper brauchbar annähern. Die lufttrocken und unverdichtet eingebaute Variante (FS1_UV_It) besitzt sehr ähnliche hydrologische Kennwerte wie die „durchgeschlammte“ Variante (FS1_SCHLÄMM), bei einer weniger aufwendigen Probenvorbereitung. Auch die Trockenrohddichte ist bei diesen beiden Varianten ident. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass der Schüttversuch mit unverdichtet lufttrockenem Einbau die beste Annäherung des Zustands und der bodenhydrologischen Eigenschaften des Feinsubstrats im eingeschlammten Zustand ermöglicht.

Wird andererseits ein Vergleich zwischen den hydrologischen Kennwerten der Schüttversuche und jenen der Schlammversuche gezogen, lässt sich ein starker Zusammenhang der gesättigt und unverdichtet eingebauten FS1-Proben (FS1_UV_ges) mit den FS1-Schwammstadtsubstratproben (FS1_25, FS1_20 und FS1_15) erkennen. Beim Schüttversuch des gesättigt und unverdichtet eingebauten FS1-Substrats wurde eine Feldkapazität von 25 Vol.-% gemessen (siehe Tabelle 12). Bei einem Feinsubstratanteil von 25 Vol.-% in den Schlammversuchen müsste die Feldkapazität der Variante FS1_25 somit bei rund 6 Vol.-% liegen. Für die Variante FS1_20 wäre dieser Wert bei rund 5 Vol.-% und für FS1_15 bei rund 4 Vol.-%. Genau diese Werte wurden bei den FS1-Schwammstadtsubstratproben gemessen (siehe Tabelle 12). Da der Zusammenhang mit dieser Genauigkeit nur bei der gesättigt und unverdichtet eingebaute Variante des FS1-Substrats zutrifft, würde das für jene Variante als realitätsnächste und repräsentativste Untersuchungsmethodik des reinen Feinsubstrats sprechen.

Tabelle 12: Vergleich der Feldkapazität zwischen Schütt- und Schlammversuch anhand der FS1-Mischung

Laborversuch	Schüttversuch						Schlammversuch		
Feinsubstratmischung	FS1								
Einbau-Methodik	UV			V					
Einbau-Wasseranteil bzw. Feinsubstratanteil	lt	hges	ges	lt	hges	ges	25 Vol.-%	20 Vol.-%	15 Vol.-%
FK in Vol.-%	17	20	25	20	19	23	6	5	4

UV: unverdichtet; V: verdichtet; lt: lufttrocken; hges: halb gesättigt; ges: gesättigt

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass FS1_UV_It und FS1_UV_ges als praktikabelste und repräsentativste Varianten des Schüttversuchs der FS1-Mischung angesehen werden kann. Je nach Betrachtung finden sich Argumente für beide Varianten als realitätsnächste und somit repräsentativste Methodik. Für die lufttrocken und unverdichtet untersuchte Variante (FS1_UV_It) spricht die Ähnlichkeit der hydrologischen Kennwerte zur „Durchschlamm-Methodik“ FS1_SCHLÄMM. Für die gesättigt und unverdichtet eingebaute Variante (FS1_UV_ges) spricht, dass bei einem Vergleich zwischen Schütt- und Schlammversuchen ein Zusammenhang zwischen der FK jener Variante, mit den FK-Werten der Schlammversuchs-Proben festgestellt werden konnte. Beide Varianten liefern die Minimal- und Maximalwerte der untersuchten Parameter aller FS1-Proben, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die Werte dieses Feinsubstrats im Realeinbau zwischen jenen beider Varianten liegen.

FS2:

Für die aus ausschließlich Kompost und Pflanzenkohle bestehende FS2-Mischung hat sich der gesättigte unverdichtete Einbau (FS2_UV_ges) als am praktikabelsten und repräsentativsten erwiesen. Diese Variante wies eine deutlich geringere Auswaschung von feinen Kohlepartikeln auf, als dies bei den anderen Varianten der Fall war (siehe Abbildung 97, Abbildung 104 und Abbildung 101). Auch konnte bei der gesättigt eingebauten Variante eine im Messzeitraum konstante gesättigte hydraulische Leitfähigkeit beobachtet werden. Andere Varianten

(FS2_UV_hges und FS2_UV_It) zeigten eine stetige Zu- beziehungsweise Abnahme, was auf Umlagerungen von Substratbestandteilen innerhalb der Proben zurückzuführen sein könnte.

Die Proben des gesättigten Einbaus ergaben bei allen untersuchten Parametern die Minimal- beziehungsweise Maximalwerte. Beispielsweise konnte die höchste Trockenrohdichte gemessen werden, womit diese Variante eine dichtere Lagerung der FS2-Mischung repräsentiert und einen Best- beziehungsweise Worst-Case für die untersuchten Parameter darstellt.

Auch die Untersuchung des FS2-Feinsubstrats mit übersättigtem und unverdichtetem Einbau (FS2_UV_üges) liefert vielversprechende Ergebnisse. Diese Variante weist ebenfalls eine konstante hydraulische Leitfähigkeit im Messzeitraum auf. Jedoch konnte eine Auswaschung von Kohlepartikeln beobachtet werden (siehe Abbildung 104), wenngleich diese geringer als bei FS2_UV_It und FS2_UV_hges war. Dieser Umstand lässt wiederum auf Umlagerungen von Substratbestandteilen schließen. Durch die konstante hydraulische Leitfähigkeitsbestimmung werden die Auswirkungen dieser Umlagerungen auf die hydrologischen Substrateigenschaften als vernachlässigbar betrachtet, weshalb von repräsentativen Ergebnissen ausgegangen wird. Die höhere Menge an Wasser beim Einbau dieser Variante führte zu einer geringeren Trockenrohdichte als beim gesättigten Einbau.

Die moderate Verdichtungsmethodik hat sich für die FS2-Mischung aufgrund aufgetretener Komplikationen, wie Rissen und Spaltenbildung im Probenkörper als nicht zielführend herausgestellt (siehe Kapitel 6.2.1 sowie Anhang B). Weitere Erkenntnisse zu den Einflussgrößen und deren Variationen sowie zur Praktikabilität finden sich in Anhang B Schüttversuche.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die gesättigt und unverdichtet eingebaute Variante (FS2_UV_ges) am besten eignet, um die FS2-Mischung mit Hilfe des Schüttversuchs zu untersuchen. Es zeigte sich, dass diese Variante eine eher dichte Lagerung des Substrats hervorruft. Um ebenfalls Ergebnisse zu einer weniger dichten Lagerung des FS2-Substrats zu generieren, eignet sich die übersättigt und unverdichtet eingebaute Variante (FS2_UV_üges). Wenngleich bei dieser Variante durch Auswaschungen von Kohlepartikeln von weniger stabilen Substratverhältnissen als bei der gesättigten Variante ausgegangen wird. Dennoch liefern beide genannten Varianten für die FS2-Mischung repräsentative Ergebnisse, einerseits für eine dichtere (FS2_UV_ges) und andererseits für eine weniger dichte (FS2_UV_üges) Lagerung.

Die Werte und Erkenntnisse zu den FS2-Proben gelten für die in dieser Mischung verwendete Typen an Pflanzenkohle und Kompost. Wie Vaughn et al. (2015, S. 45) anmerken, können die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Pflanzenkohle je nach Ausgangsmaterial und Herstellungsprozess variieren. Anzunehmen ist, dass ein fehlender Feinanteil oder eine geringere maximale Partikelgröße zu anderen Erkenntnissen im Versuchsablauf und zu anderen hydrologischen Eigenschaften führen könnten. Vor allem eine Siebung der Pflanzenkohle und die Entfernung der feineren Fraktionen könnte die hydraulische Leitfähigkeit erhöhen.

Forschungsfrage F2:

Welche Auswirkungen hat die Variation einer bestimmten Einflussgröße auf die bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Eigenschaften der untersuchten Feinsubstrate?

Einflussgröße: Feinsubstratmischung:FS1 und FS2 (siehe Abbildung 57):

Werden die beiden repräsentativsten Varianten der jeweiligen Feinsubstratmischung (FS1_UV_lt, FS1_UV_ges und FS2_UV_üges, FS2_UV_ges) miteinander verglichen, zeigt sich, dass die Kompostkohle-Mischung (FS2) ein ungefähr doppelt so hohes Gesamtporenvolumen und eine doppelt so hohe Feldkapazität, wie die auf Sand basierte FS1-Mischung besitzt. Bei einer eher dichten Lagerung beider Feinsubstrate (FS1_UV_ges und FS2_UV_ges) ist die Luftkapazität bei Feldkapazität ähnlich hoch, während bei einer weniger dichten Lagerung (FS1_UV_lt und FS2_UV_üges) die FS2-Mischung eine höhere Luftkapazität aufweist.

Interessanterweise ist die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Varianten beider Feinsubstratmischungen mit höherer Dichte (FS1_UV_ges und FS2_UV_ges) ähnlich niedrig. Bei den Proben mit geringerer Dichte (FS1_UV_lt und FS2_UV_üges) erwies sich die Kompostkohle-Mischung (FS2) als durchlässiger.

Einflussgröße: Einbau-Methodik:FS1:

Die moderate Verdichtung hat auf das lufttrocken eingefüllte Feinsubstrat die größten Auswirkungen, indem die Trockenrohdichte von 1,53 (FS1_UV_lt) auf 1,70 g/cm³ (FS1_V_lt) erhöht wird. Dementsprechend ändern sich auch die bodenhydrologischen Eigenschaften nach der Verdichtung, indem die Luftkapazität bei Feldkapazität sowie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit abnehmen, während die Feldkapazität erhöht wird. Auf das gesättigt eingebaute FS1-Substrat hat die moderate Verdichtung weniger deutliche Auswirkungen. Die Trockenrohdichte sowie die anderen bodenhydrologischen Parameter sind bei FS1_UV_ges und FS1_V_ges ähnlich.

FS2:

Der Einfluss der moderaten Verdichtung konnte aufgrund aufgetretener Komplikationen (Risse und Spaltenbildung im Probenkörper) im Versuchsablauf für die Kompostkohle-Mischung nicht eruiert werden (siehe Kapitel 6.2.1).

Einflussgröße: Einbau-Wasseranteil:FS1:

Die unterschiedlichen im Einbau angewandten Wasseranteile zeigten, dass je mehr Wasser im Probenvorbereitungsprozess dem Feinsubstrat beigemischt wurde, desto höher die Dichte des Feinsubstrats im Probenzylinder war. Konkret führte der lufttrockene Einbau (FS1_UV_lt) zu einem weniger dichten Lagerungszustand mit einer Trockenrohdichte von 1,53 g/cm³ und der gesättigte Einbau (FS1_UV_ges) zur höchsten gemessenen Trockenrohdichte von 1,68 g/cm³. Der Einbau mit halber Sättigung (FS1_UV_hges) lag mit einer Trockenrohdichte von 1,58 g/cm³ dazwischen. Mit zunehmender Dichte geht eine Abnahme der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit sowie der Luftkapazität bei Feldkapazität einher, während sich der Wasseranteil bei Feldkapazität erhöht.

FS2:

Der soeben genannte Zusammenhang zwischen dem Einbau-Wasseranteil und der Dichte des Feinsubstrats lässt sich bei der FS2-Mischung in dieser Klarheit nicht feststellen. Gründe hierfür sind vermutlich die aufgetretenen Komplikationen in der Versuchsdurchführung der Proben FS2_UV_lt und FS2_UV_hges. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass der gesättigte Einbau (FS2_UV_ges) die höchste Trockenrohdichte mit $0,49 \text{ g/cm}^3$ aufweist. Damit gehen auch die niedrigste gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, die niedrigste Luftkapazität bei Feldkapazität, das niedrigste Gesamtporenvolumen und die höchste Feldkapazität einher.

7.2. Beantwortung der Forschungsfragen bezogen auf die Schlämmversuche

Forschungsfrage F1:

Wie kann der Schlämmversuch zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats optimiert beziehungsweise weiterentwickelt werden, mit dem Ziel der Entwicklung einer repräsentativen, reproduzierbaren und praktikablen Methode?

Allgemeiner Versuchsablauf:

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde ein Probenaufbau zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats entwickelt, der sich im Laufe des Schlämmversuchs für die jeweiligen Untersuchungen umbauen und adaptieren lässt. Einerseits ermöglicht dieser den Einbau des Substrats sowie die nachfolgenden Untersuchungen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, des Gesamtporenvolumens und der Wasserkapazität (2h), andererseits kann durch einen gezielten Umbau der Wasseranteil bei Feldkapazität an derselben Probe bestimmt werden. Dafür wurde an einer keramischen Platte ein Unterdruck von 60 hPa angelegt, der jenes Wasser, welches mit einem geringeren Druck in den Poren gebunden war, aus dem Substrat saugte. Um Schäden an der Keramikplatte durch den Grobschlag vorzubeugen und um eine gleichmäßige Verteilung des Unterdrucks zu gewährleisten, wurde eine Schicht feiner Sand zwischen Substrat und Platte eingebracht. Von der Substratoberfläche ausgehend wurden Tensiometer zur Überprüfung des Matrixpotenzials eingesetzt.

Auch wenn die Untersuchung mit einem größeren Aufwand als beim Schüttversuch verbunden ist, kann die weiterentwickelte Methodik des Schlämmversuchs als praktikabel eingestuft werden. Da im Zuge der Versuchsdurchführung keine größeren Komplikationen auftraten und der Einbau des Substrats möglichst nahe am Realeinbau vonstattenging, werden die ersten generierten bodenhydrologischen Kennwerte als repräsentativ angesehen. Die Ergebnisse der drei Versuchsläufe der jeweiligen Schlämmversuchsvarianten (siehe Anhang A) werden als vergleichbar bewertet. Dies erlaubt die Einstufung der Methodik als reproduzierbar (siehe Kapitel 5.2).

Forschungsfrage F2:

Welche Auswirkungen hat die Variation einer bestimmten Einflussgröße auf die bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Eigenschaften der untersuchten Schwammstadtsubstrate?

Einflussgröße: Feinsubstratmischung:

Wie auch schon der Vergleich der Feinsubstratmischungen beim Schüttversuch zeigt, besitzt das Schwammstadtsubstrat mit eingeschlammter FS2-Mischung (FS2_15) ein höheres Gesamtporenvolumen, eine höhere Luftkapazität bei Feldkapazität sowie einen höheren Wasseranteil bei Feldkapazität als das Schwammstadtsubstrat mit der sandbasierten FS1-Mischung (FS1_25). Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist hingegen bei der Kompostkohle-Mischung (FS2_15) trotz höherem Porenvolumen niedriger als jene bei FS1_25. Dies gilt auch für den Vergleich beider Feinsubstratmischungen mit jeweils 15 Vol.-% Feinsubstratanteil (FS1_15 und FS2_15).

Einflussgröße: Feinsubstratanteil:FS1:

Nachdem derzeit in Österreich das Schwammstadtsubstrat mit einem Feinsubstratanteil von 25 Vol.-% standardmäßig eingebaut wird (Arbeitskreis Schwammstadt, 2022) und dabei ein Großteil der Hohlräume des Grobschlags gefüllt ist, wurde dieser Anteil zweimalig mit 20 und 15 Vol.-% abgestuft und untersucht. Diese Abstufung erfolgte unter der Annahme, dass bei realen Einschlammvorgängen das Feinsubstrat nicht überall im selben Maße in die Hohlräume des Grobschlags gelangt. Somit ergeben sich mutmaßlich Bereiche mit geringerem Feinsubstratanteil. Die Ergebnisse zeigen, dass bei geringer werdendem Feinsubstratanteil eine nahezu lineare Zunahme der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, des Gesamtporenvolumens sowie der Luftkapazität bei Wasserkapazität (2h) und bei Feldkapazität festgestellt werden kann. Jedoch nimmt die Fähigkeit des Schwammstadtsubstrats Wasser zu halten ab, was durch eine nahezu lineare Reduktion der Wasserkapazität (2h) und der Feldkapazität festgestellt wurde.

Auch zeigen die Tensiometerwerte, dass der angelegte Unterdruck bei FS1_25 bei den im oberen Bereich befindlichen Tensiometern ankommt, weshalb von einem zusammenhängenden Feinsubstrat ausgegangen werden kann. Je geringer der Feinsubstratanteil wird, desto geringer wird auch der von den Tensiometern erfasste Druck, beziehungsweise steigt dadurch das Matrixpotenzial (siehe Tabelle 8). Dies lässt darauf schließen, dass das eingeschlammte Feinsubstrat bei den Varianten mit geringerem Feinsubstratanteil nicht durchgängig vorliegt und es somit zum Abreißen der Wassersäule innerhalb des Substrats kommt. Dies würde bedeuten, dass die Sogwirkung des anstehenden Untergrunds keinen Einfluss auf das im Feinsubstrat befindliche Wasser hat und dieses somit dort vorhanden bleibt, es sei denn es wird von Wurzeln entzogen. Zu bedenken ist hierbei, dass untersucht werden muss, inwiefern sich das Feinsubstrat bei geringen Feinsubstratanteilen, beispielsweise durch wiederholte Wasserzufuhr im Zuge von stärkeren Regenereignissen im Laufe der Zeit ausschließlich in den unteren Bereichen des Schwammstadtkörpers sammelt. Dies würde wiederum zu einem verstärkt zusammenhängenden Feinsubstrat führen.

FS2:

Aus zeitlichen Gründen wurde für die FS2-Mischung keine Abstufung des Feinsubstratanteils durchgeführt.

7.3. Einordnung der hydrologischen Kennwerte

7.3.1. Vergleich mit Anforderungen aus der FLL-Richtlinie (2010) und aus der ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a)

7.3.1.1. Schüttversuche

Werden die Werte der FS1-Mischung mit den Anforderungswerten für Baumsubstrate laut FLL (Kapitel 4.6.1) in Relation gesetzt, lässt sich feststellen, dass die unverdichtet lufttrocken (FS1_UV_It) sowie die „durchgeschlämmt“ (FS1_SCHLÄMM) eingebrachten Proben den Anforderungen (Leitfähigkeit, WK 2h, LK bei FK) entsprechen (siehe Abbildung 61 bis Abbildung 63). Vor allem die gesättigt eingebauten Proben hingegen liegen mit der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit sowie der Luftkapazität bei FK unter den FLL-Werten. Die Wasserkapazität (2h) kann aufgrund fehlender Werte (siehe Kapitel 6.1.1) nur mit den drei Varianten FS1_V_It, FS1_V_ges und FS1_SCHLÄMM verglichen werden, welche alle drei die Anforderungen erfüllen.

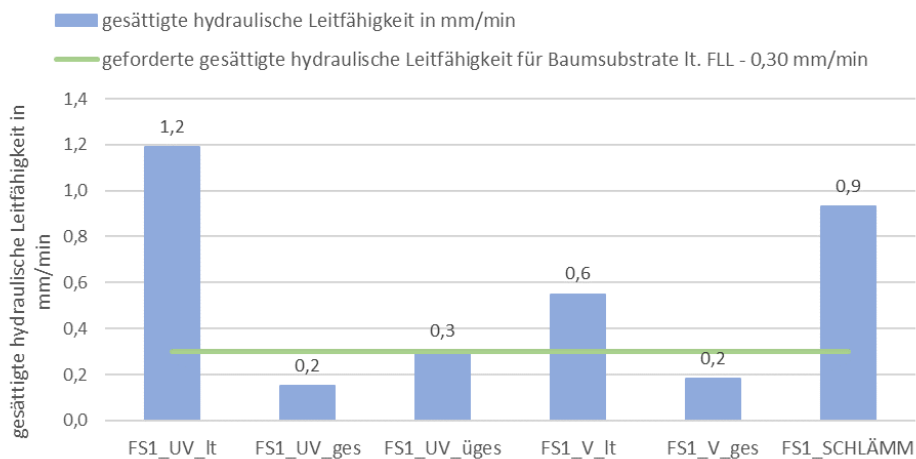


Abbildung 61: Vergleich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der FS1-Proben mit den Anforderungen der FLL (2010, S.41) für Baumsubstrate

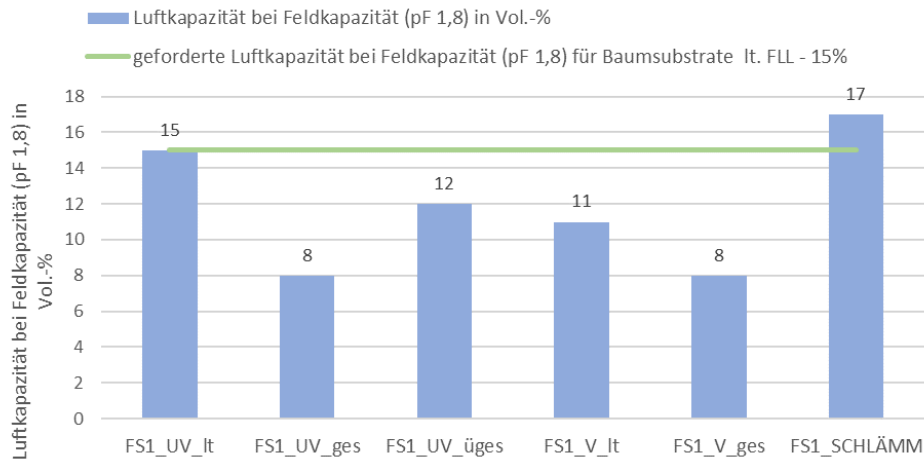


Abbildung 62: Vergleich der Luftkapazität bei FK der FS1-Varianten mit den Anforderungen der FLL (2010, S. 41) für Baumsubstrate

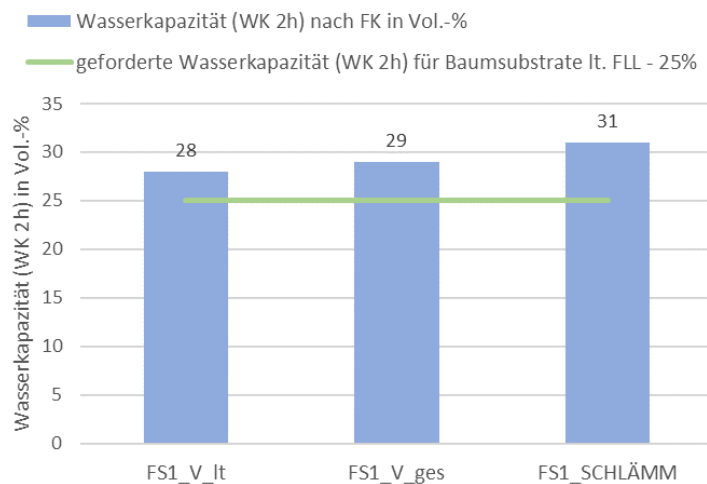


Abbildung 63: Vergleich der Wasserkapazität (2h) ausgewählter Proben mit den Anforderungen der FLL (2010, S. 41) für Baumsubstrate

Beim Vergleich der FS2-Mischung mit den FLL-Werten für Baumsubstrate werden die beiden repräsentativsten Varianten (FS2_UV_ges und FS2_UV_üges) herangezogen (siehe Abbildung 64 und Abbildung 65). Während die unverdichtet gesättigt eingebaute Variante (FS2_UV_ges) nicht den FLL-Werten entspricht, erfüllt die übersättigte Variante die Anforderungen (FS2_UV_üges). Aufgrund von fehlenden Werten (siehe Kapitel 6.2.1) kann kein Vergleich der WK (2h) angestellt werden. Angesichts der hohen FK kann davon ausgegangen werden, dass die WK 2h der Proben deutlich über den von der FLL geforderten 25 Vol.-% liegt.

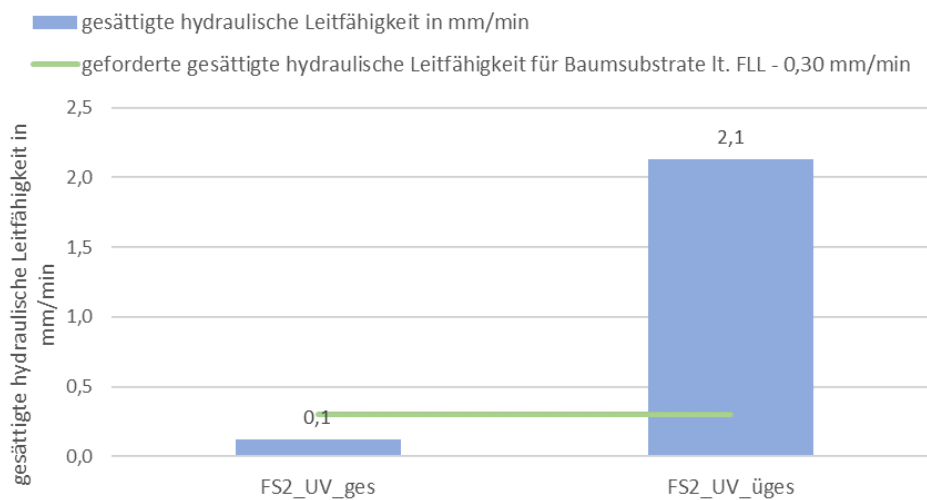


Abbildung 64: Vergleich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit repräsentativer FS2-Varianten mit den Anforderungen der FLL (2010, S. 41) für Baumsubstrate

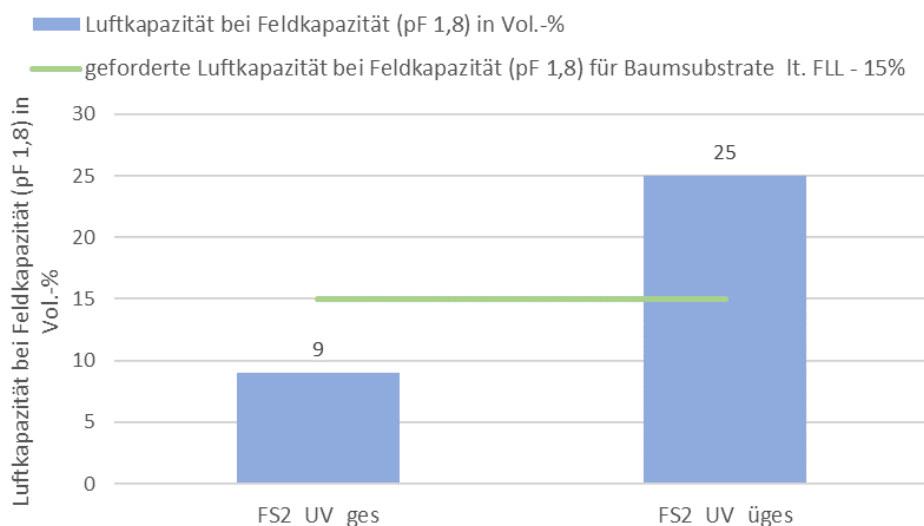


Abbildung 65: Vergleich der Luftkapazität bei FK repräsentativer FS2-Proben mit den Anforderungen der FLL (2010, S. 41) an Baumsubstrate

In den aktuelleren und spezifisch auf Feinsubstrate von durchwurzelbaren Unterbauten ausgelegte Anforderungen der ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25) wird eine nutzbare Feldkapazität von mindestens 10 Vol.-% vorausgesetzt. Um hierzu exakte Vergleiche zu bewerkstelligen, müsste der Permanente Welkepunkt der Feinsubstratmischungen bestimmt werden. Die ausreichend hohen Werte der reinen Feldkapazität lassen jedoch darauf schließen, dass der Anforderungswert von mindestens 10 Vol.-% nFK von beiden Feinsubstratmischungen mit allen durchgeführten Varianten erfüllt wird.

7.3.1.2. Schlammversuche

Für die Schlammversuche wird ein Vergleich mit den bodenhydrologischen Kenngrößen der ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) angestellt, da sich diese explizit an durchwurzelbare Unterbauten richten. Die Anforderungswerte bezüglich gesättigter hydraulischer Leitfähigkeit sowie Luftkapazität bei Feldkapazität sind jedoch bei ÖNORM L 1111 und FLL (2010) dieselben (siehe Kapitel 4.6.1). Bei einem Vergleich lässt sich feststellen, dass die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit aller Varianten deutlich über dem ÖNORM-Wert liegt (siehe Abbildung 66). Auch die Luftkapazität bei FK liegt bei allen Proben über dem von der ÖNORM L 1111 ausgewiesenen Anforderungswert von 15 Vol.-%. Die Proben der Variante FS1_25 liegen mit 16 Vol.-% jedoch nur knapp über diesem Wert (siehe Abbildung 67). Die FLL-Richtlinie für Baumsubstrate führt außerdem den Anforderungswert der Wasserkapazität (2h) von 25 Vol.-% an. Dieser wird von allen Varianten nicht erreicht (siehe Abbildung 68).

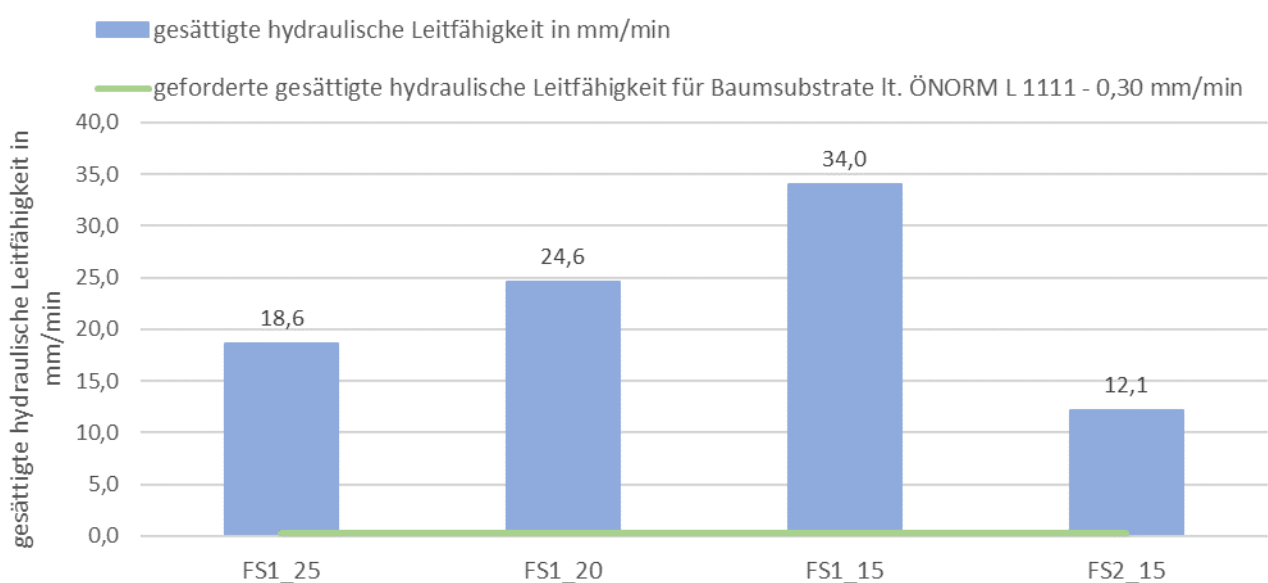


Abbildung 66: Vergleich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit aller Schwammstadts substrat-Proben mit den Anforderungen der ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) an durchwurzelbare Unterbauten - der geforderte Wert für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist bei ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) sowie bei FLL (2010, S. 41) derselbe

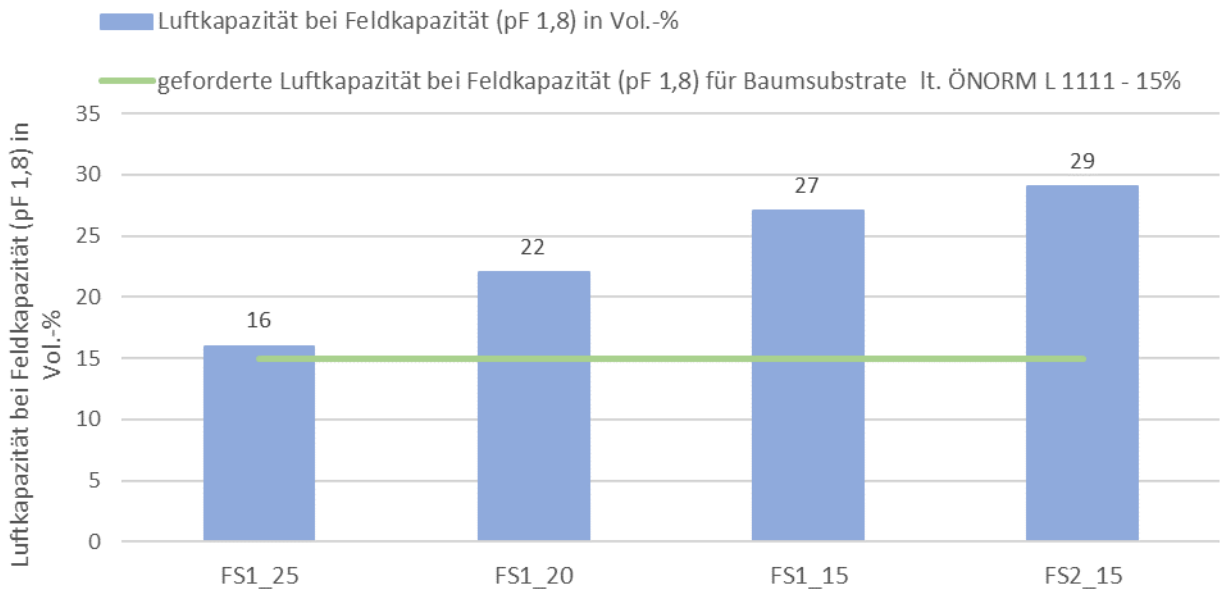


Abbildung 67: Vergleich der Luftkapazität bei FK aller Schwammstadtsubstrat-Varianten mit den Anforderungen der ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) an durchwurzelbare Unterbauten - der geforderte Wert für die Luftkapazität bei Feldkapazität ist bei ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) sowie bei FLL (2010, S. 41) derselbe

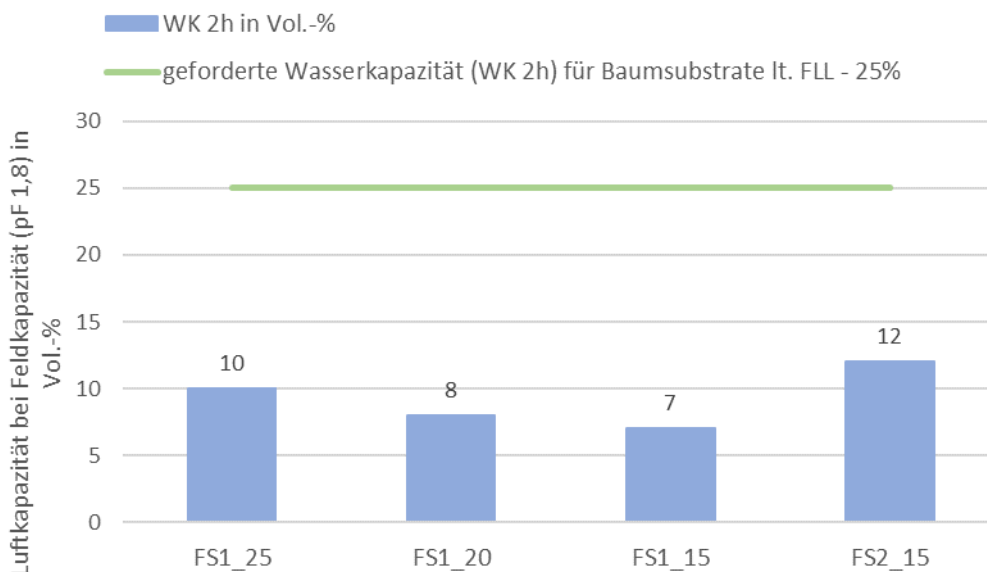


Abbildung 68: Vergleich der Wasserkapazität (2h) aller Schwammstadtsubstrat-Proben mit den FLL-Anforderungswerten (2010, S. 41) für Baumsubstrate

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse des Schüttversuchs, dass die Einflussgrößen Einbau-Methodik und der Einbau-Wasseranteil entscheidend sind, ob das untersuchte Feinsubstrat den Anforderungen der FLL für Baumsubstrate (2010) entspricht. Auch zeigt sich, dass die reinen Feinsubstratmischungen die Anforderungen hinsichtlich der Wasserkapazität (2h) erfüllen, jedoch nicht alle Varianten eine ausreichende gesättigte hydraulische Leitfähigkeit sowie Luftkapazität bei FK aufweisen. Bei Betrachtung der Schlammversuch-Ergebnisse verhält sich dieser Umstand genau anders herum, indem der Grobschlag für eine ausreichende Luftkapazität bei FK sowie eine ausreichende gesättigte hydraulische Leitfähigkeit sorgt, jedoch die Anforderungen an die Wasserkapazität (2h) nicht erfüllt werden. Zu bedenken ist hierbei, dass die aktuellere ÖNORM L 1111 für durchwurzelbare Unterbauten

nur einen Anforderungswert bezüglich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der LK bei FK angibt, jedoch keinen Wert zur Wasserkapazität. Beide erstgenannten Werte werden von allen Schlammversuch-Varianten erfüllt. Weiters wird auch nur ein bodenhydrologischer Anforderungswert für Feinsubstrate angegeben (nFK von 10 Vol.-%), dieser wird aller Voraussicht nach ebenfalls von allen Schüttversuch-Varianten erfüllt.

7.3.2. Vergleich mit internationaler Literatur

Zum Schwammstadtsubstrat wie es in dieser Arbeit beschrieben ist, gibt es noch keine vergleichbaren Labormethoden oder -ergebnisse. Am ehesten lassen sich die generierten hydrologischen Kennwerte mit Untersuchungen von anderen Struktursubstraten vergleichen. Für das in Kapitel 4.4.2 beschriebene „*CU-Structural Soil*®“ wurden bereits in den Jahren 1997, 2002 und 2006 bodenhydrologische und bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt (Grabosky et al., 2009, S. 271ff). Dabei kamen unterschiedliche Methoden zum Einsatz. Bei den ersten Versuchen wurde ebenfalls versucht, mit Hilfe von Keramikplatten die Proben zu entwässern, während das Matrixpotenzial von Tensiometern erfasst wurde. Im Zuge der Versuche kam es durch die Größe der Proben zu einigen Brüchen bei den Keramikplatten. Auch konnten die Tensiometer wegen der Korngröße des Grobschlags sowie schlechtem Kontakt zwischen Tensiometer und Substrat nicht sinnvoll eingesetzt werden. Aufgrund der genannten Schwierigkeiten wurde diese Methodik verworfen und bei den nächsten Versuchen 2002 und 2006 auf die Bestimmung des volumetrischen Wasseranteils anhand des Wasserpotenzials von im Substrat befindlichen Pflanzen in Kombination mit freier Verdunstung gesetzt (Grabosky et al., 2009, S. 272ff).

In der Tabelle 13 werden die hydrologischen Kennwerte der Variante FS1_25 mit jenen des „*CU-Structural Soils*®“ verglichen. Hierzu wurden Mittelwerte von einer unterschiedlichen Anzahl an Proben herangezogen (siehe erste Zeile Tabelle 13). War eine Standardabweichung verfügbar, wurde diese ebenfalls angegeben. Ein großer Unterschied stellt vor allem der Einbau der beiden Struktursubstrate dar. Während das „*CU-Structural Soils*®“ vorgemischt eingebaut und anschließend verdichtet wird (Bassuk et al., 2015, S. 11–16), wird beim Schwammstadtsubstrat nur der Grobschlag verdichtet und das Feinsubstrat nachher erst eingeschlämmt (Grimm et al., 2021a, S. 1). Dieser Umstand sorgt für das unverdichtete Vorliegen des Feinsubstrats beim Schwammstadtsubstrat im Gegensatz zum „*CU-Structural Soils*®“ (Zeiser et al., 2021, S. 2). Weiters zeigt die Tabelle 13, dass bei den durchgeführten Laboruntersuchungen der Grobschlag beziehungsweise die Steine des „*CU-Structural Soils*®“ eine geringere Korngröße aufweisen als jene des Schwammstadtsubstrats, während das Gewichtsverhältnis von Grobschlag und Feinsubstrat sehr ähnlich beziehungsweise gleich ist. Auch die Trockenrohichte weist sehr ähnliche Werte auf, lediglich bei den 2001-2002 durchgeführten Untersuchungen ist sie mit $1,75 \text{ g/cm}^3$ niedriger als jene der Variante FS1_25 ($1,98 \text{ g/cm}^3$). Bei den verwendeten Feinsubstraten fällt auf, dass jene des „*CU-Structural Soils*®“ mehr Ton beinhalten. Generell steigt das Gesamtporenvolumen sowie die Wasserhaltekapazität, je höher der Tonanteil eines Bodens ist (Baver, 1959, S. 164f). Dies zeigt sich auch bei den gemessenen Gesamtporenvolumina sowie der Wasserkapazität, die bei allen Varianten des „*CU-Structural Soils*®“ höher sind als bei FS1_25. Durch den höheren Tonanteil ergibt sich aber auch ein höherer nicht pflanzenverfügbarer Wasseranteil (Permanenter Welkepunkt). Unterschiede gibt es auch in der Bestimmung der Feldkapazität. Während sie im Zuge der vorliegenden Arbeit als Wasseranteil bei einem Matrixpotenzial von -60 hPa definiert wurde, wurde die FK bei den Versuchen des „*CU-Structural Soils*®“ in den Jahren 2001-2002 und 2006 als jener Wasseranteil bei 10,5 beziehungsweise 9-stündiger freier Dränierung definiert (Grabosky, 2009, S. 272ff). Es ist davon auszugehen, dass der bei FS1_25 gemessene Wasseranteil bei FK höher ausfallen würde, wäre er ebenfalls nur mit freier Dränierung bestimmt worden.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich der beiden Struktursubstrate, dass das „*CU-Structural Soil*®“ bei den durchgeführten Versuchen ein höheres Gesamtporenvolumen sowie eine höhere

Wasserkapazität aufweist. Werden die Varianten mit ähnlicher Trockenrohdichte (1996-1997 und 2006) verglichen, ist abzulesen, dass die Luftkapazität bei WK bei Variante FS1_25 höher ist. Es kann angenommen werden, dass die Gründe dafür unter anderem der niedrigere Tonanteil sowie das unverdichtete Vorliegen des Feinsubstrats bei Variante FS1_25 des Schwammstadtsubstrats sind. Zu erwähnen ist, dass zur Bestimmung der jeweiligen Parameter der beiden Struktursubstrate unterschiedliche Methoden eingesetzt wurden. Beim Vergleich der Ergebnisse sollte bedacht werden, dass laut Embrén et al. (2009, S. 7) die Luftkapazität der entscheidendste Faktor für vitale Stadtbäume ist, wenngleich laut Ow und Chan (2021, S.6) die hohe Porosität von Struktursubstraten in Phasen mit ausbleibenden Niederschlag schneller zu Trockenstress führen kann.

Tabelle 13: Vergleich der Variante FS1_25 des Schwammstadtsubstrats für Stadtbäume mit Untersuchungen zum „CU-Structural Soil®“ nach Grabosky et al. (2009)

Substrat	FS1_25 (Mittelwerte aus 3 Proben)	CU-Structural Soil® (Mittelwerte aus 11 Proben)	CU-Structural Soil® (Mittelwerte aus 17 Proben)	CU-Structural Soil® (Mittelwerte aus 5 Proben)
Quelle	Analysen dieser Masterarbeit	(Grabosky et al., 2009)	(Grabosky et al., 2009)	(Grabosky et al., 2009)
Jahr	2022	1996-1997	2001-2002	2006
Material Steine/Grobschlag	Kalkstein (Kantkorn)	Kalkstein (Kantkorn)	Kalkstein (Kantkorn)	Kalkstein (Kantkorn)
Material Feinsubstrat in Gew.-%	Sand (86 %), Murschwemm-material (8 %), Kohle (2 %) & Kompost (4 %) (siehe Kapitel 5.3.1)	Toniger Lehm & Hydrogel	Sand (80 %), Schluff (8 %), Ton (12 %) & Hydrogel	Sand (15 %), Schluff (56 %), Ton (29 %) & Hydrogel
Verhältnis Steine zu Feinsubstrat in Gew.-%	80:20	83:17	80:20	80:20
Korngröße Steine in cm	3,20-6,30	1,25-2,50	1,9-3,8	1,25-2,50
Trockenrohdichte in g/cm³	1,98±0,00	1,96±0,05	1,75±0,02	1,97±0,01
Gesamtporenvolumen in Vol.-%	22±1,1	27±1,9	34	26
Wasserkapazität in Vol.-%	10±0,3 (2h)	23±2,3 (3h)	14±0,0 (10,5h)	18±0,9 (3h) & 12±0,0 (9h)
Feldkapazität/nutzbare Feldkapazität in Vol.-%	6±0,2 (FK)	/	8 (nFK)	7 (nFK)
Luftkapazität bei Wasserkapazität in Vol.-%	12±1,0 (2h)	5±2,9 (3h)	20 (10,5h)	8 (3h)
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min	18,6±4,6	13,8 bis 17,4*	/	/

* an 2 Proben bestimmt

7.4. Methodenkritik

Ein übergeordnetes Ziel dieser Arbeit war die Erprobung und Weiterentwicklung von Labormethoden zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats. Aus zeitlichen Gründen im Zusammenhang mit der großen Anzahl an Versuchsläufen und längeren Versuchsdauer wurden die meisten Schüttversuche nur in Doppelbestimmung durchgeführt. Um im späteren Regelbetrieb die Aussagekraft der hydrologischen Kennwerte zu den Feinsubstraten zu erhöhen und statistische Auswertungen zu ermöglichen, wäre eine Anzahl von mindestens 3 Proben sinnvoll.

Aufgrund der einfacheren Handhabung der Schwammstadtsubstratproben sowie der generell beschränkten Dimensionen im Labor, wurde für die Schlämmversuche ein Grobschlag mit der Körnung 32/63 mm verwendet. Dieser ist kleiner als jener im realen Einbau mit 90 bis 150 mm. Somit stellt der Schlämmversuch eine Annäherung an den realen Einbauzustand dar, kann jedoch nicht als exakter Nachbau betrachtet werden. Dieser Umstand muss bei der Interpretation der Ergebnisse bedacht werden, da eventuell andere Werte bezüglich des Porenvolumens erzielt werden. Hinsichtlich dessen bedarf es noch weiteren Untersuchungen zum Einfluss der Korngröße des Grobschlags auf die bodenhydrologischen Eigenschaften des Schwammstadtsubstrats. Außerdem wird der Grobschlag im Realeinbau mittels Rüttelplatte verdichtet. Dieser Verdichtungsgrad wird im Laborsetting nicht erreicht, wenngleich versucht wurde eine möglichst kompakte Lagerung des Grobschlags zu erzeugen. Somit müsste noch überprüft werden, welches Gesamtporenvolumen ein mittels Rüttelplatte verdichteter Grobschlag aufweist und inwiefern sich dieser Wert von den ermittelten Laborwerten unterscheidet.

Des Weiteren wird unter Verwendung einer Keramikplatte der eingestellte Unterdruck nur im unteren Bereich des Probenkörpers erreicht. Mit zunehmender Substrathöhe nimmt das Gravitationspotenzial zu, wodurch das Matrixpotenzial stärker negativ wird. Somit ergibt sich innerhalb des Probenkörpers mit einer Höhe von 30 cm ein Potenzialunterschied von 30 hPa. Dies ergibt ein gemittelt Matrixpotenzial von -75 hPa für die gesamte Probe. Es ist denkbar, bei zukünftigen Versuchen einen Unterdruck von 45 hPa anzulegen, um in der vertikalen Probenmitte (15 cm Höhe) ein Matrixpotenzial von -60 hPa zu erreichen. Somit würde nicht nur an der Substratunterkante der Wert von -60 hPa erreicht werden, sondern das Matrixpotenzial der gesamten Probe im Mittel diesem Wert entsprechen.

Außerdem ist die Bestimmung der FK in diesem Kontext zu überdenken. Im Zuge dieser Arbeit wurde die FK bestimmt, indem ein Unterdruck von 60 hPa an den Proben angelegt wurde. Wie die Tabelle 8 zeigt, wird dieser Unterdruck bei niedrigen Feinsubstratanteilen der Schlämmversuchproben von den Tensiometern nur zu einem gewissen Grad registriert, was an einem nicht zusammenhängenden Feinsubstrat liegen könnte. Der mit dem Schlämmversuch gemessene Wert der FK kann somit für Proben mit niedrigen Feinsubstratanteilen unterschiedlich sein, je nachdem ob sich das Feinsubstrat in nicht zusammenhängenden Patches über den gesamten Schwammstadtkörper verteilt oder es sich gesammelt im unteren Bereich befindet. Prinzipiell wird durch die Keramikplatte ein anstehender Untergrund simuliert, der mit einem Unterdruck von 60 hPa dem Schwammstadtsubstrat Wasser entzieht. In der Realität würde das bedeuten, dass die isolierten Feinsubstratbereiche mehr Wasser halten können, als jene Bereiche mit Anschluss an den Untergrund.

Weiters ist zu hinterfragen, ob der Wasseranteil bei einem Matrixpotenzial von -60 hPa überhaupt ein repräsentativer Wert für die Ermittlung des pflanzenverfügbaren Wassers des Schwammstadtsubstrats ist (siehe Kapitel 4.5.3). Dieser Wert wird zumeist in Laborversuchen zur Bestimmung der Feldkapazität herangezogen, um vergleichbare Ergebnisse zu generieren (Wessolek et al., 2009, S. 6). Im Freiland wird die Feldkapazität definiert als jener Wasseranteil eines Bodens, der sich nach einem Regenereignis nach ein bis zwei Tagen einstellt (Scheffer et al., 1984, S. 171). Somit gilt es, Daten aus realen Standorten durch Monitorings einzuholen, um zu überprüfen, welches Matrixpotenzial beziehungsweise welcher Wasseranteil sich in einem eingebauten

Schwammstadtsubstrat nach vorheriger Sättigung über einen gewissen Zeitraum (1-2 Tage) durch freie Dränierung einstellt. Dieser Wasseranteil wäre somit pflanzenverfügbar.

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass dieser Freilandwert der Feldkapazität zwischen den in dieser Arbeit gemessenen Wasseranteilen der WK (2h) und der FK (-60 hPa) liegt. Die Werte der Wasserkapazität (WK 2h) spiegeln jenen Wasseranteil wider, der zumindest anfänglich gegen die Schwerkraft, ohne Anschluss an einen darunterliegenden Boden, gehalten werden kann, während angenommen wird, dass der Wasseranteil bei FK jedenfalls den Pflanzen als Bodenwasserspeicher zur Verfügung steht.

8. Fazit

Folgend werden die relevantesten Antworten auf beide übergeordneten Forschungsfragen zusammenfassend dargebracht.

Forschungsfrage F1:

Wie können die Laborversuche zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats optimiert beziehungsweise weiterentwickelt werden, mit dem Ziel der Entwicklung einer repräsentativen, reproduzierbaren und praktikablen Methode?

Im Zuge der durchgeführten Arbeit konnten beide Laborversuche (Schütt- und Schlämmversuch) in ihrer Methodik weiterentwickelt werden. Beim Schüttversuch wurde der methodische Ablauf geändert, wobei die Feldkapazitätsbestimmung zu Beginn durchgeführt wurde, um eine stabile und realitätsnahe Lagerung des Feinsubstrats zu erzielen. Bezüglich des Substrateinbaus beim Schüttversuch kann für beide untersuchten Feinsubstratmischungen (FS1 und FS2) die unverdichtet und gesättigt eingebrachte Variante als am praktikabelsten definiert werden. Außerdem konnte bei dieser Einbauvariante bei der sandbasierten FS1-Mischung ein Zusammenhang zwischen den Werten der Schüttversuche und jener der Schlämmversuche festgestellt werden, was wiederum für realitätsnahe Substratverhältnisse spricht.

Der Schlämmversuch konnte ebenfalls weiterentwickelt werden. Erstmalig konnte der Wasseranteil bei Feldkapazität ($pF\ 1,8$) des gesamten Schwammstadtsubstrats bestimmt werden. Hierfür wurde durch einen gezielten Umbau, über eine Keramikplatte ein Unterdruck von 60 hPa am Substratkörper angelegt.

Forschungsfrage F2:

Welche Auswirkungen hat die Variation einer bestimmten Einflussgröße auf die bodenphysikalischen und bodenhydrologischen Eigenschaften der untersuchten Substrate?

Schüttversuche (reines Feinsubstrat):

Einflussgröße Feinsubstratmischung:

In den durchgeführten Schüttversuchen zeigte sich, dass die aus reiner Kompostkohle bestehende FS2-Mischung ein höheres Gesamtporenvolumen, eine höhere Wasserkapazität (2h), eine höhere Feldkapazität, eine höhere Luftkapazität sowie eine höhere gesättigte hydraulische Leitfähigkeit als die sandbasierte FS1-Mischung aufwies, sofern die weniger dichten Varianten miteinander verglichen wurden. Bei einem Vergleich zwischen den jeweiligen Varianten beider Feinsubstratmischungen mit höchster Trockenrohdichte, waren die Luftkapazität als auch die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ähnlich.

Einflussgröße Einbau-Methodik:

Die Auswirkungen der Einflussgröße „Einbau-Methodik“, also der moderat verdichtete und unverdichtete Probeneinbau konnte aufgrund aufgetretener Komplikationen nur anhand der FS1-Mischung sinnvoll bestimmt werden. Dabei ließ sich feststellen, dass die angewandte moderate Verdichtungsmethodik auf die lufttrocken eingebrachten Substratproben die zu erwartenden Auswirkungen hatte (Erhöhung der Trockenrohdichte). Auf die gesättigt eingebauten FS1-Proben hatte die moderate Verdichtung keine messbaren Auswirkungen.

Einflussgröße Einbau-Wasseranteil:

Im Zuge der Variation der Einflussgröße „Einbau-Wasseranteil“ konnte für die FS1-Mischung beobachtet werden, dass je höher der Wasseranteil der Probe beim Einbau war, desto höher war die

gemessene Trockenrohdichte des Feinsubstrats. Der gesättigte Einbau rief somit die höchste Trockenrohdichte hervor. Bei der FS2-Mischung konnte dies aufgrund aufgetretener Komplikationen in dieser Deutlichkeit nicht nachgewiesen werden, wenngleich der gesättigte Einbau ebenfalls die höchste Dichte aufwies. Ein höherer Wasseranteil als jener bei vollständiger Sättigung (übersättigter Einbau), reduzierte wiederum die gemessene Trockenrohdichte.

Schlammversuche (gesamtes Schwammstadtsubstrat):

Einflussgröße Feinsubstratmischung:

Bei einem Vergleich einer österreichischen Variante des Schwammstadtsubstrats mit 25 Vol.-% eingeschlammten, sandbasierten FS1-Feinsubstrat mit einer schwedischen Variante mit 15 Vol.-% eingeschlammter Kompostkohle (FS2-Mischung), konnte bei der schwedischen Variante ein höheres Gesamtporenvolumen, eine höhere Wasserkapazität, eine höhere Feldkapazität und eine höhere Luftkapazität festgestellt werden. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit war bei der schwedischen Variante niedriger. Diese Erkenntnisse gelten auch für den Vergleich der Schwammstadtsubstratproben mit 15 Vol.-% eingeschlammter FS1-Mischung.

Einflussgröße Feinsubstratanteil:

Bei stufenweiser Reduktion des Feinsubstratanteils (25 Vol.-%, 20 Vol.-% und 15 Vol.-%) der FS1-Mischung im Zuge der Schlammversuche, wurde eine nahezu lineare Zunahme der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, des Gesamtporenvolumens sowie der Luftkapazität beobachtet. Die Fähigkeit Wasser zu halten nahm jedoch ab, da eine nahezu lineare Abnahme der Wasserkapazität (2h) und der Feldkapazität gemessen wurde. Für die Kompostkohle-Mischung FS2 wurde eine solche Variation des Feinsubstratanteils aus Zeitgründen nicht durchgeführt.

9. Ausblick

An das Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume werden hohe Anforderungen gestellt, einerseits soll es einen optimalen Wurzelraum für Stadtbäume darstellen und andererseits ein wirksames Element zur naturnahen Regenwasserbewirtschaftung sein. Beide Anforderungen gelten vor allem für den Einsatz in urbanen Räumen oder Siedlungsgebieten mit hohem Versiegelungsgrad. Diese gewünschte Multifunktionalität geht mit der Erfordernis zur Abstimmung gegenläufiger Parameter einher. Wie auch die Laborversuche zeigen, eignet sich ein Schwammstadtsubstrat mit geringerem Feinsubstratanteil aufgrund des höheren Gesamtporenvolumens besser für die Aufnahme von Starkregenereignissen, während ein höherer Feinsubstratanteil das Wasserhaltevermögen des Schwammstadtsubstrats verbessert und damit die Stadtbäume über einen längeren Zeitraum mit Wasser versorgen kann. Für eine optimale Funktionalität des Schwammstadtsubstrats ist es somit von großer Wichtigkeit, die bodenhydrologischen und bodenphysikalischen Eigenschaften und Vorgänge zu kennen und aufeinander abzustimmen.

Anhand der Ergebnisse der Laborversuche lässt sich ebenfalls ablesen, dass vor allem die Zusammensetzung des Feinsubstrats sowie der Feinsubstratanteil maßgebend für die Eigenschaften des Schwammstadtsubstrats verantwortlich sind und hierbei die Möglichkeit der gezielten Adaption gegeben ist. Es zeigt aber auch die Wichtigkeit der Planung und Ausführung solcher Projekte, indem beispielsweise im Vorhinein die an die Gegebenheiten und Ziele angepasste Feinsubstratmischung gewählt wird und auf eine kontrollierte und sorgfältige Durchführung des Einschlämmvorgangs geachtet wird.

Die im Zuge dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse bilden eine erste Grundlage für die Untersuchung des Schwammstadtsubstrats im Labor und liefern gleichzeitig erste Ergebnisse zu den bodenhydrologischen und bodenphysikalischen Eigenschaften des Substrats. Vor allem der weiterentwickelte Schlämmversuch erwies sich als praktikable, reproduzierbare und repräsentative Methode zur Untersuchung des gesamten Schwammstadtsubstrats.

Dennoch zeigen die durchgeführten Schlämmversuche die Notwendigkeit der Weiterentwicklung des Versuchs auf. Die Unterdruckmethode zur Bestimmung der Feldkapazität stößt bei niedrigeren Feinsubstratanteilen an ihre Grenzen, weshalb eine auf Verdunstung basierende Weiterentwicklung als sinnvoll erachtet wird. Auch die Bestimmung des Wasseranteils bei stärker negativen Matrixpotenzialen stellt eine zukünftige Aufgabe dar. Weiters ist ein Abgleich der Laborergebnisse mit Daten aus Monitoringanlagen vonnöten, um weitere Rückschlüsse zur Aussagekraft der Labormethoden und zum Schwammstadtsubstrat selbst ziehen zu können.

Die zukünftigen Potenziale für den Einsatz der Labormethoden und den daraus generierten hydrologischen Daten sind vielfältig. Beispielsweise können auf deren Grundlage Substratoptimierungen durchgeführt werden. Hierfür können einzelne Substratparameter abgeändert werden und die Auswirkung auf die Eigenschaften der Substrate mit Hilfe des Schütt- oder Schlämmversuchs evaluiert werden. Dabei zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die Einflussgrößen Einbau-Wasseranteil und Einbau-Methodik beim Schüttversuch einen Einfluss auf die hydrologischen Kennwerte der untersuchten Feinsubstrate haben. Diese Erkenntnis muss bei zukünftigen Schüttversuchen bedacht werden. Je nach Fragestellung können eine oder mehrere Varianten, welche sich im Zuge dieser Arbeit als repräsentativ herausgestellt haben, gewählt werden.

Die Werte können auch für hydrologische Modellierungen herangezogen werden, um die Funktionsfähigkeit des Schwammstadtsubstrats unter verschiedenen Bedingungen zu simulieren. Des Weiteren ist es auch denkbar, die im Rahmen dieser und weiterer Laboranalysen gewonnenen Daten als Basis für zukünftige Richtlinien zu Schwammstadtsubstraten zu nutzen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Bemessung und Planung von Schwammstadtsubstrat-Systemen. Anhand der Labordaten

lässt sich das Schwammstadtsubstrat gezielt dimensionieren, sowohl für die Funktion als Wurzelraum, als auch für die Funktion als Regenwasserretentionskörper eines definierten Einzugsgebiets.

Das folgende Gedankenexperiment zeigt das hydrologische Potenzial des Schwammstadtsubstrats am Beispiel Wiens und hebt die Relevanz der im Labor gewonnenen hydrologischen Kennwerte hervor.

Die Stadt Wien besitzt laut einer Erhebung im Jahr 2019 (Stadt Wien, o. J.) rund 3.560 ha an befestigten Gemeindestraßen. Davon sind rund 1.120 ha Gehsteige und Fahrbahnteiler sowie rund 78 ha baulich getrennte Radwege und Fußgängerzonen. Das ergibt addiert rund 1.198 ha an potenziellen Flächen, unter denen das Schwammstadtsubstrat eingebaut werden kann. Es wird angenommen, dass bei einem Viertel dieser Fläche (rund 300 ha) die Maßnahme umgesetzt wird. Bei einem zweischichtigen Einbau von insgesamt 60 cm, ergibt dies 1,8 Millionen m³ Schwammstadtsubstrat. Bei einem Feinsubstratanteil der FS1-Mischung von 25 Vol.-% wiesen die Laborversuche ein Gesamtporenvolumen von 22 Vol.-% auf. Dies würde ein potenzielles Rückhaltevermögen von 396.000 m³ Regenwasser bedeuten, sofern die Schwammstadtkörper bei Starkregenereignissen komplett gefüllt werden. Den Laborergebnissen zu Folge kann das Substrat 10 Vol.-% (Wasserkapazität 2h) bis 6 Vol.-% gegen die Schwerkraft halten (Wasseranteil bei Feldkapazität), was in Summe 180.000 m³ beziehungsweise 108.000 m³ wären. Dieses Wasser würde somit den Stadtbäumen zur Verfügung stehen, die es in Folge verdunsten. Der restliche Teil würde bei ausreichend durchlässigem Untergrund in den anstehenden Boden sickern, wo es schlussendlich zur Grundwasseranreicherung beiträgt (216.000 bis 288.000 m³).

In Österreich wurden mittlerweile rund 50 Projekte (Stand Herbst 2022) umgesetzt, bei denen das Schwammstadtsubstrat für Stadtbäume eingesetzt wurde (schriftliche Mitteilung, Zimmermann, 2022). Dies zeigt die Relevanz der Thematik und die Notwendigkeit sich auf wissenschaftlicher Ebene damit auseinanderzusetzen. Vor allem ein Ineinandergreifen von Wissenschaft und Planung wird für die zukünftig erfolgreiche Weiterentwicklung von Systemen zur Klimawandelanpassung von großer Bedeutung sein.

Literaturliste

- 3:0 Landschaftsarchitektur. (o.J.). Das Schwammstadt-Prinzip für Bäume. Verfügbar unter: <https://www.schwammstadt.at/>. Zugriff am 10.8.2022.
- 3:0 Landschaftsarchitektur, Bundesamt für Wasserwirtschaft, HBLFA Schönbrunn. (o. J.). Das Schwammstadtprinzip für Stadtbäume. Verfügbar unter: <https://www.gartenbau.at/forschung/Einblicke/%C3%9Cberblick-2020/Das-Schwammstadtprinzip-f%C3%BCr-Stra%C3%9Fenb%C3%A4ume.html>. Zugriff am 18.8.2022.
- Arbeitskreis Schwammstadt. (2022, Juni 29). persönliche Kommunikation.
- Armson, D. (2012). The Effect of Trees and Grass on the Thermal and Hydrological Performance of an Urban Area. Manchester: University of Manchester. Verfügbar unter: https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/54524206/FULL_TEXT.PDF. Zugriff am 1.12.2022.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R. et al. (2007). HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27 (1): 17–46. doi:10.1002/joc.1377.
- Austrian Standards. (2006). Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit in gesättigten Stechzylinderproben. ÖNORM L 1065:2006 12 01.
- Austrian Standards. (2011). Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate - Bestimmung der physikalischen Eigenschaften - Rohdichte (trocken), Luftkapazität, Wasserkapazität, Schrumpfungswert und Gesamtporenvolumen. (ÖNORM EN 13041:2011 12 15).
- Austrian Standards. (2017). Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohddichte. (ÖNORM EN ISO 11272:2017 07 01).
- Austrian Standards. (2019a). Gartengestaltung und Landschaftsbau – Technische Ausführung. (ÖNORM L 1111:2007-11).
- Austrian Standards. (2019b). Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens in land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden - Teil 2: Feinboden. (ÖNORM L 1061-2:2019 03 01).
- Austrian Standards. (2020). Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens – Laborverfahren. (ÖNORM EN ISO 11274:2020 04 01).
- Balder, H. (2020). Gehölzentwicklung in strukturstabilen Substraten. *Pro Baum*, 2: 12–24.
- Bassuk, N., Denig, B. R., Haffner, T., Grabosky, J., Trowbridge, P. (2015). CU-Structural Soil - A Comprehensive Guide. Ed. Denig, B. R. Urban Horticulture Institute, Cornell University. Verfügbar unter: <http://www.hort.cornell.edu/uhi/outreach/pdfs/CU-Structural%20Soil%20-%20A%20Comprehensive%20Guide.pdf>. Zugriff am 19.3.2022.
- Baver, L. D. (1959). *Soil physics* (3rd ed.). New York: Wiley.
- Benk, J., Artmann, S., Kutscheidt, J., Müller-Inkmann, M., Streckenbach, M., Weltecke, K. (2020). *Praxishandbuch Wurzelraumansprache*. Möhnesee: Arbeitskreis Baum im Boden.
- Brandenburg, C., Damyanovic, D., Reinwald, F., Alex, B., Gantner, B., Czachs, C. (2015). *Urban Heat Islands. Strategieplan Wien*. Wien: Magistrat der Stadt Wien, Umweltschutzabteilung - MA 22. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/uhi-strategieplan.html>. Zugriff am 26.3.2022.
- BBSR im BBR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung). (2015). Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung: Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte. Ergebnisbericht der fallstudiengestützten Expertise „Klimaanpassungsstrategien zur Überflutungsvorsorge verschiedener Siedlungstypen ...“. Bonn. Verfügbar unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2015/UeberflutungHitzeVorsorge.html>. Zugriff am 28.3.2022.

- Chen, H., Ma, J., Wei, J., Gong, X., Yu, X., Guo, H. et al. (2018). Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. *Science of The Total Environment*, 635: 333–342. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.127.
- Day, S., Bassuk, N. (1994). A Review of the Effects of Soil Compaction and Amelioration Treatments on Landscape Trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 20 (1): 9–17. doi:10.48044/jauf.1994.003.
- De Jong van Lier, Q. (2017). Field capacity, a valid upper limit of crop available water? *Agricultural Water Management*, 193: 214–220. doi:10.1016/j.agwat.2017.08.017.
- Deinhammer, A.-V., Fabsich, M., Härtel, C., Herndl, R., Lehmann, T., Markouschek, G. et al. (2018). Oberflächenentwässerung. Leitfaden für die Bauplanung. Empfehlungen für Wien. Wien: Magistrat der Stadt Wien, Magistratsdirektion - Geschäftsbereich Bauten und Technik. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/oberflaechenentwaesserung-leitfaden.pdf>. Zugriff am 23.3.2022.
- Dirksen, C. (1999). Soil physics measurements. Reiskirchen, Germany: Catena.
- Durner, W., Iden, S. C. (2011). Extended multistep outflow method for the accurate determination of soil hydraulic properties near water saturation: EXTENDED MULTISTEP OUTFLOW EXPERIMENT. *Water Resources Research*, 47 (8). doi:10.1029/2011WR010632.
- Embrén, B. (2021). Urban plant beds. PowerPoint-Präsentation.
- Embrén, B., Alvim, B.-M., Ståhl, Ö., Orvesten, A. (2009). Pflanzgruben in der Stadt Stockholm. Ein Handbuch. Stockholms stad Trafikkontoret. Verfügbar unter: https://www.urbanevegetation.de/downloads/Pflanzgruben_Stockholm_deutsch.pdf. Zugriff am 19.3.2022.
- Ennos, R., Armson, D., Rahman, M. A. (2014). How Useful are Urban Trees: The Lessons of the Manchester Research Project. *Trees, People and the Built Environment 2 - Conference Proceedings* (S. 62–70). Edgbaston: Institute of Chartered Foresters. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/274958579_Trees_People_and_the_Built_Environment_II_-_Conference_Proceedings#fullTextFileContent. Zugriff am 1.12.2022.
- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.). (2010). Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen. Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Bonn.
- Gaertig, T. (2015). Geht unseren Bäumen die Luft aus? Möglichkeiten und Grenzen der Diagnose von Bodenbelüftungsstörungen städtischer Baumstandorte. Gehalten auf der Baum- und Bodenseminar, Jena. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/284156019_Geht_unseren_Baumen_die_Luft_aus_Moglichkeiten_und_Grenzen_der_Diagnose_von_Belueftungsstorungen_stadtischer_Baumstandorte. Zugriff am 8.12.2022.
- Germer, K., Braun, J. (2019). Multi-step outflow and evaporation experiments – Gaining large undisturbed samples and comparison of the two methods. *Journal of Hydrology*, 577, 123914. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.123914.
- Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35 (4): 219–230. doi:10.1007/s00374-002-0466-4.
- González-Méndez, B., Chávez-García, E. (2020). Re-thinking the Technosol design for greenery systems: Challenges for the provision of ecosystem services in semiarid and arid cities. *Journal of Arid Environments*, 179, 104191. doi:10.1016/j.jaridenv.2020.104191.
- Grabosky, J., Haffner, E. & Bassuk, N. (2009). Plant Available Moisture in Stone-soil Media for Use Under Pavement While Allowing Urban Tree Root Growth. *Arboriculture & Urban Forestry*, 35 (5): 271–278. doi:10.48044/jauf.2009.041.
- Griffiths, J., Chan, F. K. S., Shao, M., Zhu, F., Higgitt, D. L. (2020). Interpretation and application of Sponge City guidelines in China. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378 (2168), 20190222. doi:10.1098/rsta.2019.0222.

- Grimm, K. (2010). Integratives Regenwassermanagement: Motivenbericht. Wien: Magistrat der Stadt Wien, Umweltschutzabteilung - MA 22. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/kontakte/ma22/studien/raum.html>. Zugriff am 23.3.2022.
- Grimm, K. (2020). das Schwammstadt-Prinzip für Bäume. Verfügbar unter: <https://www.schwammstadt.at/>. Zugriff am 10.8.2022.
- Grimm, K., Murer, E., Schmidt, S. (2021a). Das Schwammstadtprinzip für Stadtbäume in Österreich. Entstehung, Funktionsweise, Herausforderungen, Umsetzungen. Schwammstadt - Versickerung 2.0? (S. 51–55). Tagungsbeitrag Aqua Urbanica 2021, Innsbruck: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV).
- Grimm, K., Murer, E., Schmidt, S. (2021b). Das Schwammstadtprinzip für Stadtbäume in Österreich. Genese, Stand der Dinge, ausgewählte Beispiele, Herausforderungen. Schwammstadt - Versickerung 2.0? (S. 121–123). Tagungsbeitrag Aqua Urbanica 2021, Innsbruck: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV).
- Grimm, K., Schmidt, S. (2022, August 23). Wasser in der Stadt. Schwammstadtprinzip für Bäume. Vortrag Online-Seminar (Grünstattgrau), Wien.
- Hillel, D. (1980). Fundamentals of soil physics. New York: Academic Press.
- Hofstätter, M. (2010). Prisk-Change. Veränderung des Risikos extremer Niederschlagsereignisse als Folge des Klimawandels. Abschlussbericht. Wien: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/klima/klimamodellierung/prisk-change>. Zugriff am 23.3.2022.
- Howard, L. (1818). The climate of London. Deduced from Meteorological Observations, made at different places in the neighbourhood of the Metropolis. Vol. 1. London: W. Phillips, George Yard [u.a.]. Verfügbar unter: <https://archive.org/details/climatelondon00howagoog/page/344/mode/2up?ref=ol&view=theater>. Zugriff am 20.11.2022.
- Jost, D. (2012). Einfluss von suspendierten und immobilisierten Mikroorganismen auf die Eigenschaften des Kapillarsaumes: Untersuchungen im Rahmen der DFG-Forschergruppe „Dynamic Capillary Fringes - A Multidisciplinary Approach“ Karlsruher Berichte zur Ingenieurbiologie. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000028141>. Zugriff am 27.12.2022.
- Lashford, C., Rubinato, M., Cai, Y., Hou, J., Abolfathi, S., Coupe, S. et al. (2019). SuDS & Sponge Cities: A Comparative Analysis of the Implementation of Pluvial Flood Management in the UK and China. Sustainability, 11 (1): 213. doi:10.3390/su11010213.
- LeFevre, N.-J. B., Watkins, D. W., Gierke, J. S., Brophy-Price, J. (2010). Hydrologic Performance Monitoring of an Underdrained Low-Impact Development Storm-Water Management System. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136 (5): 333–339. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000177.
- Lucke, T., Beecham, S. (2019). An infiltration approach to reducing pavement damage by street trees. Science of The Total Environment, 671: 94–100. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.357.
- Matarese, V. (2022). Kinds of Replicability: Different Terms and Different Functions. Axiomathes, 32 (S2): 647–670. doi:10.1007/s10516-021-09610-2.
- METER Group AG München. (2018). User Manual. T5 /T5x. Verfügbar unter: http://library.metergroup.com/Manuals/UMS/T5_Manual.pdf. Zugriff am 20.10.2022.
- Meyer, M. (2007). Increasing the frame: interdisciplinarity, transdisciplinarity and representativity. Interdisciplinary Science Reviews, 32 (3): 203–212. doi:10.1179/030801807X211702.
- Millennium Ecosystem Assessment (Hrsg.). (2005). Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press. Verfügbar unter: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>. Zugriff am 2.4.2022.
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Winn, J. P., Hogan, E., Killick, R. E. et al. (2021). An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126 (3). doi:10.1029/2019JD032361.

- Moser-Reischl, A., Rötzer, T., Pauleit, S. (2017). Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven. *ALLGEMEINE FORST UND JAGDZEITUNG*, 188 (5–6): 94–111. doi:10.23765/afjz0002006.
- Mullaney, J., Lucke, T., Trueman, S. J. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 134: 157–166. doi:10.1016/j.landurbplan.2014.10.013.
- Murer, E. (2022, März 15). Schwammstadt für Stadtbäume. Erfahrungen & Herausforderungen. PowerPoint-Präsentation gehalten am Workshop Jägerhausgasse, Wien.
- Nasta, P., Huynh, S., Hopmans, J. W. (2011). Simplified Multistep Outflow Method to Estimate Unsaturated Hydraulic Functions for Coarse-Textured Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 75 (2): 418–425. doi:10.2136/sssaj2010.0113.
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Wang, X. C., Ren, N., Li, G. et al. (2019). Implementation of a specific urban water management - Sponge City. *Science of The Total Environment*, 652: 147–162. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.10.168.
- Nowotny, G. (2011). Stadtbäume in Salzburg (Österreich) 1983 - 2010. Ergebnisse langjähriger Untersuchungen zu Bestandsveränderungen, Vitalität und Wuchsbedingungen. Stadtlandschaft – vielfältige Natur und ungleiche Entwicklung. (S. 67–84). Gehalten auf der Kompetenznetzwerk Stadtökologie CONTUREC 5, Laufen: Jürgen Breuste, Stephan Pauleit und Johannes Pain (Hrsg.). Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/280805095_NOWOTNY_G_2013_Stadtbaume_in_Salzburg_Osterreich_1983_-_2010_Ergebnisse_langjahriger_Untersuchungen_zu_Bestandsveränderungen_Vitalitat_und_Wuchsbedingungen_-_In_BREUSTE_J_PAULEIT_S_PAIN_J_Hrsg_Stadtla. Zugriff am 8.12.2022.
- AGES (Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH). (2022). Hitze-Mortalitätsmonitoring. Verfügbar unter: <https://www.ages.at/umwelt/klima/informationen-zu-hitze>. Zugriff am 26.3.2022.
- Ow, L. F. und Chan, E. (2021). Deferring waterlogging through stormwater control and channelling of runoff. *Urban Forestry & Urban Greening*, 65: 127351. doi:10.1016/j.ufug.2021.127351.
- Ow, L. F. und Ghosh, S. (2017). Urban tree growth and their dependency on infiltration rates in structural soil and structural cells. *Urban Forestry & Urban Greening*, 26: 41–47. doi:10.1016/j.ufug.2017.06.005.
- Roloff, A., Kehr, R. (2013). Bäume in der Stadt: Besonderheiten - Funktion - Nutzen - Arten - Risiken ; 12 Tabellen. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- Rose, B. (2020). Tree Pits with Structural Soils - Practice Note (Version 1.2). Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/341343983_Tree_Pits_with_Structural_Soils_-_Practice_Note_Version_12. Zugriff am 16.12.2022.
- Salmond, J. A., Tadaki, M., Vardoulakis, S., Arbuthnott, K., Coutts, A., Demuzere, M. et al. (2016). Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health*, 15 (S1): S36. doi:10.1186/s12940-016-0103-6.
- Sauerwein, M. (2004). Urbane Bodenlandschaften - Eigenschaften, Funktionen und Stoffhaushalt der siedlungsbeeinflussten Pedosphäre im Geoökosystem, Online-Ressource, Text + Image (kB). Universitäts- und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt. doi:10.25673/3787.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Brümmer, G. W., Renger, M. (1984). Lehrbuch der Bodenkunde (11., neu bearb. Aufl., 1. durchges. Nachdr.). Stuttgart: Enke.
- Schindler, U., Mueller, L., Eulenstein, F. (2018). New measurement methods and devices and evaluation framework for characterizing of hydrological properties of growing media. *Horticulture International Journal*, 2 (4). doi:10.15406/hij.2018.02.00048.
- Schmidt, H.-P. (2011). Wege zur Terra Preta - Aktivierung von Pflanzenkohle. *Ithaka Journal*, 1: 28–32.
- Schmidt, S. (o.J.). Schwammstadt: die neue Aufteilung unter der Straße. PowerPoint-Präsentation, HBLFA Schönbrunn. Verfügbar unter: https://www.naturimgarten.at/files/content/3.%20VERANSTALTUNGEN/DIV/2020/%C3%96PFL%20Tag%201/Pr%C3%A4sentation_Schmidt.pdf. Zugriff am 27.12.2022.

- Schmidt, S., Murer, E. (2022, März 31). Das Schwammstadtprinzip für Bäume. Konzepte, Techniken und Erfahrungen aus Österreich. PowerPoint-Präsentation gehalten auf der Fachtagung „Bäume in der Stadt“, Zürich.
- Stadt Wien. (o. J.). Gemeindestraßen in Wien - Verkehrsflächen und Radverkehrsanlagen 2004 bis 2019. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/statistik/verkehr-wohnen/tabellen/verkehrsflaechen-rad-zr.html>. Zugriff am 30.11.2022.
- Stangl, R., Medl, A., Scharf, B., Pitha, U. (2019). Wirkungen der grünen Stadt. Studie zur Abbildung des aktuellen Wissensstands im Bereich städtischer Begrünungsmaßnahmen. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Verfügbar unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/publikationen/schriftenreihe-2019-12-wirkungen-gruene-stadt.php>. Zugriff am 2.4.2022.
- Statistik Austria. (2021). Statistik der Straßenverkehrsunfälle. Verfügbar unter: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/unfaelle_mit_personenschaden/index.html. Zugriff am 26.3.2022.
- Streiling, S., Matzarakis, A. (2003). Influence of Single and Small Clusters of Trees on the Bioclimate of a City: A Case Study. *Journal of Arboriculture*, 29: 309–316. doi:10.48044/jauf.2003.037.
- Umweltbundesamt. (2022). Bodenversiegelung. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung#was-ist-bodenversiegelung>. Zugriff am 8.12.2022.
- Umweltbundesamt GmbH. (2020). Die Innovation für Stadtbäume: das Schwammstadt-Prinzip. Verfügbar unter: <https://www.klimawandelanpassung.at/newsletter/kwa-nl42/kwa-schwammstadtprinzip>. Zugriff am 19.3.2022.
- Vaughn, S. F., Kenar, J. A., Eller, F. J., Moser, B. R., Jackson, M. A. & Peterson, S. C. (2015). Physical and chemical characterization of biochars produced from coppiced wood of thirteen tree species for use in horticultural substrates. *Industrial Crops and Products*, 66: 44–51. doi:10.1016/j.indcrop.2014.12.026.
- Verein Land schafft Wasser. (o. J.). Ausgewählte Projektaktivitäten. Verfügbar unter: <https://www.landschaftwasser.at/projekte.html>. Zugriff am 18.8.2022.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Renger, M. (2009). Bodenökologie und Bodengenese. Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Berlin: Technische Universität Berlin.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2015). World reference base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. (2014). [3. ed.]. Rome: FAO.
- Yilmaz, D., Cannavo, P., Séré, G., Vidal-Beaudet, L., Legret, M., Damas, O. et al. (2018). Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening. *Journal of Soils and Sediments*, 18 (2): 442–455. doi:10.1007/s11368-016-1524-0.
- Yu, K. (2017). Sponge City Theories Review. *Stormwater Management in Landscape Design*. (S. 10–15). London: Design Media Pub Ltd.
- ZAMG. (o. J. a). Hitze. Hitze wird zum Problem. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/hitze>. Zugriff am 19.3.2022.
- ZAMG. (o. J. b). Lufttemperatur. Doppelt so starke Erwärmung in Österreich. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/lufttemperatur>. Zugriff am 19.3.2022.
- ZAMG. (o. J. c). Lufttemperatur. Erwärmung in Etappen. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/lufttemperatur>. Zugriff am 19.3.2022.
- ZAMG. (o. J. d). Lufttemperatur. Temperaturszenarien bis 2100. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/europa/lufttemperatur>. Zugriff am 19.3.2022.

- ZAMG. (o. J. e). Niederschlag. Projektionen mit Unsicherheiten. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/europa/niederschlag>. Zugriff am 19.3.2022.
- ZAMG. (o. J. f). Starkniederschlag. Vermehrte Starkniederschläge. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/starkniederschlag>. Zugriff am 19.3.2022.
- Zeiser, A., Murer, E., Schmidt, S., Kumpan, M., Strauss, P., Weninger, T. (2021). Schwammstadt für Stadtbäume. Funktionsorientierte Substratentwicklung am Beispiel des multifunktionalen Wurzelraums. Schwammstadt - Versickerung 2.0? (S. 92–96). Tagungsbeitrag Aqua Urbanica 2021, Innsbruck: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV).
- Zimmermann, D. (2022, Dezember 21). Persönliche Mitteilung, E-Mail.

Tabellen- bzw. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema zur ganzheitlichen Untersuchung des Schwammstadtsubstrats (Zeiser et al., 2021, S. 3)	2
Abbildung 2: Abweichungen der mittleren Jahrestemperatur global (violett) und bezogen auf Österreich (rot) im Vergleich mit dem Durchschnitt der Jahre 1961-1990 (Auer et al., 2007; Morice et al., 2021; ZAMG, o. J. b)	5
Abbildung 3: Begrenzter Wurzelraum eines Straßenbaums in Wien	10
Abbildung 4: Erkennbare Durchwurzelung der Bettungsschicht eines Betonpflasterwegs in Hamburg	11
Abbildung 5: Schäden an Pflasterungen durch Baumwurzeln.....	12
Abbildung 6: Unterschiedlich starke Durchwurzelung der Schichten eines Technosols durch einen Stadtbaum in Hamburg.....	13
Abbildung 7: Skizze zum Aufbau und zur Funktionalität von Struktursubstraten	15
Abbildung 8: Einlaufschächte zwischen Baumscheiben in Stockholm	16
Abbildung 9: Axonometrie zum Wasserfluss im Schwammstadtsubstrat-System (3:0 Landschaftsarchitektur, o.J.)	19
Abbildung 10: Vereinfachter Aufbau des Schwammstadtprinzips für Stadtbäume (3:0 Landschaftsarchitektur et al., o. J.)	21
Abbildung 11: Feinsubstrat und Grobschlag am Praterstern	22
Abbildung 12: Aushub der Pflanzgrube	24
Abbildung 13: Einbringen des Grobschlags.....	24
Abbildung 14: Einschichtig ausgebrachter Grobschlag.....	24
Abbildung 15: Verdichtung des Grobschlags mittels Rüttelplatte.....	24
Abbildung 16: Aufbringen des Feinsubstrats auf die erste verdichtete Grobschlagschicht.....	24
Abbildung 17: Einschlämmen des Feinsubstrats in die Hohlräume des Grobschlags	24
Abbildung 18: Übergeordnetes Versuchsdesign.....	35
Abbildung 19: Versuchsdesign Schüttversuch	36
Abbildung 20: Versuchsdesign Schlämmversuch.....	36
Abbildung 21: Herstellen des gesättigten Feinsubstrats	38
Abbildung 22: Anbringen der gesättigten Faltenfilter am Probenzylinder.....	38
Abbildung 23: Plastikkübel als Verdunstungsschutz während der Bestimmung der WK 2h.....	39
Abbildung 24: Platzieren der Proben auf einer gesättigten Keramikplatte.....	39
Abbildung 25: Proben im Drucktopf	39
Abbildung 26: Proben im Wasserbad zum Sättigen	40
Abbildung 27: Aufbau zur Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit	40
Abbildung 28: Überführung des Substrats in eine ofenfeste Schale	42
Abbildung 29: Leerer Versuchsaufbau zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats	43
Abbildung 30: Einbringen des Grobschlags in den Probezylinder	44
Abbildung 31: Einfüllen des Feinsubstrats.....	44
Abbildung 32: Einschlämmen des Feinsubstrats	45
Abbildung 33: Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Schwammstadtsubstrats	46
Abbildung 34: Feinsubstratmischung FS1.....	47
Abbildung 35: Separate Bestandteile der Feinsubstratmischung FS2 (oben Kompost, unten Pflanzenkohle)	48
Abbildung 36: Aufbau zur Durchführung der moderaten Verdichtung.....	54
Abbildung 37: Versuchsaufbau zur Durchführung des „Durchschlämmens“	55
Abbildung 38: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Schwammstadtsubstrats	58
Abbildung 39: Versuchsaufbau auf Wägezelle	58

Abbildung 40: Sättigen der Probe	58
Abbildung 41: Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit	58
Abbildung 42: Platzieren des Deckels	59
Abbildung 43: Entfernen des Gaze-Gewebes	59
Abbildung 44: Freigelegte Unterseite des Schwammstadtsubstrats	59
Abbildung 45: Aufsetzen des Rings	59
Abbildung 46: Einbau des Sands	59
Abbildung 47: Verdichten des Sands	59
Abbildung 48: Aufsetzen der Keramikplatte	60
Abbildung 49: Aufbau zur Bestimmung der FK auf einer Wägezelle	60
Abbildung 50: Versuchsaufbau mit angelegtem Unterdruck	60
Abbildung 51: Verwendete Tensiometer	60
Abbildung 52: Vergleiche unterschiedlicher Einbau-Wasseranteile der FS1-Mischung im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)	63
Abbildung 53: Vergleich unverdichteter und moderat verdichteter Einbau der FS1-Mischung im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)	64
Abbildung 54: Vergleich der durchgeschlämmten Variante mit lufttrocken und unverdichtet eingebauten Proben des FS1-Substrats im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen bei FS1_UV_It und 3 Wiederholungen bei FS1_SCHLÄMM)	65
Abbildung 55: Vergleich unterschiedlicher Einbau-Wasseranteile der FS2-Mischung im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)	66
Abbildung 56: Vergleich zwischen unverdichtet und verdichtet eingebauten FS2-Proben im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)	66
Abbildung 57: Vergleiche der repräsentativsten Varianten beider Feinsubstratmischungen im Schüttversuch (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen)	67
Abbildung 58: Vergleiche unterschiedlicher Feinsubstratanteile (15 Vol.-%, 20 Vol.-% und 25 Vol.-%) des mit FS1-Feinsubstrat eingeschlämmten Schwammstadtsubstrats im Schlämmversuch (Mittelwerte aus je 3 Wiederholungen)	68
Abbildung 59: Vergleiche des Gesamtporenvolumens des reinen Grobschlags mit einer österreichischen (FS1_25) und einer schwedischen Variante (FS2_15) des Schwammstadtsubstrats	69
Abbildung 60: Vergleich einer österreichischen (FS1_25) und einer schwedischen Variante (FS2_15) des Schwammstadtsubstrats im Schlämmversuch (Mittelwerte aus je 3 Wiederholungen)	69
Abbildung 61: Vergleich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der FS1-Proben mit den Anforderungen der FLL (2010, S.41) für Baumsubstrate	76
Abbildung 62: Vergleich der Luftkapazität bei FK der FS1-Varianten mit den Anforderungen der FLL (2010, S. 41) für Baumsubstrate	77
Abbildung 63: Vergleich der Wasserkapazität (2h) ausgewählter Proben mit den Anforderungen der FLL (2010, S. 41) für Baumsubstrate	77
Abbildung 64: Vergleich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit repräsentativer FS2-Varianten mit den Anforderungen der FLL (2010, S. 41) für Baumsubstrate	78
Abbildung 65: Vergleich der Luftkapazität bei FK repräsentativer FS2-Proben mit den Anforderungen der FLL (2010, S. 41) an Baumsubstrate	78
Abbildung 66: Vergleich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit aller Schwammstadtsubstrat-Proben mit den Anforderungen der ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) an durchwurzelbare Unterbauten - der geforderte Wert für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist bei ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) sowie bei FLL (2010, S. 41) derselbe	79
Abbildung 67: Vergleich der Luftkapazität bei FK aller Schwammstadtsubstrat-Varianten mit den Anforderungen der ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) an durchwurzelbare Unterbauten - der geforderte Wert für die Luftkapazität bei Feldkapazität ist bei ÖNORM L 1111 (Austrian Standards, 2019a, S. 25f) sowie bei FLL (2010, S. 41) derselbe	80

Abbildung 68: Vergleich der Wasserkapazität (2h) aller Schwammstadtsubstrat-Proben mit den FLL-Anforderungswerten (2010, S. 41) für Baumsubstrate	80
Abbildung 69: FS1_UV_It - lufttrockener Einbau der FS1-Mischung	102
Abbildung 70: FS1_UV_It - sättigen der lufttrocken eingebauten Proben	102
Abbildung 71: FS1_UV_hges - halb gesättigte Feinsubstratmischung FS1 vor dem Einbau	103
Abbildung 72: FS1_UV_hges - halb gesättigte Mischung FS1 nach dem Einbau	103
Abbildung 73: FS1_UV_hges - deutliche Setzungen und Risse der halb gesättigt eingebauten FS1-Mischung nach dem Sättigungsvorgang	104
Abbildung 74: FS1_UV_ges - FS1 gesättigt vor dem Einbau in die Probenzylinder	105
Abbildung 75: FS1_UV_ges - Einbau der gesättigten FS1-Mischung	105
Abbildung 76: FS1_UV_üges - übersättigte FS1-Mischung vor dem Einbau	106
Abbildung 77: FS1_UV_üges - übersättigte FS1-Mischung direkt nach dem Einbau	106
Abbildung 78: FS1_UV_üges - oberflächige Ansammlung der organischen Komponenten bei der übersättigten Variante	107
Abbildung 79: FS1_V_It - Setzungen der lufttrocken eingebauten FS1-Mischung nach moderater Verdichtung	108
Abbildung 80: FS1_V_It - Probenkörper nach dem Ausbau mit wenigen sichtbaren Lufteinschlüssen	108
Abbildung 81: FS1_V_It - zweiter Probenkörper mit etwas mehr sichtbaren Lufteinschlüssen	108
Abbildung 82: FS1_V_hges - halb gesättigt eingebaute FS1-Mischung vor der moderaten Verdichtung	109
Abbildung 83: FS1_V_hges - deutliche Setzungen der halb gesättigt eingebauten FS1-Mischung nach der moderaten Verdichtung	109
Abbildung 84: FS1_V_hges - sichtbare Lufteinschlüsse nach Ausbau der Probe	110
Abbildung 85: FS1_V_ges - gesättigt eingebaute FS1-Mischung vor der Verdichtung	110
Abbildung 86: FS1_V_ges - gesättigt eingebaute FS1-Mischung nach moderater Verdichtung	111
Abbildung 87: FS1_V_ges – erster Probenkörper der gesättigt eingebauten FS1-Mischung mit moderater Verdichtung nach dem Ausbau mit sichtbaren Lufteinschlüssen	111
Abbildung 88: FS1_V_ges - zweiter Probenkörper der gesättigt eingebauten FS1-Mischung mit moderater Verdichtung nach dem Ausbau mit sichtbaren Lufteinschlüssen	111
Abbildung 89: FS1_SCHLÄMM - Probenzylinder direkt nach dem „Durchschlammvorgang“ mit aufschwimmender Pflanzenkohle	112
Abbildung 90: FS1_SCHLÄMM - Probenzylinder der „durchgeschlammten“ FS1-Mischung während des Sättigungsvorgangs	113
Abbildung 91: FS1_SCHLÄMM - Schichtenbildung im Probenkörper entstanden durch den „Durchschlammvorgang“	113
Abbildung 92: FS1_SCHLÄMM - Schichtenbildung einer weiteren Probe der „durchgeschlammte“ eingebauten FS1-Mischung	113
Abbildung 93: FS2_UV_It - Hebungen der lufttrockenen FS2-Mischung während des Sättigungsvorgangs	114
Abbildung 94: FS2_UV_It - lufttrocken eingebaute FS2-Mischung nach Ausbau aus dem Probenzylinder	114
Abbildung 95: FS2_UV_hges - FS2 halb gesättigt direkt nach dem Einbau	115
Abbildung 96: FS2_UV_hges - deutliche Setzungen von FS2_hges im Zuge der Sättigung	115
Abbildung 97: FS2_UV_hges - deutliche Verfärbung des austretenden Wassers bei Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit	116
Abbildung 98: FS2_UV_hges – Probe nach dem Ausbau aus dem Probenzylinder	116
Abbildung 99: FS2_UV_ges - FS2-Mischung gesättigt direkt nach dem Einbau	117
Abbildung 100: FS2_UV_ges - FS2-Mischung gesättigt eingebaut nach Bestimmung der FK	117
Abbildung 101: FS2_UV_ges - klares austretendes Wasser bei Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit bei gesättigt eingebauter Feinsubstratmischung FS2	118

Abbildung 102: FS2_UV_ges - gesättigt eingebaute FS2-Mischung direkt nach dem Ausbau aus dem Probenzylinder	118
Abbildung 103: FS2_UV_üges – Probe nach dem Einbau	119
Abbildung 104: FS2_UV_üges - leicht verfärbtes Wasser bei Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit	120
Abbildung 105: FS2_UV_üges - übersättigt eingebaute FS2-Mischung nach dem Ausbau aus dem Probenzylinder.....	120
Abbildung 106: FS2_V_lt - Setzungen der lufttrocken eingebauten FS2-Mischung nach moderater Verdichtung.....	121
Abbildung 107: FS2_V_hges - halb gesättigt eingebaute FS2-Mischung vor dem Verdichten.....	122
Abbildung 108: FS2_V_hges - deutliche Setzungen der halb gesättigt eingebauten FS2-Mischung nach moderater Verdichtung	122
Abbildung 109: FS2_V_hges - Auflösungserscheinungen des Faltenfilters nach Bestimmung der FK	123
Abbildung 110: FS2_V_hges - halb gesättigt eingebaute und moderat verdichtete FS2-Mischung nach dem Ausbau	123
Abbildung 111: FS2_V_ges - gesättigt eingebaute FS2-Mischung vor dem Verdichten.....	124
Abbildung 112: FS2_V_ges - Spaltenbildung zwischen Zylinderinnenwand und Probenkörper nach moderater Verdichtung	124
Abbildung 113: FS2_V_ges - Rissbildung des Faltenfilters nach Bestimmung der FK	125
Abbildung 114: FS2_V_ges – erster ausgebauter Probenkörper mit stellenweise sichtbaren Lufteinschlüssen.....	125
Abbildung 115: FS2_V_ges - zweiter ausgebauter Probenkörper mit sichtbaren Lufteinschlüssen ..	125
Abbildung 116: FS1_25 - Bestimmung des Grobschlag-Porenvolumens.....	126
Abbildung 117: FS1_25 - Zustand einer Probe direkt nach dem Einschlämmen mit deutlich sichtbarem Feinsubstrat an der Oberfläche	127
Abbildung 118: FS1_25 - Unterseite einer mit 25 Vol.-% FS1 eingeschlämmten Probe.....	127
Abbildung 119: FS1_25 - Erkennbare Schichtenbildung beim Probenausbau.....	128
Abbildung 120: FS1_25 – weitere sichtbare Schichtenbildung beim Probenausbau	128
Abbildung 121: FS1_25 - Schichtenbildung im unteren Bereich einer ausgebauten Probe, einige nicht mit Feinsubstrat gefüllte Bereiche in der Mitte und höherer Kohleanteil im oberen Bereich	129
Abbildung 122: FS1_25 - Hohlraum mit sandigem Material im unteren Bereich und größeren Kohlepartikeln im oberen Bereich	129
Abbildung 123: FS1_25 - größere Bereiche ohne Feinsubstrat	129
Abbildung 124: FS1_25 - augenscheinlich dichtes Feinsubstrat im unteren Bereich einer Probe mit größeren Hohlräumen dazwischen.....	130
Abbildung 125: FS1_20 - eine Probe nach dem Einschlämmen von 20 Vol.-% der FS1-Mischung.....	131
Abbildung 126: FS1_20 - Probenunterseite bei 20 Vol.-% Feinsubstrat.....	131
Abbildung 127: FS1_20 - erkennbare Schichtenbildung sowie Hohlräume ohne Feinsubstrat beim Probenausbau	131
Abbildung 128: FS1_20 - größere Bereiche ohne Feinsubstrat	132
Abbildung 129: FS1_20 - Bereiche mit reichlich Feinsubstrat mit teilweiser Schichtenbildung, sowie Hohlräume mit ausschließlich größeren Kohlepartikeln	132
Abbildung 130: FS1_15 - kaum sichtbares Feinsubstrat an der Substratoberfläche nach dem Einschlammvorgang.....	133
Abbildung 131: FS1_15 - Unterseite einer mit 15 Vol.-% eingeschlämmten Probe	134
Abbildung 132: FS1_15 - zum Teil große Hohlräume ohne Feinsubstrat	134
Abbildung 133: FS1_15 - zum Teil Bereiche mit reichlich eingeschlammtem Feinsubstrat im unteren Teil eines Probenkörpers	134
Abbildung 134: FS2_15 – eine Probe nach dem Einfüllen der lufttrockenen FS2-Mischung	135
Abbildung 135: FS2_15 - Einschlämmen mittels Brausekopfs.....	136

Abbildung 136: FS2_15 - Wasserrückstau nach den Einschlammvorgängen	136
Abbildung 137: FS2_15 - Probenoberfläche nach dem Einschlamm	137
Abbildung 138: FS2_15 - Unterseite des mit Feinsubstratmischung FS2 eingeschlammten Schwammstadtsubstrats.....	137
Abbildung 139: FS2_15 - Erkennbare Schichtenbildung mit unterschiedlicher Partikelgröße.....	138
Abbildung 140: FS2_15 - große Bereiche ohne Feinsubstrat.....	138
Abbildung 141: FS2_15 - Bereiche im Probenkörper mit mehr Feinsubstrat.....	138

Tabelle 1: Charakterisierung der Porengrößenbereiche mit Hilfe des Porendurchmessers in μm und des Matrixpotenzials als Wassersäule in cm und als pF-Wert (siehe Kapitel 4.5.3) (Scheffer et al., 1984, S. 131)	26
Tabelle 2: Porenvolumina und volumetrische Anteile von Porengrößenbereichen bezogen auf mineralische und organische Böden (Scheffer et al., 1984, S. 132)	27
Tabelle 3: Gesättigte Wasserleitfähigkeit unterschiedlicher Bodenarten (Scheffer et al., 1984, S. 163)	29
Tabelle 4: Mittlere Luftvolumina bei Feldkapazität verschiedener Bodenarten (Scheffer et al., 1984, S. 185)	30
Tabelle 5: Ablauf Schüttversuch	38
Tabelle 6: Ablauf Schlammversuch	43
Tabelle 7: Zur Probenherstellung verwendete Einbau-Wasseranteile der untersuchten Feinsubstratmischungen.....	53
Tabelle 8: Matrixpotenziale der Schlammversuch-Proben im Zustand der FK.....	61
Tabelle 9: Ergebnisse Schüttversuche (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen).....	62
Tabelle 10: Ergebnisse der zusätzlichen Schüttversuche (Mittelwerte aus je 2 Wiederholungen beziehungsweise bei FS1_SCHLÄMM 3 Wiederholungen mit Standardabweichung)	62
Tabelle 11: Ergebnisse Schlammversuche (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Standardabweichung).....	67
Tabelle 12: Vergleich der Feldkapazität zwischen Schütt- und Schlammversuch anhand der FS1-Mischung.....	71
Tabelle 13: Vergleich der Variante FS1_25 des Schwammstadtsubstrats für Stadtbäume mit Untersuchungen zum „CU-Structural Soil®“ nach Grabosky et al. (2009)	82

Abkürzungsverzeichnis

BAW	Bundesamt für Wasserwirtschaft
FK	Feldkapazität
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.
FS1	Feinsubstratmischung 1
FS2	Feinsubstratmischung 2
ges	gesättigt
GPV	Gesamtporenvolumen
hges	halb gesättigt
IKT	Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt
LK	Luftkapazität
lt	lufttrocken
nFK	nutzbare Feldkapazität
SCHLÄMM	durchgeschlämmt
UV	unverdichtet
üges	übersättigt
V	moderat verdichtet
WK	Wasserkapazität

Anhang A: Hydrologische Kennwerte der einzelnen Versuchsläufe

Laborversuch		Schüttversuche																							
Feinsubstratmischung		FS1												FS2											
Einbau-Methodik		UV						V						UV						V					
Einbau-Wasseranteil		It	It	hges	hges	ges	ges	It	It	hges	hges	ges	ges	It	It	hges	hges	ges	ges	It	It	hges	hges	ges	ges
Probe		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Trockenrohichte nach FK in g/cm³		1,52	1,54	1,63	1,54	1,66	1,71	1,70	1,69	1,49	1,45	1,69	1,70	0,47	0,48	0,42	0,42	0,49	0,49	0,48	0,46	0,44	0,39	0,39	0,39
GPV nach FK in Vol.-%		34	32	29	30	30	35	31	31	34	32	31	30	67	67	66	64	64	57	67	67	70	69	60	61
WK 2h nach FK in Vol.-%		/	/	/	/	/	/	28	28	31	30	29	28	/	/	/	/	/	/	63	61	66	65	56	58
LK im Zustand der WK 2h in Vol.-%		/	/	/	/	/	/	2	3	3	2	2	2	/	/	/	/	/	/	4	6	3	4	4	3
FK in Vol.-%		18	17	20	20	25	26	20	20	18	22	24	24	44	46	42	42	52	50	49	45	42	38	42	43
LK im Zustand der FK in Vol.-%		16	14	9	10	6	9	11	11	14	14	9	7	23	21	24	22	12	7	18	22	28	31	17	19
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min		1,1	1,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,5	0,6	0,4	0,5	0,2	0,2	2,7	3,2	1,1	1,0	0,2	0,1	3,2	5,5	4,9	4,6	1,0	0,7

Laborversuch		Zusatz Schüttversuch									
Feinsubstratmischung		FS1					FS2				
Einbau-Methodik		SCHLÄMM					UV				
Einbau-Wasseranteil		/					üges				
Probe		1	2	3	1	2	1	2	1	2	
Trockenrohichte nach FK in g/cm³		1,52	1,59	1,50	1,61	1,66	0,41	0,42			
GPV nach FK in Vol.-%		35	34	32	30	30	66	66			
WK 2h nach FK in Vol.-%		31	31	31	/	/	/	/			
LK im Zustand der WK 2h in Vol.-%		3	3	2	/	/	/	/			
FK in Vol.-%		17	17	16	18	19	40	42			
LK im Zustand der FK in Vol.-%		18	17	16	12	11	26	24			
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min		0,9	0,8	1,1	0,3	0,3	2,8	1,5			

Laborversuch		Schlämmentversuche														
Feinsubstratmischung		FS1					FS2					FS2				
Feinsubstratanteil		25 Vol.-%					20 Vol.-%					15 Vol.-%				
Probe		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Porenvolumen Grobschlag in Vol.-%		44	43	42	43	43	43	43	41	42	/	/	/	/	/	/
Trockenrohichte Grobschlag in g/cm³		1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,57	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58
Trockenrohichte gesamtes Substrat in g/cm³		1,98	1,98	1,98	1,90	1,90	1,89	1,82	1,82	1,82	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,65
GPV in Vol.-%		22	21	23	28	28	27	32	31	31	38	37	38			
WK 2h in Vol.-%		10	10	10	8	8	8	7	7	6	11	13	11			
LK im Zustand der WK 2h in Vol.-%		12	11	13	20	20	19	26	24	25	27	24	27			
FK in Vol.-%		6	6	6	5	5	5	4	4	4	9	9	10			
LK im Zustand der FK in Vol.-%		16	15	17	23	23	22	28	26	28	29	28	28			
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in mm/min		14,4	20,3	23,5	26,5	24,0	23,3	40,1	41,7	25,4	14,1	9,8	13,4			

Anhang B: Protokolle der einzelnen Versuchsläufe

Schüttversuche

FS1_UV_It

Erkenntnisse: Es traten im Versuchsablauf keine nennenswerten Probleme auf, weshalb von repräsentativen Ergebnissen ausgegangen werden kann.

Praktikabilität: Die Untersuchung der lufttrocken eingefüllten Feinsubstratmischung FS1 eignet sich gut als mögliche Standardvariante für den Schüttversuch.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 0,3 cm (Probe 1) und 0,2 cm (Probe 2)



Abbildung 69: FS1_UV_It - lufttrockener Einbau der FS1-Mischung



Abbildung 70: FS1_UV_It - sättigen der lufttrocken eingebauten Proben

FS1_UV_hges

Erkenntnisse: Die Untersuchung der mit halbem Sättigungswasseranteil eingefüllten Feinsubstratmischung FS1 erwies sich als problematisch. Dieser Einbau-Wasseranteil erzeugte in Folge des manuellen Rührens instabile Substratverhältnisse, die sich bereits beim ersten Sättigungsvorgang nach dem Einbau zeigten. Es traten deutliche Setzungen und Rissbildungen auf (siehe Abbildung 73).

Praktikabilität: Die Untersuchung der Mischung FS1 erweist sich mit halb gesättigtem Einbau-Wasseranteil als unpraktikabel.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 4,6 cm (Probe 1) und 3,9 cm (Probe 2)



Abbildung 71: FS1_UV_hges - halb gesättigte Feinsubstratmischung FS1 vor dem Einbau



Abbildung 72: FS1_UV_hges - halb gesättigte Mischung FS1 nach dem Einbau



Abbildung 73: FS1_UV_hges - deutliche Setzungen und Risse der halb gesättigt eingebauten FS1-Mischung nach dem Sättigungsvorgang

FS1_UV_ges

Erkenntnisse: Bei der Untersuchung der gesättigten FS1-Mischung traten keine Probleme auf, weshalb die Ergebnisse als repräsentativ angesehen werden können.

Praktikabilität: Dieser Einbau-Wasseranteil eignet sich neben der lufttrockenen Variante gut zur Durchführung des Schüttversuchs und kann als Standardvariante angewandt werden.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 0,4 cm (Probe 1) und 0,8 cm (Probe 2)



Abbildung 74: FS1_UV_ges - FS1 gesättigt vor dem Einbau in die Probenzylinder



Abbildung 75: FS1_UV_ges - Einbau der gesättigten FS1-Mischung

FS1_UV_üges

Erkenntnisse: Bei Untersuchung der übersättigt eingebauten Variante der Feinsubstratmischung FS1 kam es beim Einbau zu einem Anstau von Wasser im Probenzylinder (siehe Abbildung 77). Dieser gezielt herbeigeführte Effekt führte zum Aufschwimmen von organischen Bestandteilen (siehe Abbildung 78) und damit zu einer teilweisen Entmischung des Feinsubstrats. Dabei konnte untersucht werden, ob die Entmischung beziehungsweise die Schicht Kompostkohle an der Substratoberfläche einen Einfluss auf die untersuchten Parameter hat.

Praktikabilität: Für diese spezifische Fragestellung eignet sich die Variante gut, für die allgemeine Untersuchung des Feinsubstrats ist der Einbau aufgrund des überschüssigen Wassers unpraktikabler als die lufttrockene und gesättigte Variante.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 1,2 cm (Probe 1) und 0,8 cm (Probe 2)



Abbildung 76: FS1_UV_üges - übersättigte FS1-Mischung vor dem Einbau



Abbildung 77: FS1_UV_üges - übersättigte FS1-Mischung direkt nach dem Einbau



Abbildung 78: FS1_UV_üges - oberflächige Ansammlung der organischen Komponenten bei der übersättigten Variante

FS1_V_It

Erkenntnisse: Die Ergebnisse zeigen, dass die moderate Verdichtungsmethodik auf die Eigenschaften der lufttrockenen Mischung FS1, verglichen mit den anderen Einbau-Wasseranteilen, den größten Einfluss hatte. Außerdem waren die Setzungen der lufttrocken eingebauten und verdichteten Proben (siehe Abbildung 79) größer als jene Setzungen, welche aufgrund der Sättigungsvorgänge und Feldkapazitätsbestimmung bei FS1_UV_It auftraten. Nach dem Ausbau der Proben waren von außen wenige kleinere Lufteinschlüsse im Substrat sichtbar (siehe Abbildung 80 und Abbildung 81).

Praktikabilität: Die Durchführung der moderaten Verdichtung durch definiertes Fallenlassen (fünf Mal aus 5 cm Höhe) erweist sich für die lufttrockene FS1-Mischung als praktikabel, da eine Verdichtung erreicht wurde, ohne die Probe durch Entmischung zu zerstören. Bei Fallenlassen aus größerer Höhe beziehungsweise bei öfterer Wiederholung kann es beim lufttrockenem Feinsubstrat jedoch zum „Paranusseneffekt“ und folglich zur Entmischung kommen. Dabei sinken die Feinteile des Substrats ab, während größere Bestandteile an die Substratoberfläche transportiert werden. Dies konnte nach rein visueller Beobachtung beim fünfmaligen Fallenlassen aus 5 cm Höhe nicht festgestellt werden. Durch die moderate Verdichtung erreichte die lufttrockene FS1-Mischung einen stabilen Zustand, weshalb es nach den Verdichtungsverfahren zu keinen weiteren Setzungen kam.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 1,1 cm (Probe 1) und 1,3 cm (Probe 2)



Abbildung 79: FS1_V_It - Setzungen der lufttrocken eingebauten FS1-Mischung nach moderater Verdichtung



Abbildung 80: FS1_V_It - Probenkörper nach dem Ausbau mit wenigen sichtbaren Lufteinschlüssen



Abbildung 81: FS1_V_It - zweiter Probenkörper mit etwas mehr sichtbaren Lufteinschlüssen

FS1_V_hges

Erkenntnisse: Bei jener Variante traten wie bei FS1_UV_hges deutliche Setzungen auf (siehe Abbildung 82 und Abbildung 83), die in diesem Fall durch die moderate Verdichtungsmethodik entstanden. Nach dem Ausbau der Proben waren einige Lufteinschlüsse erkennbar (siehe Abbildung 84).

Praktikabilität: Die moderate Verdichtungsmethodik eignet sich aufgrund der instabilen Substratverhältnisse der halb gesättigten FS1-Mischung nicht, um zu repräsentativen Ergebnissen zu gelangen. Es traten bei dieser Variante rasch Risse beziehungsweise Spalten am Substratrand auf, was zu einer Verfälschung der Ergebnisse führte, wie beispielsweise zu einer erhöhte gesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Vergleich zu der unverdichteten Variante.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 4,8 cm (Probe 1) und 4,8 cm (Probe 2)



Abbildung 82: FS1_V_hges - halb gesättigt eingebaute FS1-Mischung vor der moderaten Verdichtung



Abbildung 83: FS1_V_hges - deutliche Setzungen der halb gesättigt eingebauten FS1-Mischung nach der moderaten Verdichtung



Abbildung 84: FS1_V_hges - sichtbare Lufteinschlüsse nach Ausbau der Probe

FS1_V_ges

Erkenntnisse: Im Zuge der moderaten Verdichtung kam es zu Setzungen und einem temporären Anstau von Wasser an der Substratoberfläche (siehe Abbildung 85 und Abbildung 86). Nach dem Ausbau der Proben waren einige Lufteinschlüsse ersichtlich (siehe Abbildung 87 und Abbildung 88).

Praktikabilität: Die moderate Verdichtung in Kombination mit der gesättigt eingebauten FS1-Mischung erweist sich als praktikabel, wenngleich die Ergebnisse zwischen FS1_UV_ges und FS1_V_ges ähnlich sind. Dennoch erreichte die FS1-Mischung durch das Fallenlassen einen stabilen Zustand, da keine weiteren Setzungen im Zuge der Versuchsdurchführung auftraten.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 1,5 cm (Probe 1) und 1,4 cm (Probe 2)



Abbildung 85: FS1_V_ges - gesättigt eingebaute FS1-Mischung vor der Verdichtung



Abbildung 86: FS1_V_ges - gesättigt eingebaute FS1-Mischung nach moderater Verdichtung



Abbildung 87: FS1_V_ges – erster Probenkörper der gesättigt eingebauten FS1-Mischung mit moderater Verdichtung nach dem Ausbau mit sichtbaren Lufteinschlüssen



Abbildung 88: FS1_V_ges - zweiter Probenkörper der gesättigt eingebauten FS1-Mischung mit moderater Verdichtung nach dem Ausbau mit sichtbaren Lufteinschlüssen

FS1_SCHLÄMM

Erkenntnisse: Beim Ausbau der Probenkörper war eine horizontale Schichtenbildung erkennbar (siehe Abbildung 91 und Abbildung 92). Diese entstand durch den „Durchschlammvorgang“, wobei zu Beginn etwas lufttrockenes Substrat in die Probenzylinder fiel und anschließend Substrat mit einer unbestimmten Menge Wasser in die Zylinder gespült wurde. Dies bedingte einen Wasserrückstau im Zylinder und somit einen Entmischungsvorgang durch aufschwimmende organischen Bestandteile (siehe Abbildung 89 und Abbildung 90), ähnlich wie bei FS1_UV_üges. Anschließend wurde zugewartet bis das überschüssige Wasser aus dem Zylinder gesickert ist, um danach wieder Substrat „durchzuschlämmen“. Die mehrmalige Wiederholung dieses Vorgangs erzeugte die Schichtung. Diese Einbaumethodik schuf einen stabilen Zustand der FS1-Mischung, da durch die folgende Untersuchung der Proben keine weiteren Setzungen mehr auftraten.

Praktikabilität: Prinzipiell lässt sich die Durchführung dieser Einbau-Variante reproduzieren, jedoch bedingt der Aufbau des Grobschlags und die dadurch entstehenden präferentiellen Fließwege Unterschiede in der Füllung der Probenzylinder mit Feinsubstrat. Der erhöhte Material- und Zeitaufwand führt zur Einstufung dieser Methodik als eher unpraktikabel.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 1,0 cm (Probe 1), 0,5 cm (Probe 2) und 1,3 cm (Probe 3)



Abbildung 89: FS1_SCHLÄMM - Probenzylinder direkt nach dem „Durchschlammvorgang“ mit aufschwimmender Pflanzenkohle



Abbildung 90: FS1_SCHLÄMM - Probenzylinder der „durchgeschlämmten“ FS1-Mischung während des Sättigungsvorgangs



Abbildung 91: FS1_SCHLÄMM - Schichtenbildung im Probenkörper entstanden durch den „Durchschlammvorgang“



Abbildung 92: FS1_SCHLÄMM - Schichtenbildung einer weiteren Probe der „durchgeschlämmt“ eingebauten FS1-Mischung

FS2_UV_It

Erkenntnisse: Die augenscheinlich hydrophoben Eigenschaften der Kompostkohle sorgten dafür, dass der erste Sättigungsvorgang sehr lange dauerte. Weiters waren ein Aufschwimmen der Bestandteile und somit eine Hebung des Substrats im Probenzylinder zu beobachten (siehe Abbildung 93). Es wurde bei Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit eine stetige Abnahme der Messwerte beobachtet. Das dabei austretende Wasser war durch ausgeschwemmte feine Kohlepartikel stark schwarz verfärbt. Diese Verlagerung von feinen Kohlepartikeln war vermutlich auch für die abnehmende hydraulische Leitfähigkeit verantwortlich. Beim Ausbau der Probenkörper war äußerlich eine Ansammlung der Feinteile im unteren Bereich der Probe erkennbar (siehe Abbildung 94).

Praktikabilität: Aufgrund der Hebungen sowie der stetig abnehmenden gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit erweist sich die lufttrockene Untersuchung der Feinsubstratmischung FS2 als unpraktikabel.

Hebungen nach Bestimmung der FK: 0,4 cm (Probe 1) und 0,4 cm (Probe 2)



Abbildung 93: FS2_UV_It - Hebungen der lufttrockenen FS2-Mischung während des Sättigungsvorgangs



Abbildung 94: FS2_UV_It - lufttrocken eingebaute FS2-Mischung nach Ausbau aus dem Probenzylinder

FS2_UV_hges

Erkenntnisse: Wie bei Feinsubstratmischung FS1 traten bei halb gesättigt eingebauter FS2-Mischung bereits im Zuge der ersten Sättigung starke Setzungen auf (siehe Abbildung 95 und Abbildung 96). Weiters nahm die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit während den Messungen stetig ab und das austretende Wasser war deutlich schwarz verfärbt (siehe Abbildung 97) (siehe FS2_UV_It).

Praktikabilität: Aufgrund der instabilen Substratverhältnisse mit deutlichen Setzungen sowie einer inkonstanten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ist die Untersuchung der Feinsubstratmischung FS2 mit halber Sättigung unpraktikabel.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 3,8 cm (Probe 1) und 4,0 cm (Probe 2)



Abbildung 95: FS2_UV_hges - FS2 halb gesättigt direkt nach dem Einbau



Abbildung 96: FS2_UV_hges - deutliche Setzungen von FS2_hges im Zuge der Sättigung



Abbildung 97: FS2_UV_hges - deutliche Verfärbung des austretenden Wassers bei Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit



Abbildung 98: FS2_UV_hges – Probe nach dem Ausbau aus dem Probenzylinder

FS2_UV_ges

Erkenntnisse: Die gesättigt eingebaute FS2-Mischung lieferte konstante Messwerte bei Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, außerdem trat klares Wasser dabei aus (siehe Abbildung 101). Ausschwemmung oder Verlagerung feiner Kohlepartikel wurde nicht beobachtet. Auch beim Ausbau der Proben zeigte sich eine homogene Verteilung der feineren organischen Bestandteile mit wenigen Lufteinschlüssen (siehe Abbildung 102).

Praktikabilität: Der wassergesättigte Einbau der Feinsubstratmischung FS2 eignet sich gut für die Untersuchung dieser Feinsubstratmischung mit Hilfe des Schüttversuchs. Es kann von repräsentativen Ergebnissen ausgegangen werden.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 0,6 cm (Probe 1) und 0,3 cm (Probe 2) (siehe Abbildung 99 und Abbildung 100)



Abbildung 99: FS2_UV_ges - FS2-Mischung gesättigt direkt nach dem Einbau



Abbildung 100: FS2_UV_ges - FS2-Mischung gesättigt eingebaut nach Bestimmung der FK



Abbildung 101: FS2_UV_ges - klares austretendes Wasser bei Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit bei gesättigt eingebauter Feinsubstratmischung FS2



Abbildung 102: FS2_UV_ges - gesättigt eingebaute FS2-Mischung direkt nach dem Ausbau aus dem Probenzylinder

FS2_UV_üges

Erkenntnisse: Die Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit lieferte konstante Werte. Das dabei ausgetretene Wasser ist stärker verfärbt als bei FS2_UV_ges, jedoch weniger stark als bei FS2_UV_lt und FS2_UV_hges (siehe Abbildung 104). Die ausgebauten Probenkörper wiesen mehr größere Lufteinschlüsse auf (siehe Abbildung 105), als jene von FS2_UV_ges. Dies erklärt auch die höhere gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und zeigt, dass dieser Einbau-Wasseranteil zu einem weniger dichten Einbau der FS2-Mischung führt.

Praktikabilität: Der Einbau von übersättigter Feinsubstratmischung FS2 war aufgrund des überschüssigen Wassers etwas unpraktikabler als jener bei FS2_UV_ges. Dennoch eignet sich die Variante für die Untersuchung des FS2 mit einer geringeren Trockenrohdichte.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 0,8 cm (Probe 1) und 0,4 cm (Probe 2)



Abbildung 103: FS2_UV_üges – Probe nach dem Einbau



Abbildung 104: FS2_UV_üges - leicht verfärbtes Wasser bei Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit



Abbildung 105: FS2_UV_üges - übersättigt eingebaute FS2-Mischung nach dem Ausbau aus dem Probenzylinder

FS2_V_It

Erkenntnisse: Die lufttrockene FS2-Mischung ließ sich durch die moderate Verdichtungsmethodik ohne Probleme verdichten (siehe Abbildung 106). Problematisch waren, wie bei FS2_UV_It die zeitintensiven Sättigungsvorgänge. Außerdem kippten beide Proben nach Bestimmung der FK gegen die Drucktopfinnenwand, weshalb es zu Spaltenbildung am Substratrand kam. Dies erklärt vermutlich die unerwartet höhere gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, im Vergleich zu FS2_UV_It. Zusätzlich trat bei beiden Proben im Zuge der Leifähigkeitsbestimmung stark schwarz verfärbtes Wasser aus, mit stetiger Abnahme der Messwerte. Dies konnte bereits bei FS2_UV_It festgestellt werden. Ansonsten zeigten sich wenige sichtbare Lufteinschlüsse nach dem Ausbau der Proben.

Praktikabilität: Aufgrund der stetig abnehmenden gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der Auswaschung von feinen Kohlepartikeln wird diese Variante als unpraktikabel eingestuft.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 0,9 cm (Probe 1) und 0,9 cm (Probe 2)



Abbildung 106: FS2_V_It - Setzungen der lufttrocken eingebauten FS2-Mischung nach moderater Verdichtung

FS2_V_hges

Erkenntnisse: Es traten bei halbem Sättigungswasseranteil durch die Verdichtung deutliche Setzungen auf (siehe Abbildung 107 und Abbildung 108). Aufgrund der lange andauernden Bestimmung der FK wurden Auflösungserscheinungen der Faltenfilter festgestellt, weshalb diese zum Teil an der Keramikplatte anhafteten (siehe Abbildung 109). Dies bedingte einen Faltenfiltertausch, wodurch die Proben mehr bewegt wurden als alle anderen Schüttversuchproben und es zur Spaltenbildung am Rand kam. Dies ist vermutlich auch der Grund für die unerwartet höhere gesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Vergleich zu FS2_UV_hges. Außerdem sind Substratverluste sowie im Substrat zurückbleibende Filterstücke durch den Filtertausch wahrscheinlich, weshalb die Repräsentativität der Ergebnisse beeinträchtigt sein könnte. Zusätzlich nahm die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit während der Messung stetig ab und das austretende Wasser war schwarz verfärbt. Beim Ausbau der Proben waren kleinere Lufteinschlüsse zu sehen.

Praktikabilität: Die Untersuchung der Feinsubstratmischung FS2 mit halber Sättigung und anschließender moderater Verdichtung ist als unpraktikabel anzusehen, da instabile Substratverhältnisse und eine stetig abnehmende gesättigte hydraulische Leitfähigkeit auftraten. Zusätzlich dauerte die Bestimmung der FK sehr lange, weshalb es zur Auflösung der Faltenfilter kam.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 4,9 cm (Probe 1) und 4,2 cm (Probe 2)



Abbildung 107: FS2_V_hges - halb gesättigt eingebaute FS2-Mischung vor dem Verdichten



Abbildung 108: FS2_V_hges - deutliche Setzungen der halb gesättigt eingebauten FS2-Mischung nach moderater Verdichtung



Abbildung 109: FS2_V_hges - Auflösungserscheinungen des Faltenfilters nach Bestimmung der FK



Abbildung 110: FS2_V_hges - halb gesättigt eingebaute und moderat verdichtete FS2-Mischung nach dem Ausbau

FS2_V_ges

Erkenntnisse: Bereits nach den Verdichtungsvorgängen ließ sich eine Spaltenbildung zwischen Zylinderinnenwand und Substratrand feststellen (siehe Abbildung 112). Dies führte vermutlich zu der unerwartet höheren gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit als bei FS_UV_ges. Aufgrund der langen Dauer bis zum Erreichen eines Gleichgewichts bei Bestimmung der FK, kam es zu leichten Auflösungserscheinungen der Faltenfilter, welche in Folge wegen einer Rissbildung getauscht werden mussten (siehe Abbildung 113). Dies kann vermutlich zur Verfälschung der Messwerte (siehe FS2_V_hges) beigetragen haben. Beim Probenausbau zeigten sich einige größere Lufteinschlüsse (siehe Abbildung 114 und Abbildung 115). Bei Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit war das austretende Wasser, wie bei FS2_UV_ges klar. Bei Probe 1 kam es zu einem leichten aber stetigen Anstieg der Durchlässigkeitswerte, während die zweite Probe keine Zu- oder Abnahme zeigte.

Praktikabilität: Probe 2 dieser Variante lieferte als einzige Probe der moderat verdichteten FS2-Mischung konstante Werte zur gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Aufgrund der Spaltenbildung durch die Verdichtung selbst und der langen Dauer bei der FK-Bestimmung gilt auch diese Variante als unpraktikabel.

Setzungen nach Bestimmung der FK: 1,5 cm (Probe 1) und 1,7 cm (Probe 2)



Abbildung 111: FS2_V_ges - gesättigt eingebaute FS2-Mischung vor dem Verdichten



Abbildung 112: FS2_V_ges - Spaltenbildung zwischen Zylinderinnenwand und Probenkörper nach moderater Verdichtung



Abbildung 113: FS2_V_ges - Rissbildung des Faltenfilters nach Bestimmung der FK



Abbildung 114: FS2_V_ges – erster ausgebauter Probenkörper mit stellenweise sichtbaren Lufteinschlüssen



Abbildung 115: FS2_V_ges - zweiter ausgebauter Probenkörper mit sichtbaren Lufteinschlüssen

Schlammversuche

FS1_25

Erkenntnisse: Nach dem Einschlämmen war Feinsubstrat zwischen den obersten Steinen des Grobschlags sichtbar (siehe Abbildung 117). Bei der verwendeten Menge von 25 Vol.-% der Feinsubstratmischung FS1 waren augenscheinlich ein Großteil der Hohlräume des Grobschlags ausgefüllt (siehe Abbildung 121), dennoch blieben einige Bereiche ohne Feinsubstrat (siehe Abbildung 123 und Abbildung 124). Die längere Einschlammtdauer im Vergleich zu FS1_20 und FS1_15 ergab sich durch Wartezeiten aufgrund eines mehrmaligen Wasseranstaus. Beim Ausbau der Proben konnte stellenweise eine Schichtenbildung des Feinsubstrats festgestellt werden (siehe Abbildung 119, Abbildung 120 und Abbildung 121). Diese beruht auf der abwechselnden Ansammlung von Schichten mit höheren und niedrigeren Kohleanteilen (siehe Abbildung 120, Abbildung 121 und Abbildung 122), sowie auf Schichten mit größerer und kleinerer Körnung (siehe Abbildung 119). Die Schichten entstehen durch die Einschlammvorgänge beziehungsweise durch das Einfüllen des luftgetrockneten Feinsubstrats. Die genaueren Ursachen sind vermutlich zum einen ein Aufschwimmen der Kohlepartikel im wassergesättigten Zustand (siehe Abbildung 121 und Abbildung 122) und zum anderen die Entmischung der verschiedenen großen Substratbestandteile, indem sich die feineren Partikel weiter unten anlagern, während größere in oberen Bereichen hängen bleiben (siehe Abbildung 119 und Abbildung 124).

Praktikabilität: Trotz der etwas längeren Dauer des Einschlammvorgangs im Vergleich zu FS1_20 und FS1_15 eignen sich 25 Vol.-% der Feinsubstratmischung FS1 sehr gut für die Durchführung des Schlammversuchs. Es traten im Versuchsablauf keine nennenswerten Probleme auf.

Dauer bis zum Eintreten eines Gleichgewichtszustands im Zuge der FK-Bestimmung: 3 Tage (Probe 1), 7 Tage (Probe 2), 3 Tage (Probe 3)



Abbildung 116: FS1_25 - Bestimmung des Grobschlag-Porenvolumens



Abbildung 117: FS1_25 - Zustand einer Probe direkt nach dem Einschlämmen mit deutlich sichtbarem Feinsubstrat an der Oberfläche



Abbildung 118: FS1_25 - Unterseite einer mit 25 Vol.-% FS1 eingeschlämmten Probe



Abbildung 119: FS1_25 - Erkennbare Schichtenbildung beim Probenausbau



Abbildung 120: FS1_25 – weitere sichtbare Schichtenbildung beim Probenausbau



Abbildung 121: FS1_25 - Schichtenbildung im unteren Bereich einer ausgebauten Probe, einige nicht mit Feinsubstrat gefüllte Bereiche in der Mitte und höherer Kohleanteil im oberen Bereich



Abbildung 122: FS1_25 - Hohlraum mit sandigem Material im unteren Bereich und größeren Kohlepartikeln im oberen Bereich



Abbildung 123: FS1_25 - größere Bereiche ohne Feinsubstrat



Abbildung 124: FS1_25 - augenscheinlich dichtes Feinsubstrat im unteren Bereich einer Probe mit größeren Hohlräumen dazwischen

FS1_20

Erkenntnisse: An der Substratoberfläche war weniger Feinsubstrat zu sehen (siehe Abbildung 125) als bei FS1_25. Außerdem war das Einschlämmen erwartungsgemäß einfacher und von kürzerer Dauer. Schichtenbildungen sowie Hohlräume ohne Feinsubstrat wurden beim Probenausbau ebenfalls festgestellt (siehe Abbildung 127, Abbildung 128 und Abbildung 129). In der Abbildung 129 ist ein Hohlraum ersichtlich, in dem sich ausschließlich größere Kohlepartikel abgelagert haben.

Praktikabilität: Das Einbringen und Untersuchen der FS1-Mischung mit 20 Vol.-% erweist sich ebenfalls als praktikabel. Durch die geringere Menge an Feinsubstrat an der Substratoberfläche, wurde gezielt eine kleine Menge zusätzliches Feinsubstrat zur Tensiometerinstallation eingebracht. Dennoch blieben die gemessenen Wasserspannungen etwas unter den zu erwartenden Werten (siehe Tabelle 8), was an einem nicht gänzlich zusammenhängenden Feinsubstrat liegen könnte.

Dauer bis zum Eintreten eines Gleichgewichtszustands im Zuge der FK-Bestimmung: 5 Tage (Probe 1), 6 Tage (Probe 2), 5 Tage (Probe 3)



Abbildung 125: FS1_20 - eine Probe nach dem Einschlämmen von 20 Vol.-% der FS1-Mischung



Abbildung 126: FS1_20 - Probenunterseite bei 20 Vol.-% Feinsubstrat



Abbildung 127: FS1_20 - erkennbare Schichtenbildung sowie Hohlräume ohne Feinsubstrat beim Probenausbau



Abbildung 128: FS1_20 - größere Bereiche ohne Feinsubstrat



Abbildung 129: FS1_20 - Bereiche mit reichlich Feinsubstrat mit teilweiser Schichtenbildung, sowie Hohlräume mit ausschließlich größeren Kohlepartikeln

FS1_15

Erkenntnisse: Bei Verwendung von 15 Vol.-% der FS1-Mischung war nahezu kein Feinsubstrat an der Substratoberfläche sichtbar (siehe Abbildung 130). Im unteren Bereich des Probenkörpers befand sich mehr Feinsubstrat, wenngleich ebenfalls größere Hohlräume ohne Feinsubstrat erkennbar sind (siehe Abbildung 131, Abbildung 132 und Abbildung 133). Dies zeigt deutlich die inhomogene Verteilung von Feinsubstrat im Probenkörper bei niedrigerem Feinsubstratanteil. Ausschlaggebend ist die Dauer und die Intensität des Einschlämmens, welche die vertikale Verteilung des Feinsubstrats im Probenkörper erheblich beeinflusst. Bei den FS1_15-Proben wurde der Einschlammvorgang mit eher geringer Intensität, das heißt mit einer geringeren Wassermenge pro Wassergabe durchgeführt und war von

kurzer Dauer. Bei vorliegender Variante konnte stellenweise ebenfalls eine Schichtenbildung des Feinsubstrats beobachtet werden (siehe Abbildung 132).

Praktikabilität: Die Verwendung von 15 Vol.-% der FS1-Mischung ist für den Schlammversuch nur bedingt praktikabel. Aufgrund der geringen Menge an Feinsubstrat an der Substratoberfläche stellte die Platzierung der Tensiometer im Feinsubstrat eine Herausforderung dar. Selbst zusätzlich eingebrachtes Feinsubstrat sackte zum Teil nach unten weg. Weiters erreichten die Tensiometer nicht mehr die zu erwartenden Werte (siehe Tabelle 8), weshalb von einem nicht durchgängig zusammenhängenden Feinsubstrat ausgegangen wird. Dennoch ist der Schlammversuch in dieser Variante durchführbar und liefert Ergebnisse und Erkenntnisse. Von der Durchführung mit einem noch geringeren Feinsubstratanteil wird aufgrund beschriebener Probleme abgesehen.

Dauer bis zum Eintreten eines Gleichgewichtszustands im Zuge der FK-Bestimmung: 4 Tage (Probe 1), 4 Tage (Probe 2), 4 Tage (Probe 3)



Abbildung 130: FS1_15 - kaum sichtbares Feinsubstrat an der Substratoberfläche nach dem Einschlammvorgang



Abbildung 131: FS1_15 - Unterseite einer mit 15 Vol.-% eingeschlammten Probe



Abbildung 132: FS1_15 - zum Teil große Hohlräume ohne Feinsubstrat

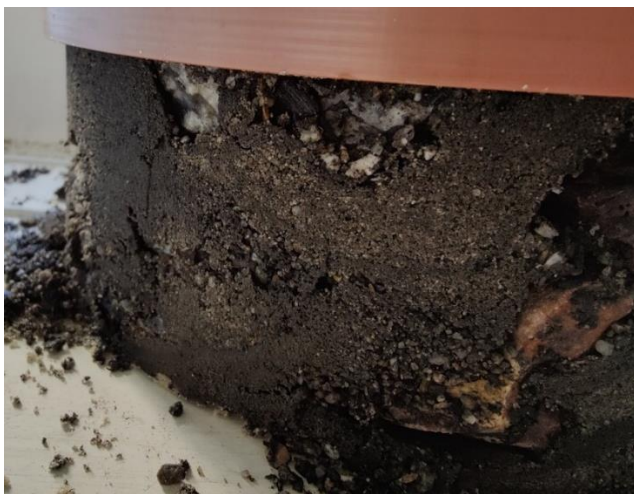


Abbildung 133: FS1_15 - zum Teil Bereiche mit reichlich eingeschlammtem Feinsubstrat im unteren Teil eines Probenkörpers

FS2_15

Erkenntnisse: Beim Einschlämmen der FS2-Mischung zeigte sich, dass der Einsatz von Messbehältern und Spritzflaschen nicht reicht, um die Kompostkohle in die Hohlräume des Grobschlags zu spülen. Aus diesem Grund wurde ein Brausekopf mit Wasseranschluss eingesetzt (siehe Abbildung 135). Durch den höheren Druck konnte das Feinsubstrat eingeschlämt werden, wobei es zwischenzeitlich zu einem Wasseranstau kam (siehe Abbildung 136). Vor allem gegen Ende des Einschlammvorgangs kam es häufiger zu einem länger andauernden Wasserrückstau, der sich ruckartig löste, sobald ein im Feinsubstrat befindlicher Tensiometer-Platzhalter (Kupferdraht) bewegt wurde. Dies lässt auf die Bildung von stauenden Schichten durch die FS2-Mischung schließen. Nach dem Einschlämmen waren vor allem größere Partikel des Feinsubstrats an der Substratoberfläche ersichtlich (siehe Abbildung 137), die aufgrund ihrer Größe nicht in die Hohlräume des Grobschlags gespült werden konnten. An der Probenunterseite waren Partikel mit geringerem Durchmesser erkennbar (siehe Abbildung 138). Nach dem Ausbau der Proben waren Schichten zu erkennen, die sich primär aufgrund ihrer Partikelgröße unterschieden (siehe Abbildung 139). Vor allem die augenscheinlich kompakten Schichten mit feinen Kompostkohlepartikeln hatten vermutlich eine wasserstauende Wirkung. Die ausgebauten Proben zeigten zum Teil sehr große Bereiche ohne Feinsubstrat (siehe Abbildung 140) und Bereiche mit deutlich mehr Feinsubstrat (siehe Abbildung 141).

Praktikabilität: Die Untersuchung des Schwammstadtsubstrats bei Verwendung der FS2-Mischung erweist sich als schwieriger als jene mit FS1. Vor allem das Einschlämmen der reinen Kompostkohle stellte sich als diffizil heraus. Die Gründe hierfür liegen unter anderem an dem Aufschwimmen der Bestandteile sowie an der Bildung von stauenden Schichten. Die gemessenen Wasserspannungen im Zuge der FK-Bestimmung lagen außerdem deutlich unter den zu erwartenden Werten (siehe Tabelle 8).

Dauer bis zum Eintreten eines Gleichgewichtszustands im Zuge der FK-Bestimmung: 6 Tage (Probe 1), 10 Tage (Probe 2), 4 Tage (Probe 3)



Abbildung 134: FS2_15 – eine Probe nach dem Einfüllen der lufttrockenen FS2-Mischung



Abbildung 135: FS2_15 - Einschlämmen mittels Brausekopfs



Abbildung 136: FS2_15 - Wasserrückstau nach den Einschlämmvorgängen



Abbildung 137: FS2_15 - Probenoberfläche nach dem Einschlämmen



Abbildung 138: FS2_15 - Unterseite des mit Feinsubstratmischung FS2 eingeschlämmten Schwammstadtsubstrats



Abbildung 139: FS2_15 - Erkennbare Schichtenbildung mit unterschiedlicher Partikelgröße



Abbildung 140: FS2_15 - große Bereiche ohne Feinsubstrat



Abbildung 141: FS2_15 - Bereiche im Probenkörper mit mehr Feinsubstrat