



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

Dissertation

VON EVAPOTRANSPIRATION BIS TECHNISCHE SUBSTRATE – ALTERNATIVE LÖSUNGEN FÜR NACHHALTIGES REGENWASSERMANAGEMENT

verfasst von

DI Oliver WEISS, MBA

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Bodenkultur (Dr.nat.techn.)

Wien, November 2021

Betreut von:

Priv.-Doz. DI Dr. Ulrike Pitha

Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Danksagung

Mein herzlicher Dank geht in erster Linie an Priv.-Doz. DI Dr. Ulrike Pitha, aufgrund der stets hervorragenden Zusammenarbeit im Rahmen meiner beruflichen Tätigkeit an der Universität für Bodenkultur Wien.

Vielen Dank an alle meine Kolleginnen und Kollegen die mich im Rahmen meiner Dissertation immer wieder aufs Neue motivieren konnten. Allen voran möchte ich dabei vor allem DI Pia Minixhofer danken.

Großen Dank an Mona Hämmerle, BSc für das ausführliche Korrekturlesen meiner Dissertation.

Vielen Dank an meine Eltern und Freunde für die Unterstützung während meines gesamten Lebens, ohne die meine bisherige Laufbahn mit Sicherheit nicht in diesem Ausmaß möglich gewesen wäre.

Last but not least, vielen Dank für die Unterstützung der Projektpartnerinnen und -partner während verschiedenster Projektzusammensetzungen.

Schlussendlich ein Dankeschön für die Begutachtung der vorgelegten Dissertation.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Datum, Ort

DI Oliver Weiss, MBA (eigenhändig)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen einer kumulativen Dissertation angefertigt und setzt sich demnach aus mehreren Publikationen zusammen. Im ersten Teil der Dissertation werden die gewonnenen Erkenntnisse dargestellt, im zweiten Teil werden die veröffentlichten Publikationen im Drucklayout angeführt. Die ersten beiden Publikationen wurden auf keiner Projektbasis verfasst, die Dritte entstand im Rahmen des Projektes SAVE – „Straßen Abwasserlösungen für Vegetation und Entwässerungssysteme“ (gefördert von Wien Kanal - WKN und MA 48). Insgesamt bilden drei Publikationen den Rahmen dieser Dissertation.

Abstract

Due to increasing urbanization, sealing and the increasing negative impact of climate change, such as long-lasting dry periods, heat and heavy rainfall events, Green Infrastructure (GI) in cities is becoming more and more important. Due to heavy rainfall events, there is a significant increase in the amount of precipitation occurring in shorter periods of time. Previous standard solutions in the field of stormwater management are not applicable to those challenges.

Therefore, to tackle this problem, engineered soils for GI are investigated considering two features essential for their application within this work: a) the evapotranspiration performance of engineered soils, by creating an equation for the calculation of evapotranspiration is presented; b) the suitability of selected engineered soils in comparison to standard solutions is tested for vegetated seepage troughs.

Within this work it can be demonstrated that previous equations for calculating evapotranspiration are unsuitable for application to engineered soils. These equations only provide correct results if applied under the same conditions they were developed in. By using the presented methodology, a simple equation for an initial estimation of evapotranspiration can be created for any engineered soil with/ without planting. In the application of selected engineered soils in a field test in the seepage trough, clear differences between the previous standard solutions and the engineered soils were found. The reference soils greened with standard turf seed mix cannot be recommended, instead, the newly designed engineered soils in combination with the seed mixes flower turf and flower meadow show the best results in comparison and are suitable for future applications in seepage troughs. These two parts of the work should provide valuable basic knowledge for planners.

Thus, this work provides a new basis for the effective use of engineered soils in stormwater management.

Keywords:

evapotranspiration – green infrastructures – stormwater management – engineered soils – equation for calculating evapotranspiration

Kurzfassung

Durch die zunehmende Verstädterung und Versiegelung, sowie die immer stärker werdenden negativen Auswirkungen des Klimawandels, wie etwa Trockenperioden, Hitze und darauffolgender Starkregen, kommt grüner Infrastruktur (GI) in Städten immer größere Bedeutung zu. Häufigere Starkregenereignissen führen zu einer deutlichen Zunahme der Niederschlagssummen in kürzerer Zeit. Bisherige Standardlösungen im Bereich des Regenwassermanagements, können diese Herausforderungen nicht bewältigen.

Daher werden in dieser Arbeit technische Substrate für GI auf zwei für ihren Einsatz wesentliche Funktionen untersucht: a) die Verdunstungsleistung technischer Substrate, durch Erstellung einer Gleichung zur Berechnung der Evapotranspiration wird dargelegt; b) die Eignung ausgewählter technischer Substrate im Vergleich zu Standardlösungen wird für begrünte Sickermulden geprüft.

Es kann klar gezeigt werden, dass bisherige Gleichungen zur Berechnung der Verdunstung für eine Anwendung an technischen Substraten ungeeignet sind. Da diese nur korrekte Ergebnisse liefern, wenn sie unter jenen Bedingungen angewendet werden, unter denen sie entwickelt wurden. Durch Verwendung der präsentierten Methode, kann für jedes technische Substrat mit bzw. ohne Bepflanzung eine einfache Gleichung für eine Ersteinschätzung der Evapotranspiration geschaffen werden. Im Einsatz ausgewählter technischer Substrate in einem Feldversuch in einer begrünten Sickermulde, konnten klare Unterschiede zwischen den bisherigen Standardlösungen mit Oberboden und den technischen Substraten erkannt werden. Die Standardlösungen, begrünt mit Standardrasen, können nicht empfohlen werden, stattdessen weisen die neu konzipierten technischen Substrate in Kombination mit Blumenrasen und Blumenwiese im Vergleich dazu die besten Ergebnisse auf und eignen sich für zukünftige Anwendungen in Sickermulden.

Diese Arbeit liefert somit neue Grundlagen für einen wirkungsvollen Einsatz von technischen Substraten im Regenwassermanagement.

Schlüsselwörter:

Evapotranspiration – Grüne Infrastrukturen – Regenwassermanagement – Technische Substrate – Verdunstungsgleichung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
2	Zielsetzung und Forschungsfragen	19
3	Übersicht zu verwendetem/r Material und Methode, sowie Versuchsdesign	23
3.1	Erstellung einer Verdunstungsgleichung [P1, P2]	23
3.2	Geotechnisches und vegetationstechnisches Monitoring von Sickermulden [P3]	25
4	Überblick zu den verfassten Publikationen	27
4.1	Inhaltliche Zusammenfassung der verfassten Publikationen	27
4.2	Thematische Zusammenfassung der verfassten Publikationen	30
5	Synthese der erlangten Ergebnisse	31
6	Diskussion und Schlussfolgerung	37
7	Ausblick und Limitationen	41
8	Zusammenfassung – Summary	43
9	Literaturverzeichnis der Rahmenschrift	45
10	Abbildungsverzeichnis der Rahmenschrift	51
11	Publikationen	53
11.1	Publikation 1	53
11.2	Publikation 2	65
11.3	Publikation 3	81
12	Curriculum Vitae	103

1 Einleitung

Durch die Folgen des Klimawandels konnte in den letzten Jahren eine starke Zunahme an Starkregenereignissen, gepaart mit einer höheren Wahrscheinlichkeit an Hitzewellen und langanhaltenden Trockenperioden beobachtet werden (Dankers und Hiederer, 2008; Stoffel, Stephenson und Haywood, 2020; Valipour, Bateni und Jun, 2021). Besonders Städte sind aufgrund des hohen Versiegelungsgrades verstärkt davon betroffen.

Grüne Infrastrukturen, wie beispielsweise begrünte Versickerungsanlagen, bilden dabei einen wesentlichen Beitrag zum urbanen, nachhaltigen Regenwassermanagement und tragen gleichzeitig durch die durch Evapotranspiration entstandene Verdunstungskälte von Pflanzen und Substraten zu einem verbesserten Stadtklima bei (Yang, Lau und Qian, 2010; Uçar, Akay und Bilici, 2020).

Diese dienen außerdem dem Schutz und der Verbesserung der Natur und den natürlichen Prozessen, indem diese sowohl in städtischen als auch ländlichen Gebieten bewusst in die Raumordnung verankert werden. Grüne Infrastrukturen können als ein strategisch geplantes Netzwerk definiert werden, das verschiedenste Ökosystemleistungen erfüllt (Europäische Kommission, 2013). Ein wichtiges Merkmal grüner Infrastrukturen ist die Multifunktionalität: Sie besitzen somit stets mehr als nur eine Funktion und wirken sich zugleich durch Ökosystemleistungen wie Erholungsförderung, Luft- und Wasserreinigung, Kühlung, Überflutungsschutz (uvm.) positiv auf den Menschen und seine Umwelt aus (Europäische Umweltagentur, 2017).

Demnach bildet das nachhaltige Regenwassermanagement einen integralen Bestandteil grüner Infrastruktur. Nachhaltiges Regenwassermanagement beschreibt das Verbleiben des Niederschlagswasser im naturnahen Wasserkreislauf. Regenwasser wird durch Rückhaltung, Verdunstung und Versickerung nicht in die Kanalisation abgeleitet, sondern vor Ort belassen. Als ein wesentliches Element im Bereich des urbanen und nachhaltigen Regenwassermanagements kann hier die Muldenversickerung in Form einer Sickermulde hervorgehoben werden (Grimm *et al.*, 2013).

Obwohl diese Tatsachen hinlänglich bekannt sind, wurde grünen Infrastrukturen in der Stadtplanung lange Zeit nicht die ausreichende Beachtung geschenkt, die zur Erreichung einer klimaresilienten Stadt notwendig gewesen wären (Voigt, Lampert und Breuste, 2009). Traditionell wird ein Großteil des Niederschlagswassers direkt in die Kanalisation abgeleitet, das zu einer Überlastung des städtischen Abwassersystems führt. Im Jahr 2013 wurden in Wien rund 90 % der Kanalkapazitäten für den Abtransport von Niederschlagswasser verbraucht (Grimm *et al.*, 2013). Dadurch kommt es außerdem zu einer starken Beeinflussung des städtischen Wasserkreislaufes. Durch den hohen Versiegelungsgrad und die damit einhergehenden, geringer werdende Infiltrationskapazität urbaner Oberflächen, können in Bezug auf den Wasserkreislauf starke Auswirkungen erkannt werden (Murata und Kawai, 2018). Doch nicht nur der hohe Versiegelungsgrad städtischer Flächen besitzt einen wesentlichen Einfluss auf den urbanen Wasserkreislauf. Im Zuge von Starkregenereignissen wird die Oberflächenstruktur der Böden zerstört und eine Vielzahl von Feinpartikel eingeschlämmt. Es handelt sich dabei um Feinpartikel des Bodens selbst, aber auch um einen intensiven Eintrag externer Feinpartikel, wie Reifenabrieb von Straßen oder Sedimente angrenzender Flächen. Diese bedecken die Bodenoberfläche und verändern so ebenfalls die Bodenstruktur, sodass es zu einer Verdichtung und Verringerung der Infiltrationsleistung sowie einem erhöhten Oberflächenabfluss kommt (Elhaus, 2015; Fohrer *et al.*, 2016). Innerhalb des

ersten Jahres nach Errichtung einer Sickermulde, kann dadurch die höchste Reduktion der Versickerungsleistung dokumentiert werden (Bergman *et al.*, 2011).

Für ein besseres Verständnis der zuvor genannten Herausforderungen sollen nun zunächst die grundlegende Definition und technischen Anforderungen an Sickermulden genannt werden. Sickermulden sind gemäß Austrian Standards als eine Mulde im freien Gelände definiert, in der der zuströmende Oberflächenabfluss in den anstehenden Untergrund versickert (VÖB, 2018). Oberhalb des anstehenden Untergrunds ist eine 30 cm hohe aktive Bodenpassage einzusetzen. Fläche und Tiefe einer Sickermulde werden in Österreich auf Basis der Richtlinien des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV) bestimmt (Austrian Standards, 2013; ÖWAV, 2015; VÖB, 2018). Zusätzlich gilt es zu bedenken, dass eine Sickermulde so zu errichten ist, dass der Wasserstand eine Höhe von 30 cm nicht überschreitet und ein Freibord von 10 cm eingehalten wird (Austrian Standards, 2013; DWA, 2020). Bei einem 1-jährlichen Regenereignis, also ein Regenereignis das statistisch gesehen jedes Jahr einmal auftritt, sollte die Einstaudauer der Sickermulde 24 Stunden nicht übersteigen. Genauso darf ein kf-Wert (Durchlässigkeitsbeiwert der die Versickerungsfähigkeit eines Bodens in m/s angibt) von 1×10^{-5} m/s für den Bereich der aktiven Bodenpassage nicht unterschritten werden (Austrian Standards, 2013). Eine genaue Beschreibung der aktiven Bodenpassage wird in der ÖNORM nicht gegeben, es werden lediglich die unterschiedlichen anwendbaren Bodenfilter beschrieben (Austrian Standards, 2012). Bei einer aktiven Bodenpassage handelt es sich allerdings um einen natürlich gewachsenen humosen Boden (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2017; Amt der Kärntner Landesregierung, 2019).

Um langfristig leistungsfähige und funktionierende Sickermulden zu gewährleisten, sind sorgfältige Planung und Ausführung unabdingbar. Die Sohle der Sickermulde wird von den angrenzenden Böschungen umschlossen. Speziell auf das Verhindern einer Erosion der geneigten Böschungsseiten der Mulde und damit einhergehender Verringerung der Infiltrationsleistung ist größte Sorgfalt zu legen. Diese sollten daher in einem Böschungsverhältnis von 2:3 angelegt werden, um möglichst erosionsstabil zu sein und gleichzeitig eine laufende Pflege zu ermöglichen (Larcher, 2009). Außerdem sollte eine geschlossene, etablierte und vitale Pflanzendecke und eine ausreichende, vor allem oberflächennahe, Durchwurzelung zur Stabilisierung der Bodenschichten erfolgen (Kutschera, 1991; Prosser und Dietrich, 1995; Gyssels und Poesen, 2003).

Neben der Herausforderung der Erosion, führen auch die standardmäßig vorgesehenen Überflutungen der Sickermulde mit einer Anreicherung von Feinanteilen und der einhergehenden Verdichtung, zu einer Verringerung der Infiltrationsleistung (Ekwue und Harrilal, 2010; Bergman *et al.*, 2011; Levine *et al.*, 2021).

Potentiell verunreinigter Abfluss wird traditionellerweise über die Kanalisation abgeleitet oder vor Ort in Rückhaltebecken bzw. Tanks zwischengespeichert (Godyń *et al.*, 2020). Auch hierfür können technische Substrate als Bodenfilter Abhilfe schaffen. Diese müssen in Bezug auf die Reinigungsleistung den Richtlinien der ÖNORM B2506-2 entsprechen, die zwischen technischen und natürlichen Bodenfiltern unterscheidet. Abhängig davon, sind die Hauptindikatoren für eine Eignung als Bodenfilter die Versickerungsleistung, die Bodenzusammensetzung und das Rückhaltevermögen (Austrian Standards, 2012).

Die derzeit in Österreich standardmäßig hauptsächlich errichteten Sickermulden mit natürlichen Bodenfiltern (Oberboden), erscheinen langfristig als nicht praktikabel. Speziell die Gewährleistung einer nachhaltigen Sickerfähigkeit mit einem kf-Wert von über 1×10^{-5} m/s stellt eine große Herausforderung dar. Aus diesen Gründen erscheint eine entsprechende Wahl von

leistungsstarken auf diesen Einsatz speziell abgestimmte Substrate und Aufbauten als besonders wichtig, um ein langfristiges Bestehen von Sickermulden gewährleisten zu können. Korngröße und Strukturstabilität stellen jene Bodenfaktoren dar, die zu einer langfristigen Sicherstellung der Versickerungsleistung wesentlich beitragen (Tejedor, Neris und Jiménez, 2013; Dellantonio, 2017).

Bereits etablierte Versickerungssysteme, beispielsweise Raingardens oder Structural Soils, verwenden (aufbereiteten) Oberboden oder technische Substrate. Trotz der international breiten Anwendung von Raingardens im Bereich des Regenwassermanagements, werden nur selten Daten über Spezifikation und Zusammensetzung der Bodenzusammensetzung publiziert (Ishimatsu *et al.*, 2017). Raingardens werden hauptsächlich unter Verwendung von Oberboden errichtet. Falls erforderlich, werden die gewünschten Eigenschaften unter Beimischung von Sand, Kies oder Kompost erreicht (City of Portland, 2009; Embrén *et al.*, 2009). Unter Oberboden versteht man eine natürliche Bodenschicht, die durch Zusatzstoffe verbessert werden kann (Bernhardt *et al.*, 2016). Im Gegensatz dazu, sind technische Substrate, künstlich konstruierte Materialgemische mit mineralischen und organischen Bestandteilen. Durch Verwendung von Aushubmaterial, Erden, Komposte und durch Beimischung von mineralischen Komponenten in unterschiedlicher Korngröße in Kombination mit Zusatzstoffen (wie zum Beispiel, Zeolith, Perlit oder Blähton) kommt es zu einer Verbesserung der wesentlichen Bodenfunktionen, wie dem Wasserrückhalt, der Wasserspeicherkapazität und der Wasserdurchlässigkeit (Morel, Chenu und Lorenz, 2015; Deeb *et al.*, 2020; Weiss, Minixhofer, Werner, *et al.*, 2021). Technische Substrate zielen darauf ab, über einen langen Zeitraum hinweg eine hohe Wasserdurchlässigkeit aufzuweisen, ohne Abnahme der Infiltrationsrate (Ebrahimian, Wadzuk und Traver, 2019). Die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) definiert Substrate, als Bodenersatzstoffe, die als Pflanzsubstrat verwendet werden und überwiegend aus mineralischen Bestandteilen bestehen, die nach vordefinierten Anforderungen zusammengestellt wurden (FLL, 2010). Die hohe Wasserspeicherfähigkeit dieser technischen Substrate bildet wiederum die Basis dafür, dass Pflanzen die Funktion der Kühlung durch Transpiration wahrnehmen können.

Um positive Effekte auf das Mikroklima durch Transpiration aufrecht erhalten zu können, ist eine ausreichende Wasserversorgung zum Aufrechterhalten der Vitalität der Vegetation Voraussetzung (Zhao *et al.*, 2020). Dabei ist nicht nur ein entsprechender langfristig leistungsfähiger Boden essentiell, sondern auch eine passende resiliente Vegetationsauswahl u.a. hinsichtlich Trockenheit und Belastung. Daher sollten geeignete Saatgutmischungen für den urbanen Raum ausgewählt werden, die neben der hohen Stresstoleranz auch einen Beitrag zum Erhalt und der Erhöhung der Artenvielfalt in Städten leisten können. Hierfür werden Standardrasenmischungen, die lediglich aus wenigen Arten bestehen, gegen artenreiche Blumenrasen- und Blumenwiesenmischungen ausgetauscht (Weiss, Minixhofer, Werner, *et al.*, 2021). Die derzeit verwendeten Standardrasenmischungen bestehen für gewöhnlich nur aus wenigen Arten (Da Silva und Hendry, o.J.). Diese können Insekten folglich kein passendes Nahrungsangebot zur Verfügung stellen. Durch die zunehmende Verstädterung wird so die Pflanzenvielfalt, die den Insekten als Nahrung dienen kann immer geringer. In den vergangenen 27 Jahren sank die Gesamtbiomasse der Insekten um rund drei Viertel, das dazu führte, dass im Jahr 2019 bereits knapp die Hälfte der berücksichtigten Insektenarten vom Aussterben bedroht waren (Hallmann *et al.*, 2017; Sánchez-Bayo und Wyckhuys, 2019; Chemnitz und Gordon, 2020). Um dem vorzubeugen, sollten sämtliche mögliche Flächen in der Stadt für eine Erhöhung der Pflanzenvielfalt und dem Bereitstellen eines Nahrungsangebots für Insekten genutzt werden. Auch Sickeranlagen bieten ein

ausgezeichnetes Anwendungsfeld für artenreichen Blumenrasen- und Blumenwiesenmischungen.

In normativen Regelungen werden zwar, wie anfangs beschrieben, die Versickerungsraten von Sickermulden definiert, es gibt aber keinerlei Informationen über die potenzielle Evapotranspirationsrate und somit deren Auswirkung auf die zuvor genannten Ökosystemleistungen. Um die Evapotranspiration in Sickermulden beispielsweise mit einem natürlichen Bodenfilter zu berechnen, stehen grundsätzlich eine Vielzahl unterschiedlicher Gleichungen zur Berechnung der Verdunstung zur Verfügung (Weiss, 2017; Weiss, Minixhofer, Scharf, *et al.*, 2021). Die bestehenden Gleichungen liefern jedoch nur unter den Bedingungen zu 100 % korrekte Ergebnisse, unter denen diese auch erstellt wurden. Aufgrund der, wie bereits beschrieben, grundlegend unterschiedlichen Eigenschaften zwischen technischen Substraten und natürlich gewachsenen Böden, ist eine Anwendung aufgrund der schlechten Übertragbarkeit nicht möglich (Rana *et al.*, 2012; Valipour, 2012; Morel, Chenu und Lorenz, 2015). Bei einer ausführlichen Recherche im Zuge der Themenfindung dieser Dissertation konnten keine vergleichbaren Veröffentlichungen vorgefunden werden, die sich mit einer einfach anzuwendenden Gleichung zur Berechnung der Evapotranspiration in technischen Substraten auseinandersetzt, wodurch klarer Forschungsbedarf in diesem Gebiet erkannt wurde.

All das in der Einleitung beschriebene theoretische und auch praktische Wissen resultiert überwiegend aus Forschungsergebnissen an natürlich gewachsenen Böden bzw. Oberboden. Diese besitzen im Bereich des nachhaltigen, urbanen Regenwassermanagements noch hohes Verbesserungspotential, um die Bedingungen für ein optimales Pflanzenwachstum sicherzustellen und dabei gleichzeitig die Bodeneigenschaften der Wasserspeicherkapazität, des Porenvolumens, sowie der langfristigen Wasserdurchlässigkeit zu optimieren (Weiss, Minixhofer, Scharf, *et al.*, 2021; Weiss, Minixhofer, Werner, *et al.*, 2021). Technische Substrate unterscheiden sich allerdings, wie bereits erwähnt, grundlegend von natürlichen Böden. So weisen diese maßgebliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Bodenschichtung, Korngrößenverteilung, Korngrößenzusammensetzung, Porenvolumen, sowie hydraulischen und biochemischen Eigenschaften auf (Weiss, Minixhofer, Scharf, *et al.*, 2021).

Aus diesem Grund bilden technische Substratlösungen im Bereich des Regenwassermanagements die Ausgangsbasis für die Forschungsarbeit, die im Rahmen dieser Dissertation präsentiert wird. Aufbauend auf einer Verdunstungsgleichung, die eine Ersteinschätzung zur Höhe der Evapotranspiration ausgewählter technischer Substrate ermöglicht, werden eine Auswahl selbiger technischer Substrate auf deren Funktionstauglichkeit im Bereich des urbanen Regenwassermanagements getestet. Basis für die Erstellung der Verdunstungsgleichung, bieten die bereits 2017 getesteten Methodenansätze (Weiss, 2017), die im Rahmen dieser Arbeit nun für die Erstellung einer Gleichung zur Bestimmung der Evapotranspiration von technischen Substraten für begrünte Sickermulden im Bereich des nachhaltigen Regenwassermanagements herangezogen werden.

Darüber hinaus werden zahlreiche weitere technische Substrate, samt Begrünung mit unterschiedlichen Saatgutmischungen im Rahmen eines Feldversuches auf deren Tauglichkeit für Sickermulden untersucht und mit bisherigen Standardlösungen verglichen. Dazu wurde in Wien eine Pilotanlage installiert, um die Wirksamkeit und Funktionalität der neu entwickelten Substratmischungen zu testen. Ziel der in einer Sickermulde eingebauten technischen Substrate ist es, so viel wie möglich des anfallenden Regenwassers vor Ort zurückzuhalten. Dadurch soll gleichzeitig eine ausreichende Wasserversorgung zur

Aufrechterhaltung einer hohen Vitalität der Vegetation sichergestellt und eine positive Auswirkung auf das Mikroklima erreicht werden. Als Folge davon kommt es während Starkregenereignissen zu einer Entlastung der Kanalisation und einem Beitrag zum Grundwasserschutz aufgrund des Rückhaltevermögens der verwendeten technischen Substrate (Weiss, Minixhofer, Werner, *et al.*, 2021).

Daraus können folgende Kernaussagen als die größten Herausforderungen identifiziert werden, zu deren Bewältigung im nächsten Kapitel Zielsetzung und Forschungsfragen formuliert werden:

- Evapotranspiration ist ein maßgeblicher Prozess, um Urban Heat Islands in Städten vorzubeugen. Es gibt allerdings keine Möglichkeiten, die Verdunstung für technische Substrate zu berechnen. Klassische Verdunstungsgleichungen können nur für natürlich gewachsene Böden akzeptable Ergebnisse liefern.
- Standardmäßige Aufbauten von Sickermulden werden mit natürlichen Böden (Oberboden) als Bodenfilter ausgeführt, die aufgrund ihrer Eigenschaften und im Laufe der Zeit daraus resultierenden verringerten Leistungsfähigkeit als ungeeignet eingestuft werden können. Derzeitige Sickermulden sind meist mit artenarmen Standardrasenmischungen begrünt und erfordern intensive Pflege (Mahd).

2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die erfolgreiche Umwandlung urbaner Gebiete von versiegelten Räumen zu grünen und lebenswerten Flächen erfordert daher eine gründliche Planung und Gestaltung. Die Kenntnis des Wasserbedarfs verschiedener Pflanzenarten für die Transpiration, die Bereitstellung von Wasser und die hydraulischen, sowie geo- und vegetationstechnischen Eigenschaften technischer Substrate im Bereich des nachhaltigen, urbanen Regenwassermanagements sind zentrale Planungsparameter, die hierfür berücksichtigt werden müssen.

Zielsetzung dieser Arbeit ist es demnach, ausgehend von den im vorherigen Kapitel beschriebenen Herausforderungen:

- a) die Vorgehensweise für eine Erstellung einer Gleichung zur Ersteinschätzung der Evapotranspiration technischer Substrate mit bzw. ohne Bepflanzung im Bereich des nachhaltigen Regenwassermanagements darzustellen und gleichzeitig die Unterschiede zu bereits bestehenden Verdunstungsgleichungen aufzuzeigen, und
- b) diese und weitere technische Substrate hinsichtlich ihrer praktischen Eignung in mit unterschiedlichen Saatgutmischungen begrüntem Sickermulden zu untersuchen und in Relation zu den bisherigen Standardlösungen zu setzen, um so Empfehlungen für geeignete Aufbauten liefern zu können.

Diese Zielsetzungen dienen dem Zweck, wertvolle Grundlagen als Anknüpfungspunkte für Planerinnen und Planer zu liefern. Die Möglichkeit einer Berechnung der Verdunstungshöhe liefert eine Aussage darüber, wie viel Wasser durch das technische Substrat und bestimmte Pflanzen an die Umgebung abgegeben wird. Daraus lässt sich das Ausmaß des Beitrags zur Kühlung der umgebenden Luftschichten ableiten. Speziell im innerstädtischen Kontext kann dieses Wissen dazu beitragen, das Auftreten von Urban Heat Islands zu verringern oder gänzlich zu vermeiden. Aber auch im Bereich der Planung von Sickeranlagen kann dieses Wissen zur Einschätzung der Verdunstungsleistung angewandt werden. Damit Planerinnen und Planer auf Alternativen für natürlich gewachsene Böden für einen Einsatz in Sickermulden zurückgreifen können, werden in dieser Dissertation unterschiedliche technische Substrate untersucht und Empfehlungen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit im Bereich des urbanen und nachhaltigen Regenwassermanagement gegeben.

Die Forschungsfragen ergeben sich aus den in der Einleitung beschriebenen Herausforderungen und werden in den drei in dieser Arbeit angeführten Publikationen [1-3] beantwortet. Nachfolgend wird nach jeder Forschungsfrage [FF] in eckiger Klammer diejenige Publikation [P] angegeben, die die jeweilige Forschungsfrage beinhaltet und innerhalb der Veröffentlichung beantwortet.

[FF1] Welche methodische Vorgehensweise ist notwendig, um eine Ersteinschätzung der Evapotranspiration, unter Berücksichtigung variierender durchschnittlicher Lufttemperaturen, von unterschiedlichen technischen Substraten mit und ohne verschiedene Bepflanzungen zu ermöglichen? [P1, P2]

[FF2] Welche Unterschiede können unter Verwendung einer neu entwickelten Gleichung und bereits bestehender Gleichungen zur Bestimmung der Evapotranspiration an technischen Substraten im Bereich des nachhaltigen Regenwassermanagements festgestellt werden? [P2]

[FF3] Wie verhält sich die geotechnische Leistungsfähigkeit der verwendeten technischen Substrate im Vergleich zu den bisherigen Standardlösungen für begrünte Sickermulden? [P3]

[FF4] Welche Vegetationsentwicklung kann bei den drei getesteten Saatgutmischungen auf den ausgewählten technischen Substraten im Vergleich zu den bisherigen Standardlösungen für begrünte Sickermulden erzielt werden? [P3]

[FF5] Welche Kombination/en der getesteten Substrat- und Saatgutmischungen kann bzw. können für zukünftige Anwendungen im Bereich des nachhaltigen Regenwassermanagements in Sickermulden empfohlen werden? [P3]

In nachfolgender Abbildung erfolgt eine Gesamtübersicht zu den Herausforderungen, die im Rahmen der Einleitung identifiziert werden konnten. Zusätzlich werden die daraus abgeleiteten Ziele, samt dazugehörigen Forschungsfragen ([FF1-FF5]) und deren Ergebnissen inklusive relevanter Publikationen ([P1-P3]), kompakt dargestellt.

Herausforderungen:

- Nicht-Vorhandensein an Gleichungen zur Berechnung der Evapotranspiration für technische Substrate, aufgrund der mangelnden Übertragbarkeit klassischer Verdunstungsgleichungen
- Bisherige Standardlösungen für Aufbauten (Substrat und Saatgutmischung) in Sickermulden, können als ungeeignet eingestuft werden

Ziele:

- Entwicklung einer Methode zur Erstellung von Verdunstungsgleichungen für technische Substrate mit bzw. ohne Bepflanzung
- Empfehlungen von geeigneten Aufbauten (Substrat und Saatgutmischung) für einen zukünftigen Einsatz im urbanen und nachhaltigen Regenwassermanagement in Sickermulden

Forschungsfragen:

- Welche methodische Vorgehensweise ist notwendig, um eine Ersteinschätzung der Evapotranspiration, unter Berücksichtigung variierender durchschnittlicher Lufttemperaturen, von unterschiedlichen technischen Substraten mit und ohne verschiedene Bepflanzungen zu ermöglichen? **[FF1]**
- Welche Unterschiede können unter Verwendung einer neu entwickelten Gleichung und bereits bestehender Gleichungen zur Bestimmung der Evapotranspiration an technischen Substraten im Bereich des nachhaltigen Regenwassermanagements festgestellt werden? **[FF2]**
- Wie verhält sich die geotechnische Leistungsfähigkeit der verwendeten technischen Substrate im Vergleich zu den bisherigen Standardlösungen für begrünte Sickermulden? **[FF3]**
- Welche Vegetationsentwicklung kann bei den drei getesteten Saatgutmischungen auf den ausgewählten technischen Substraten im Vergleich zu den bisherigen Standardlösungen für begrünte Sickermulden vorgefunden werden? **[FF4]**
- Welche Kombination/en der getesteten Substrat- und Saatgutmischungen kann bzw. können für zukünftige Anwendungen im Bereich des nachhaltigen Regenwassermanagements in Sickermulden empfohlen werden? **[FF5]**

Ergebnisse:

- Darstellung einer Methode für eine Gleichungserstellung zur Berechnung der Evapotranspiration technischer Substrate mit bzw. ohne Bepflanzung **[P1, P2]**
- Darstellung von geo- und vegetationstechnischer Eigenschaften der betesteten technischen Substrate im Vergleich zu den derzeitigen Standardlösungen Empfehlungen für zukünftige Aufbauten (Substrat und Saatgutmischung) in Sickermulden **[P3]**

Abbildung 1: Darstellung von den zugrundeliegenden Herausforderungen, den daraus abgeleiteten Zielen dieser Arbeit und Forschungsfragen, samt deren Ergebnisse (eigene Bearbeitung).

3 Übersicht zu verwendetem/r Material und Methode, sowie Versuchsdesign

In diesem Kapitel wird ein grober Überblick zu den beiden verwendeten Methoden gegeben. Zunächst wird die Methode, die für die Erstellung der Gleichung zur Berechnung der Evapotranspiration technischer Substrate mit und ohne Bepflanzung angewendet wurde, beschrieben. Danach erfolgt eine Darstellung der Methoden der geo- und vegetationstechnischen Untersuchungen der verwendeten technischen Substrate und bisherigen Standardlösungen, sowie Saatgutmischungen im Zuge einer praktischen Anwendung in einer Sickermulde.

In den folgenden beiden Unterkapiteln werden die Methoden und Vorgehensweisen lediglich in groben Zügen umrissen und die Schritte, die zur Zielerreichung getätigt wurden, genannt. Eine detailliertere Beschreibung ist in den einzelnen Publikationen [P1-P3] ersichtlich.

3.1 Erstellung einer Verdunstungsgleichung [P1, P2]

Die detaillierte Beschreibung der Methode zur Erstellung der Evapotranspirationsgleichung befindet sich in ausführlicher Form in den beiden Publikationen „*Evapotranspiration of Technical Substrates – Methodology for Calculating Evapotranspiration of Technical Substrates*“ [P1] und „*Equation for Calculating Evapotranspiration of Technical Soils for Urban Planting*“ [P2]. Grundlage dafür bildet die Arbeit „*Evapotranspiration von technischen Substraten*“ von Weiss (2017). Die angewandte Methode wird hier zur besseren Verständlichkeit noch einmal grob umrissen.

Um eine Gleichung zur Berechnung der Verdunstung in technischen Substraten mit bzw. ohne Bepflanzung zu entwickeln, wurden zunächst drei Schritte vollzogen. Diese sind grafisch in nachfolgender Abbildung dargestellt.

In einem ersten Schritt werden bereits bestehende Verdunstungsgleichungen evaluiert. Dabei wird eine Auswahl der bekanntesten klassischen Gleichungen zur Berechnung der Evapotranspiration getätigt. Die Ergebnisunterschiede der ausgewählten Gleichungen werden quantitativ verglichen. Obwohl sämtliche der Gleichungen auf natürlich gewachsenen Böden entwickelt wurden, weisen diese eine große Variabilität in den Ergebnissen auf. Aufgrund der geringen Übertragbarkeit der einzelnen Gleichungen auf geänderte Bedingungen, erscheint es deshalb von hoher Bedeutung, Gleichungen zur Ersteinschätzung der Evapotranspiration in technischen Substraten mit bzw. ohne Bepflanzung zu erstellen.

Im zweiten Schritt werden die Grundlagen der für die Wasserbilanz essentiellen Prozesse der Evaporation, der Transpiration, sowie der Evapotranspiration beschrieben. Dabei werden die wichtigsten Faktoren identifiziert, die einen erheblichen Einfluss auf die Verdunstung besitzen.

Im dritten Schritt finden die eigentlichen Versuche statt. Dabei werden unterschiedliche technische Substrate mit bzw. ohne Bepflanzung (Stauden) für 24 Stunden auf Wägezellen in einer Klimakammer positioniert und der Gewichtsverlust in Liter dokumentiert, um so die Höhe der Verdunstung zu erhalten. Dabei werden drei unterschiedliche Klimaszenarien (Lufttemperaturen von 11,7 °C, 25 °C und 35 °C; relative Luftfeuchtigkeit von 50 %) simuliert. Die einzelnen technischen Substrate werden dabei in zumindest dreifacher Wiederholung in der Klimakammer beprobt.

Aufgrund der geringsten Abweichungen innerhalb der Messergebnisse wurde zur Darstellung der Verdunstungsgleichung in Abhängigkeit von der Lufttemperatur eine Polynomfunktion zweiten Grades ($y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$) gewählt. Durch Einsetzen einer beliebigen Lufttemperatur für den x-Wert in °C, ergibt sich für den y-Wert eine Evapotranspiration in Liter/24 Stunden in den untersuchten Pflanzgefäßen (Weiss, 2017). Um repräsentative Ergebnisse für die Evapotranspiration (y) zu erhalten, kann die Lufttemperatur ausschließlich in dem Bereich der minimalen und maximalen Lufttemperatur (11,7-35,0 °C) aus den Versuchen gewählt werden (Weiss, Minixhofer, Scharf, *et al.*, 2021). Um die Verdunstung pro m² zu erhalten, muss die Gleichung durch die Oberflächengröße des Pflanzgefäßes (0,0593957 m²) dividiert werden (Weiss, 2017).

Um die erhaltenen Ergebnisse quantitativ zu evaluieren und mit bereits bestehenden Verdunstungsgleichungen abstimmen zu können, wird folglich ein Vergleich mit der Strahlungsgleichung nach Makkink gezogen.

Nachfolgende Abbildung gibt einen zusammenfassenden Überblick zu den verwendeten Methoden und Vorgehensweisen zur Erstellung der Verdunstungsgleichung für technische Substrate mit bzw. ohne Bepflanzung.

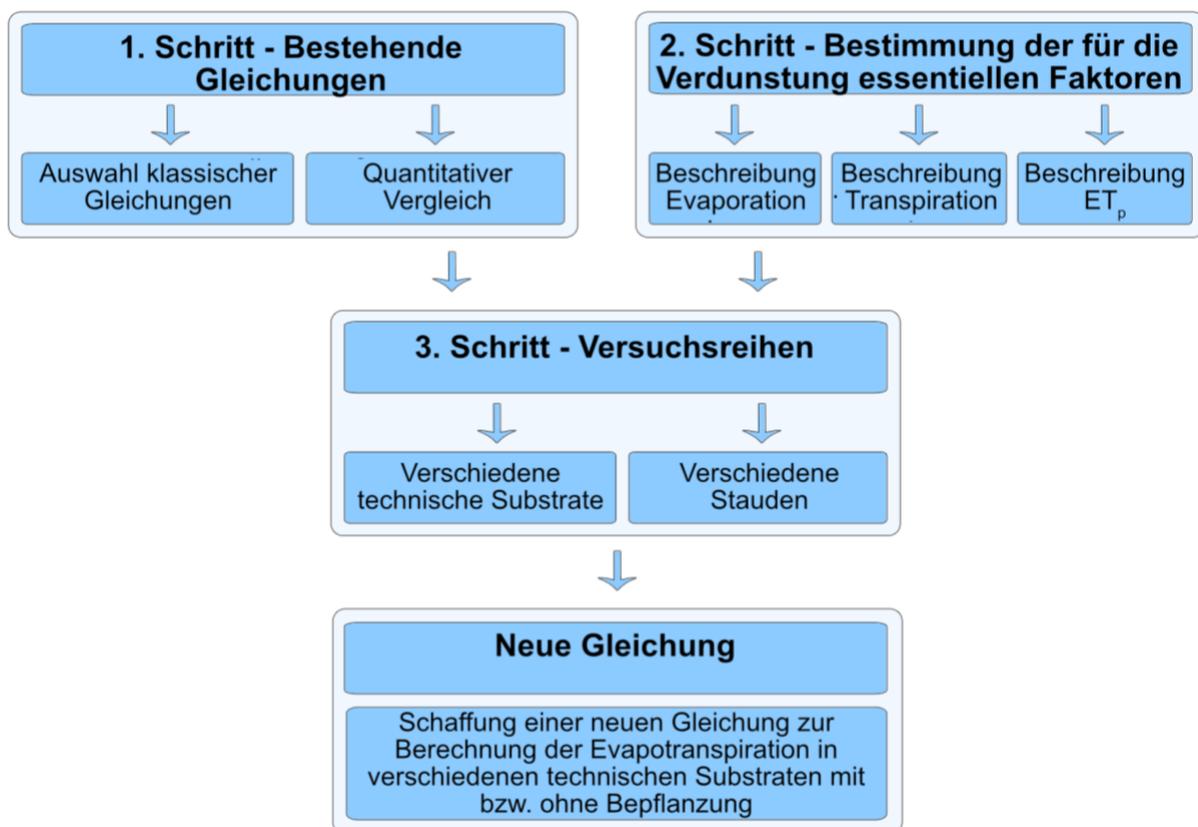


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Methode und Vorgehensweise für Erstellung einer Gleichung zur Berechnung der Evapotranspiration technischer Substrate mit bzw. ohne Bepflanzung (Weiss, 2019, eigene Bearbeitung).

3.2 Geotechnisches und vegetationstechnisches Monitoring von Sickermulden [P3]

Die Methode des Monitorings befindet sich in ausführlicher Form in der Publikation „*Alternative Engineered Soils and Seed Mixes Used for Seepage Troughs*“ [P3] und wird hier zur besseren Verständlichkeit ebenfalls noch einmal grob umrissen.

Insgesamt wurden für eine schlussendliche Empfehlung geeigneter Aufbauten für Sickermulden im Bereich des nachhaltigen und urbanen Regenwassermanagements vier Hauptschritte getätigt.

Im ersten Schritt wurde der Versuchsstandort im Rahmen eines Forschungsprojektes in der Kuchelauer Hafestraße, im 19. Wiener Gemeindebezirk aufgrund eines Starkregenereignisses in der Vergangenheit ausgewählt. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten wurde in Absprache mit der Stadt Wien eine Sickermulde als geeignetste Sickeranlage identifiziert und errichtet.

Im zweiten Schritt wurden zehn in ihrer Zusammensetzung verschiedene Substratvarianten mit unterschiedlichen Aufbauhöhen (30 bzw. 80 cm) in der Sickermulde eingebaut, wobei ein Freibord von 10 cm und eine Böschungsneigung von 2:3 eigenhalten wurde. Es handelt sich dabei um zwei Referenzsubstrate (Oberboden und Standardbaumssubstrat) und acht neu entwickelte technische Substrate mit speziell auf den Einsatz in Sickermulden konzipierten Eigenschaften (hohe Wasserdurchlässigkeit, bei gleichzeitig hoher Wasserspeicherkapazität und hohem Porenvolumen).

Im dritten Schritt erfolgt die Begrünung der Substrate mittels drei verschiedener Saatgutmischungen, wobei jede der Substratvarianten mit allen drei Mischungen (in drei gleich großen Abschnitten) begrünt wurde. Neben einer Standardrasenmischung (3 verschiedene Gräserarten), kamen die artenreichen Saatgutmischungen eines Blumenrasens (34 Gräser- und Kräuterarten), sowie einer Blumenwiese (53 Gräser- und Kräuterarten) zum Einsatz.

Um die Performance der verbauten Substrate und der ausgebrachten Saatgutmischungen zu evaluieren, wurde ein dreijähriges geo- und vegetationstechnisches Monitoring im Zeitraum von 2018-2020 durchgeführt. Im Rahmen des geotechnischen Monitorings wurde allem voran der Indikator der Infiltration erhoben, der durch Messungen der Bodenfeuchtigkeit und des Niederschlags unterstützt wurde. Die Infiltration wurde 2x jährlich (zu Beginn und am Ende der Vegetationsperiode) dokumentiert. Niederschlag und Bodenfeuchte wurden über den gesamten Versuchszeitraum kontinuierlich miterhoben. Zur Messung des Niederschlags wurde der Sensor ECRN-100 und für die Messung der Bodenfeuchte der Sensor TEROS 12, jeweils von METEOR (München, Deutschland) verwendet. Im Rahmen des vegetationstechnischen Monitorings, wurden die Indikatoren des Deckungsgrads, der Vitalität, sowie der Infloreszenz erhoben. Das vegetationstechnische Monitoring fand 1x monatlich während der Vegetationsperiode statt. Zusätzlich wurde sowohl bei den geotechnischen, als auch den vegetationstechnischen Indikatoren eine deskriptive statistische Analyse durch Zuhilfenahme von Balken- und Liniendiagrammen, sowie Boxplots durchgeführt.

Um eine gesamtheitliche Aussagekraft des Monitorings zu erreichen und eine abschließende Empfehlung für zukünftige Aufbauten (Substrate und Saatgutmischungen) in Sickermulden im Bereich des nachhaltigen, urbanen Regenwassermanagements aussprechen zu können, wurden die erhobenen Indikatoren in eine Gesamtmatrix überführt. Insgesamt können hier 81 Punkte (100 %) für jede Substratvariante und Saatgutmischung im gesamten Versuchszeitraum 2018-2020 erreicht werden. Dazu wurden die Ergebnisse, aufgrund

vorhandener Normen und Richtlinien in drei Kategorien (Gut = 3 Punkte; Ausreichend = 2 Punkte; Ungenügend = 1 Punkt) untergliedert. Je nach Bedeutung der erhobenen Indikatoren wurden diese mit unterschiedlichen Faktoren wie folgt gewichtet: Infiltration (Faktor "3"), Deckungsgrad (Faktor "3"), Vitalität (Faktor "2") und Infloreszenz (Faktor "1").

Nachfolgende Abbildung gibt einen zusammenfassenden Überblick zu der Methode und Vorgehensweise zur Empfehlung geeigneter Aufbauten (Substrat und Saatgutmischungen) für einen zukünftigen Einsatz in Sickermulden im Bereich des nachhaltigen, urbanen Regenwassermanagements.



Abbildung 3: Grafische Darstellung der Methode und Vorgehensweise für Empfehlung geeigneter Aufbauten (Substrat und Saatgutmischungen) für einen zukünftigen Einsatz in Sickermulden im Bereich des nachhaltigen, urbanen Regenwassermanagement (eigene Bearbeitung).

4 Überblick zu den verfassten Publikationen

In den folgenden Unterkapiteln werden die in dieser Arbeit berücksichtigten Publikationen zunächst inhaltlich zusammengefasst und im weiteren Verlauf eine thematische Zusammenfassung der verfassten Publikationen gegeben, bevor im nächsten Kapitel eine Zusammenführung der erlangten Ergebnisse erfolgt.

4.1 Inhaltliche Zusammenfassung der verfassten Publikationen

Publikation [1]

Weiss O., Scharf B., Pitha U. (2019): Evapotranspiration of Technical Substrates – Methodology for Calculating Evapotranspiration of Technical Substrates. Journal of Ecological Engineering, Volume 20, Issue 9, 28-37.

Ziel

In dieser Publikation wird die Methode zur Erstellung einer neuen Gleichung zur Ermittlung einer Ersteinschätzung der Evapotranspiration in technischen Substraten dargestellt. Dazu werden drei Schritte präsentiert, die ausgeführt wurden, um schlussendlich eine entsprechende Gleichung erstellen zu können. Der erste Schritt liefert eine kompakte Zusammenfassung einiger ausgewählter, bekannter Gleichungen zur Berechnung der Evapotranspiration auf natürlich gewachsenen Böden. In einem zweiten Schritt werden die Prozesse der Evapotranspiration dargestellt. Danach erfolgt die Beschreibung des Versuchssetups.

Material & Methode

Aufbauend auf der bereits 2017 veröffentlichten Masterarbeit „Evapotranspiration von technischen Substraten“ (Weiss, 2017), erfolgt eine umfangreiche Literaturrecherche. Zunächst wurde der Stand des Wissens dargestellt. Darauf aufbauend wird ein Versuchssetup zur Betestung von verschiedenen technischen Substraten und Bepflanzungen in einer Klimakammer erläutert. Infolgedessen werden unterschiedliche Klimaszenarien simuliert und der Gewichtsverlust der Substratkombinationen auf Wägezellen ermittelt, woraus sich die Evapotranspiration ableiten lässt.

Ergebnisse

Diese Publikation zeigt deutlich, dass es bereits eine Vielzahl von Gleichungen zur Berechnung der Verdunstung in natürlich gewachsenen Böden gibt. Als Beispiel können u.a. die Strahlungsgleichung nach Makkink, die Kombinationsgleichung nach Penman, die Gleichung nach Blaney – Criddle aufgezählt werden. Damit die Gleichungen korrekte Ergebnisse liefern, sind diese jedoch nur unter den Bedingungen anwendbar, unter denen sie auch entwickelt wurden. Es wurden bereits Versuche mit Wägezellen zur Bestimmung der Evapotranspiration getätigt. Diese fanden jedoch unter Freilandbedingungen statt und untersuchten stets natürlich gewachsene Böden. Eine Erstellung einer Verdunstungsgleichung war bei diesen Versuchen nicht vorgesehen. Daher erscheint es als notwendig, eine einfache Vorgehensweise zur erstellen, um eine Ersteinschätzung der

Evapotranspiration in technischen Substraten bei unterschiedlichen Lufttemperaturen und Bepflanzungstypen zu erstellen. Die genaue Zusammensetzung der Gleichung und Vergleich der Ergebnisse mit einer bestehenden Gleichung, erfolgt in der nachfolgenden Publikation.

Publikation [2]

Weiss O., Minixhofer P., Scharf B., Pitha U. (2021): Equation for Calculating Evapotranspiration of Technical Soils for Urban Planting. Land, Volume 10, Issue 6, 622.

Ziel

In dieser Publikation wird gemäß der Methode der vorangegangenen Veröffentlichung [P1], die Erstellung von Evapotranspirationsgleichungen für verschiedene technische Substrate präsentiert. Dabei soll die Notwendigkeit neuer Gleichungen zur Berechnung der Verdunstung technischer Substrate, durch einen Vergleich mit den Ergebnissen der bekannten Strahlungsgleichung nach Makkink hervorgehoben werden. Darüber hinaus soll die hohe Bedeutung von technischen Substraten im urbanen Kontext dargestellt werden.

Material & Methode

Aufbauend auf der Methode der vorangegangenen Publikation [P1], wird in diesem Paper die Erstellung der tatsächlichen Gleichung beschrieben und mit einer bekannten Strahlungsgleichung verglichen. Dazu wird aufgrund des Gewichtsverlustes innerhalb von 24 Stunden die Evapotranspiration des jeweiligen Substrats mit und ohne Bepflanzung bestimmt. Durch die Verwendung eines Polynoms zweiten Grades ($y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$), kann für jede beliebige Lufttemperatur (x) zwischen 11,7-35 °C die Höhe der Verdunstung (y) pro Tag berechnet werden. Durch Division des Ergebnisses mit der Oberfläche des verwendeten Pflanzgefäßes (in m²) erhält man so die Evapotranspiration des jeweiligen Substrats mit bzw. ohne Bepflanzung in mm/Tag.

Ergebnisse

Aufgrund der extremen Standortbedingungen einer Stadt wird die Relevanz technischer Substrate in städtischen Begrünungen und speziell für das nachhaltige, urbane Regenwassermanagement klar hervorgehoben. Ergebnis dieser Publikation ist die Darstellung von Verdunstungsgleichungen für sechs verschiedene technische Substrate im unbepflanzten Zustand. Zwei dieser Substrate wurden zusätzlich mit *Sedum floriferum* und *Geranium x cantabrigiense* bepflanzt, um den wesentlichen Einfluss der Transpiration quantitativ nachzuweisen. Verglichen zur Strahlungsgleichung nach Makkink konnten deutliche Unterschiede in der Evapotranspiration festgestellt werden.

Publikation [3]

Weiss O., Minixhofer P., Werner N., Riedenbauer S., Olesko E., Luebke, K., Scharf B., Pitha U. (2021): Alternative Engineered Soils and Seed Mixes Used for Seepage Troughs. Land, Volume 10, Issue 11, 1152.

Ziel

Diese Publikation prüft unterschiedliche technische Substrate und Saatgutmischungen für deren Eignung in begrünten Sickermulden im Kontext des nachhaltigen, urbanen Regenwassermanagement und setzt diese in Bezug zu den bisherigen Standardlösungen. Auf Basis der geo- und vegetationstechnischen Performance, sollen geeignete technische Substrate und Saatgutmischungen für eine zukünftige Anwendung abgeleitet werden.

Material & Methode

Die Eignung der verwendeten ein- und zweischichtig eingebauten technischen Substrate und Saatgutmischungen wird in einem dreijährigen Feldversuch (2018-2020) in einer Sickermulde dokumentiert. Dazu wird jede der verwendeten Substratmischungen mit drei unterschiedlichen Saatgutmischungen (Standardrasen-, Blumenrasen- und Blumenwiesenmischung) ausgestattet. Anhand eines geo- und vegetationstechnischen Monitorings wird die unterschiedliche Performance der Standardlösungen und Alternativen, neu entwickelten technischen Substrate und Saatgutmischungen evaluiert. Als Indikatoren für das geotechnische Monitoring dient die Infiltrationsleistung, wohingegen Deckungsgrad, Vitalität und Infloreszenz die Indikatoren für das vegetationstechnische Monitoring bilden. Um Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten festzustellen, wurden die deskriptiven statistischen Verfahren des Boxplots, sowie des Linien- und Balkendiagramms angewandt. Eine Gesamtmatrix gibt anhand einer entsprechenden Gewichtung der Indikatoren eine Empfehlung für zukünftige Anwendungen.

Ergebnisse

Die Untersuchung der verwendeten Substrate ergab, dass die beiden bisherigen Standardlösungen für eine Anwendung in Sickermulden nicht empfohlen werden können. Die Standardsubstratvariante mit Oberboden neigt zu einer raschen Verschlämmung und dadurch zu stark verlangsamter Infiltrationsleistung. Ein Standardbaums substrat, das für eine flächige Anwendung in mit Gräsern und Kräutern begrünten Sickermulden untersucht wurde, weist eine schlechte Wasserspeicherfähigkeit und dementsprechend schlechte Vegetationsentwicklung der ausgebrachten Saatgutmischungen auf. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen ein- und zweischichtigen Aufbauten der technischen Substrate hinsichtlich der geo- und vegetationstechnischen Indikatoren festgestellt werden. Die artenreichen Saatgutmischungen Blumenrasen und Blumenwiese konnten bei verringerter Pflegeintensität, im Vergleich zu Standardrasen deutlich bessere Ergebnisse erzielen. Daher kann eine Verwendung der alternativen technischen Substrate in Kombination mit den Saatgutmischungen Blumenrasen oder Blumenwiese für die zukünftige Anwendung in begrünten Sickermulden empfohlen werden.

4.2 Thematische Zusammenfassung der verfassten Publikationen

Sämtliche der drei, im Rahmen dieser Dissertation verwendeten Publikationen, beschäftigen sich mit der Thematik des nachhaltigen, urbanen Regenwassermanagements. Als zentrales Thema wird die Verwendung technischer Substrate als Alternativen für natürliche Böden behandelt. Dazu werden bisherige Standardlösungen mit neu entwickelten, technischen Substratkombinationen verglichen und deren Unterschiede charakterisiert.

Aufbauend auf der Thematik der Beschreibung des Stands des Wissens und Darstellung eines Versuchssetups zur Erstellung einer Gleichung zur Berechnung der Evapotranspiration technischer Substrate mit und ohne Bepflanzung [P1], wird die eigentliche Erstellung der Gleichung beschrieben und mit bereits vorhandenen Verdunstungsgleichungen verglichen [P2]. Für technische Substrate können die bisherigen Verdunstungsgleichungen nicht angewendet werden. Klassische Gleichungen zur Bestimmung der Evapotranspiration wurden auf natürlich gewachsenen Böden entwickelt und liefern daher nur unter diesen Bedingungen zu 100 % korrekte Ergebnisse. Im Rahmen eines Vergleiches zwischen klassischen Verdunstungsgleichungen und den hier erstellten Gleichungen, konnten die deutlichen Unterschiede dargelegt werden [P1, P2]. Im Rahmen eines Feldversuchs werden ausgewählte technische Substrate, für die im vorangegangenen Schritt bereits Verdunstungsgleichung erstellt wurden und weitere technische Substrate auf deren Eignung für eine Anwendung in Sickermulden getestet. Dazu wurden diese mit drei unterschiedlichen Saatgutmischungen (Standardrasen-, Blumenrasen- und Blumenwiesenmischung) begrünt, um einen Vergleich zu den bisherigen Standardlösungen näherzubringen und eine geeignete Substratkombination für zukünftige Verwendungen in Sickermulden zu identifizieren [P3].

Nachfolgende Abbildung soll diese Entwicklung auf dem Themenschwerpunkt technischer Substrate im Bereich des nachhaltigen, urbanen Regenwassermanagements basierenden Publikationen, samt den daraus abgeleiteten Forschungsfragen, darstellen.



Abbildung 4: Darstellung des Ausgangspunkts auf Basis der technischen Substrate und Entwicklung daraus entstandener Publikationen und Forschungsfragen in aufbauender Reihenfolge (eigene Bearbeitung).

5 Synthese der erlangten Ergebnisse

In natürlichen Ökosystemen setzt sich ausschließlich jene Vegetation durch, die unter den vorherrschenden Bedingungen gedeihen kann. In urbanen Ökosystemen kommt es zu einer starken Beeinflussung durch den Menschen. Die Nutzung des städtischen Raumes durch diesen bedingt eine Verdichtung der Böden und eine Versiegelung der Oberflächen. Dies führt dazu, dass der ursprünglich vorhandene Boden die notwendigen Funktionen nicht mehr ausreichend erfüllen kann. Auf Grund von meist nur geringem Porenvolumen, geringer Wasserspeicherfähigkeit oder geringer Infiltrationsleistung, müssen Alternativlösungen angedacht werden. Abhilfe können hierbei technische Substrate schaffen, die aus mineralischen und organischen Materialien bestehen und nach spezifischen Voraussetzungen zusammengestellt werden können [P2, P3].

Nachdem es sich bei technischen Substraten im Bereich des Regenwassermanagements, verglichen mit natürlichen Böden, um ein ‚neuartiges Produkt‘ handelt, gibt es in diesem Bereich noch großen Forschungsbedarf. In dieser Arbeit wurden technische Substrate in Bezug auf ihren Einsatz im Bereich des nachhaltigen Regenwassermanagements im städtischen Raum untersucht. Dazu wurde zunächst die Evapotranspiration von technischen Substraten analysiert, da diese einen wesentlichen Beitrag zur Abkühlung und Vermeidung von Urban Heat Islands in Städten leistet. Um die Höhe der Verdunstung zu quantifizieren, wurde eine Gleichung erstellt, die eine Ersteinschätzung der Höhe der Evapotranspiration liefert und deutliche Unterschiede zu den bereits bestehenden Verdunstungsgleichungen aufzeigen konnte. Anschließend wurde eine grundsätzliche Eignung der verwendeten, technischen Substrate in Sickermulden mit Begrünungen durch die Verwendung von unterschiedlichen Saatgutmischungen (Standardrasen-, Blumenrasen- und Blumenwiesenmischung) im Vergleich zu derzeit eingesetzten Standardsubstraten geprüft [P1, P2, P3].

Erstellung einer Gleichung zur Berechnung der Evapotranspiration in technischen Substraten mit bzw. ohne Bepflanzung

Um eine Ersteinschätzung der Evapotranspiration technischer Substrate anhand der vorgestellten Gleichung zu ermöglichen, gilt es zunächst ein geeignetes Versuchsssetup zu erstellen. Dazu ist es notwendig, sämtliche zu prüfende technische Substrate mit und ohne Bepflanzung in zumindest drei identen Wiederholungen vorzubereiten. Diese werden nach entsprechender Vorbereitung für 24 Stunden auf separaten Wägezellen in einer Klimakammer positioniert und anschließend der Gewichtsverlust gemessen. Der Gewichtsverlust ist gleichzusetzen mit der Evapotranspiration (bei unbepflanzten technischen Substraten der Evaporation) in Liter. Es werden jeweils drei unterschiedliche Klimaszenarien (Lufttemperaturen von 11,7 °C, 25 °C und 35 °C) simuliert. Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt konstante 50 % und die Beleuchtungsstärke 50 W/m² (von 06:00 – 18:00 Uhr MEZ). Nachdem jedes technische Substrat mit und ohne Bepflanzung zumindest drei Mal pro Klimaszenario in der Klimakammer getestet wurde, wird ein Polynom zweiten Grades ($y=a*x^2+b*x+c$) basierend auf dem Gewichtsverlust pro Substrat gebildet. Diese Gleichung wird durch die Substratoberfläche (in m²) der Pflanzgefäße dividiert, um Ergebnisse pro m² zu erhalten. Durch Einsetzen einer beliebigen Lufttemperatur im Untersuchungsbereich zwischen 11,7 °C und 35 °C erhält man eine erste Einschätzung der in diesem technischen Substrat mit bzw. ohne Bepflanzung zu erwartenden Verdunstung in Liter/m² innerhalb von 24 Stunden [FF1], [P1, P2].

Bei einer Berechnung der Evapotranspiration unter Verwendung der erstellten Gleichungen konnten deutliche Unterschiede zu den Ergebnissen der Strahlungsgleichung nach Makkink ermittelt werden. Im Rahmen einer ausführlichen Literaturrecherche wurde eine Auswahl der wohl bekanntesten Gleichungen zur Berechnung der Verdunstung (Strahlungsgleichung nach Makkink, Kombinationsgleichung nach Penman sowie die Gleichungen nach Blaney – Criddle, Thornthwaite, Albrecht, Haude, Meyer und Turc) getroffen und die dafür notwendigen Parameter genannt. Sämtliche dieser Gleichungen wurden auf natürlich gewachsenen Böden entwickelt, zumeist mit einer Begrünung aus kurzgeschnittenem Rasen oder Feldfrüchten. All diese Gleichungen können jedoch nur unter den exakt selben vorherrschenden Entwicklungsbedingungen korrekte Ergebnisse liefern. Durch Verwendung der präsentierten Methode kann für jedes beliebige technische Substrat mit und ohne Bepflanzung eine vergleichsweise einfache und schnell zu erstellende, eigene spezifizierte Verdunstungsgleichung erstellt werden. Diese Gleichung liefert, aufgrund einer ausschließlichen Berücksichtigung der Lufttemperatur als Eingangsgröße, zwar nur eine Ersteinschätzung der zu erwartenden Evapotranspiration, es konnten jedoch beträchtliche Unterschiede zu den klassischen Gleichungen festgestellt werden. Während unter Berücksichtigung derselben Eingangsgrößen (Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Globalstrahlung) die Strahlungsgleichung nach Makkink für ein ausgewähltes technisches Substrat eine Verdunstung von 0,12 mm/Tag angibt, kommt die neu entwickelte Gleichung auf eine Verdunstung von 3,15 mm/Tag. Damit entspricht die nach der klassischen Gleichung errechnete Höhe der Verdunstung pro Monat (3,60 mm/Monat) in etwa dem Wert, der bei der neuen Gleichung pro Tag (3,15 mm/Tag) genannt wird. Gründe dafür liegen in den unterschiedlichen Eigenschaften, die sich auf die Zusammensetzung von technischen Substraten und natürlichen Böden zurückführen lassen. So weisen die hier verwendeten technischen Substrate im Bereich des nachhaltigen Regenwassermanagements unter anderem eine weitaus höhere Infiltration, Wasserspeicherfähigkeit und erhöhtes Porenvolumen auf. Besonders in Anbetracht der Anwendung in Städten, trägt eine hohe Verdunstungsleistung zur Abkühlung und Vermeidung von Urban Heat Islands bei [FF2], [P1, P2, P3].

Alternative Aufbaukombinationen (technische Substrate mit den Saatgutmischungen Blumenrasen und Blumenwiese) für Sickermulden

Wie bereits aus dem Vergleich der Ergebnisse aus den Verdunstungsgleichungen ersichtlich wurde, gibt es auch bei der geotechnischen Leistungsfähigkeit deutliche Unterschiede zwischen natürlichen Böden und technischen Substraten. Hinsichtlich der Infiltrationsleistung konnten sämtliche technische Substrate den normativen Rahmenbedingungen (nach ÖNORM B2506-1 und FLL-Richtlinien für Baumpflanzungen) genügen und bewegen sich in dem Bereich von 1×10^{-5} und 5×10^{-6} m/s. Der natürliche Boden (Oberboden) erreicht Werte bis zu 1×10^{-9} m/s. Dieser besitzt damit eine deutlich zu geringe Sickerfähigkeit, um für einen Einsatz im Bereich des Regenwassermanagements in Frage zu kommen. Aufgrund der Verdichtung und Verschlammung der Bodenoberfläche, kann hier nach einiger Zeit kaum Wasser versickern. Eine besonders starke Abnahme konnte innerhalb des ersten Versuchsjahres dokumentiert werden, in welchem auch die niedrigste Infiltrationsgeschwindigkeit mit 1×10^{-9} m/s (2019) gemessen werden konnte. Auch ist die Tragfähigkeit mit $4,0 \text{ MN/m}^2$ deutlich geringer als bei den technischen Substraten. Dies lässt den Schluss zu, dass es mit steigender Belastung (z.B. betreten der Mulde durch Personen) zu einer noch stärkeren Verdichtung und damit einer weiter absinkenden Versickerungsfähigkeit kommt. Bei der Durchführung von

Bodenfeuchtemessungen konnte bei dem natürlichen Boden aufgrund der niedrigen Infiltrationsleistung ein sehr langsamer Anstieg der Bodenfeuchte festgestellt werden. Beim Standardbaums substrat kann ein schneller Anstieg, bei einem darauffolgend raschen Absinken der Bodenfeuchte, erkannt werden. Dies ist ein Indiz für eine geringe Wasserspeicherfähigkeit. Sämtliche der neu entwickelten technischen Substrate, zeigen einen schnellen Anstieg, gefolgt von einem langsamen Absinken der Bodenfeuchte, das auf eine hohe Wasserspeicherfähigkeit schließen lässt. Durch eine verringerte Infiltrationsleistung und Wasserspeicherfähigkeit kommt es zu einer deutlich geringeren Verdunstung, die gerade während der heißen Sommermonate von essentieller Bedeutung für das Stadtklima ist. Speziell die Standardlösung eines natürlichen Bodens (Oberboden), aber auch eine flächige Anwendung eines Standardbaums substrates in Sickermulden, können daher im Sinne eines nachhaltigen Regenwassermanagements nicht empfohlen werden [FF3], [P3].

Um die Vegetationsentwicklung in der Sickermulde für die einzelnen Substratvarianten und Saatgutmischungen zu analysieren, wurden die drei Indikatoren des Deckungsgrades, der Vitalität und der Infloreszenz während der Vegetationsperioden des Untersuchungszeitraumes (2018-2020) aufgenommen. Über den gesamten Versuchszeitraum von drei Jahren konnte der höchste durchschnittliche Deckungsgrad für die Saatgutmischung der Blumenwiese bestimmt werden. Mit einem durchschnittlichen Deckungsgrad von 73 %, wird diese von der Blumenrasensaatgutmischung mit 66 % und der Standardrasensaatgutmischung mit nur 63 % gefolgt. Bei den Substratvarianten erreicht der Oberboden den höchsten Deckungsgrad. Auch sämtliche neu entwickelte technische Substrate konnten zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Lediglich das Standardbaums substrat konnte für diesen Indikator nach ÖNORM B 2241 unzureichende Ergebnisse (28 %) erreichen. Hinsichtlich der Indikatoren der Vitalität und des Deckungsgrades zeichnet sich bei den Saatgutmischungen ein identes Ergebnis ab. So konnte bei der Blumenwiesensaatgutmischung der durchschnittlich höchste Deckungsgrad festgestellt werden, gefolgt von der Blumenrasen- und der Standardrasensaatgutmischung. Nachdem die Vitalität stark von der Wasserspeicherfähigkeit der verwendeten Substrate abhängt, konnte das Standardbaums substrat auch hier ungenügende Ergebnisse erzielen. Die Substratvariante Oberboden konnte durchschnittliche Vitalitätswerte erreichen. Sämtliche technischen Substrate wiesen eine zufriedenstellende durchschnittliche Vitalität während des Untersuchungszeitraumes auf. Hinsichtlich des Indikators der Infloreszenz verhält es sich ebenfalls ähnlich. Aufgrund des Mähintervalls und der Artenzusammensetzung wurde der höchste Blütenreichtum bei der Blumenwiesensaatgutmischung, ebenfalls gefolgt von der Blumenrasen- und Standardrasensaatgutmischung, dokumentiert. Aufgrund des geringen Deckungsgrades und der niedrigen Vitalität konnte bei dem Standardbaums substrat die geringste Anzahl an Blüten erhoben werden. Auch der Oberboden wies eine geringere Blütenanzahl auf, als die neu entwickelten technischen Substrate [FF4], [P3].

Um eine Aussage zur Eignung der getesteten Substrat- und Saatgutmischungen treffen zu können, wurden die Indikatoren, wie bereits beschrieben, nach Relevanz für Sickermulden gewichtet und in einer Gesamtmatrix dargestellt. Aufgrund der hohen Bedeutung im nachhaltigen Regenwassermanagement erfolgt eine Gewichtung mit dem Faktor "3" für die beiden Indikatoren Infiltrationsleistung und Deckungsgrad. Die Vitalität wird mit dem Faktor "2" gewichtet. Aufgrund der untergeordneten Rolle für ein langfristiges Bestehen einer Sickeranlage, wird die Infloreszenz mit einem Faktor von "1" gewichtet. Betrachtet man die Ergebnisse in der Gesamtmatrix, so können klare Unterschiede zwischen den bisherigen

Standardlösungen und den neuen Substratvarianten dokumentiert werden. Aufgrund der geo- und vegetationstechnischen Performance können das bisherigen Standardsubstrat mit Oberboden und das Standardbaumsubstrat nicht empfohlen werden. Sämtliche der neu entwickelten technischen Substrate konnten zufriedenstellende Ergebnisse liefern und können für zukünftige Anwendungen in Sickermulden angedacht werden. Es konnten keine Unterschiede zwischen den ein- und zweischichtigen Varianten dieser technischen Substrate festgestellt werden. Deshalb sollte situationsabhängig, je nach Beschaffenheit des vorhandenen Untergrunds über den Einbau einer ein- oder zweischichtigen technischen Substratvariante entschieden werden. Für sämtliche untersuchten Substrate konnte die Blumenwiesensaatgutmischung die besten Ergebnisse erzielen. Durchschnittlich ungenügende Ergebnisse konnten bei einer Begrünung durch die Standardrasensaatgutmischung dokumentiert werden. Blumenrasen und Blumenwiesen bieten neben der Erhöhung der Biodiversität durch die Bereitstellung eines ausreichenden Nahrungsangebotes für Insekten, auch den Vorteil einer geringeren Pflegeintensität. Während ein Standardrasen zumindest monatlich gemäht wird, ist dies beim Blumenrasen nur jeden 2. Monat und bei einer Blumenwiese nur 1-2x jährlich notwendig. Durch die Fähigkeit zur Selbsterneuerung bei Durchführung der Mahd zum richtigen Zeitpunkt (Bildung und Ausreifung von Samen), sind diese beiden Saatgutmischungen auch weitaus resilienter als die traditionelle Saatgutmischung des Standardrasens. Aus diesen Gründen ist eine Variante (ein- oder zweischichtig) der neu entwickelten technischen Substrate mit Begrünung durch eine Blumenwiesensaatgutmischung für zukünftige Anwendungen im Bereich des nachhaltigen Regenwassermanagements in Sickermulden besonders empfehlenswert [FF5], [P3].

Zusammenfassung

Auf Basis der erhaltenen Ergebnisse kann festgehalten werden, dass es bedeutende Unterschiede zwischen natürlichen Böden und technischen Substraten in Bezug auf die beiden untersuchten Aspekte der Evapotranspiration, sowie der geo- und vegetationstechnischen Eignung für eine Anwendung in Sickermulden gibt. Im städtischen Kontext können natürliche Böden die gewünschten und benötigten Funktionen nicht im ausreichenden Maße erfüllen, weshalb in diesem Fall technische Substrate zu empfehlen sind [FF2, FF3, FF4, FF5], [P1, P2, P3]. In Bezug auf eine Berechnung der Evapotranspiration sind hierfür neue Gleichungen zu erstellen. Die bisherigen Verdunstungsgleichungen können ausschließlich auf natürlich gewachsenen Böden angewandt werden, da diese nur unter den Bedingungen 100 % korrekte Ergebnisse liefern, unter denen sie auch erstellt wurden. Die Methode zur Erstellung einer einfachen Gleichung wurde in dieser Arbeit [P1, P2] detailliert beschrieben. Auch in einer praktischen Anwendung ausgewählter Substrate wurde ermittelt, dass die bisherigen Standardlösungen für eine flächige Begrünung in Sickermulden als ungeeignet eingestuft werden können. Neben den beiden Standardsubstraten (Oberboden und Standardbaumsubstrat), konnte auch die Standardrasenmischung nur unzureichende Ergebnisse liefern. Aufgrund der erhaltenen Daten aus den Versuchen ist im Bereich von begrünten Sickermulden die Verwendung der getesteten technischen Substrate, in Kombination mit einer Begrünung aus artenreicheren und pflegeextensiveren Blumenrasen- und Blumenwiesensaatgutmischungen zu empfehlen [P3].

Folgende Kernaussagen können daher zu den formulierten Forschungsfragen getroffen werden:

- Aufgrund der mangelnden Übertragbarkeit bisheriger Verdunstungsgleichungen, die auf natürlichen Böden entwickelt wurden, wird hier eine Methode zur Erstellung einer Gleichung zur Berechnung der Evapotranspiration auf technischen Böden mit bzw. ohne Bepflanzung vorgestellt. [FF1, FF2] [P1, P2]
- Bisherige Standardlösungen zur Begrünung von Sickermulden erweisen sich als untauglich. Technische Substrate mit hoher Wasserspeicherfähigkeit, gleichzeitig hoher Wasserdurchlässigkeit und einem hohen Porenvolumen, erweisen sich als besonders geeignet. Anstelle einer Begrünung mit artenarmen Standardrasen, sind die pflegeextensiven Saatgutmischungen Blumenrasen und Blumenwiese zu bevorzugen. [FF3, FF4, FF5] [P3]

6 Diskussion und Schlussfolgerung

Es kann festgehalten werden, dass ein enger Zusammenhang zwischen der Infiltrationsleistung, der Wasserspeicherfähigkeit, dem Porenvolumen und der Evapotranspiration besteht. Die Evapotranspiration und hier allem voran der Prozess der Transpiration, trägt wesentlich dazu bei, das Entstehen von Urban Heat Islands in Städten zu verhindern (Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020). Im Rahmen der Photosynthese geben Pflanzen Wasser durch Transpiration an die umgebenden Luftmassen ab und tragen damit zur Abkühlung der umgebenden Luftmassen bei (Schrödter, 1985; Weiler, Nover und Nultsch, 2008). Damit Pflanzen eine ausreichende Vitalität besitzen, sich entsprechend entwickeln und den Vorgang der Kühlung im Rahmen der Transpiration erfüllen können, muss ausreichend pflanzenverfügbares Wasser im Boden vorhanden sein (Close *et al.*, 1996; Duple, 2004; Chakraborty, Saha und Reif, 2013). Die geringe Infiltrationsleistung (1×10^{-9} m/s) des Oberbodens erlaubt es nicht, langfristig ausreichend Wassernachschub in die tieferliegenden Schichten des Substrats eindringen zu lassen. Der kf-Wert von Oberboden liegt somit deutlich unterhalb des Grenzwertes, der in der ÖNORM B2506-1 für aktive Bodenfilterschichten vorgegeben wird (Austrian Standards, 2013).

Damit jedoch die Vegetation auch unter diesen ungünstigen Voraussetzungen überhaupt bestehen kann, ist die Wasserspeicherfähigkeit als weiterer Indikator nicht außer Acht zu lassen (Dellantonio, 2017). Die hohe Vitalität des Pflanzenbestandes und dessen geschlossener Deckung lassen Schlüsse auf die hohe Wasserspeicherfähigkeit des Bodens zu. Pflanzen nehmen Wasser über das Wurzelsystem auf und transportieren dieses in die oberirdischen Pflanzenteile weiter (Weiler, Nover und Nultsch, 2008). Aufgrund der geringen Infiltration liegt die Vermutung nahe, dass Gräser und Kräuter ihr Wurzelsystem auch dicht unterhalb der Substratoberfläche ausbilden, da hier regelmäßiger Wassernachschub durch Regenereignisse geliefert wird. Um diese Vermutung zu validieren, müsste die Durchwurzelungstiefe, die im Rahmen dieses Versuches nicht durchgeführt wurde, erhoben werden. Die Durchwurzelungstiefe ist stark artenabhängig und ist genetisch für die einzelnen Pflanzen bestimmt (Kutschera und Lichtenegger, 1960). Je nach Pflanzenart werden unterschiedliche Wurzelformen unterschieden. Durch die hohe Vielfalt in den beiden Saatgutmischungen Blumenrasen und Blumenwiese, findet eine dichte Bewurzelung in unterschiedlicher Tiefenbereichen statt (Kutschera, Lichtenegger und Sobotik, 1997). Der stärkste Rückgang in der Infiltration des Oberbodens konnte, wie in Bergman *et al.* (2011) beschrieben, nach dem ersten Jahr erkannt werden. Insbesondere hier kam es zu einem Verschlämmen und Verdichten der Bodenoberfläche durch Feinanteile des Bodens selbst, externe Feinpartikel wie Reifenabrieb oder Sedimente angrenzender Flächen. Das Bedecken der Bodenoberfläche und die damit einhergehende Veränderung der Bodenstruktur führt zu der geringeren Infiltration und erhöhtem Oberflächenabfluss (Elhaus, 2015; Fohrer *et al.*, 2016). Auch wenn beim Standardbaums substrat eine ausreichende Infiltrationsgeschwindigkeit festgestellt werden konnte, verhindert die geringe Wasserspeicherfähigkeit das Vorhandensein ausreichend pflanzenverfügbaren Wassers für die ausgebrachten Gräser und Kräuter der Saatgutmischungen. Aufgrund dessen konnten, eine vergleichsweise geringe Vitalität und ein geringer Deckungsgrad am Standardbaums substrat festgestellt werden.

Im Gegensatz zu den technischen Substraten, weist der Oberboden eine deutlich niedrigere Tragfähigkeit ($4,0 \text{ MN/m}^2$) auf. Dies birgt die Gefahr, dass dieser durch beispielsweise das Begehen von Personen oder im Zuge von Mäharbeiten zunehmend verdichtet wird und die Infiltrationsleistung noch weiter abnimmt. Dies würde aufgrund der reduzierten Boden-Luft

Verbindung, trotz der derzeit hohen Wasserspeicherfähigkeit zu einer Reduktion der Pflanzenvitalität führen (Kozlowski, 1999).

Diese Unterschiede können auch bei Betrachtung der Gleichungen zur Berechnung der Evapotranspiration erkannt werden. Je nachdem unter welchen klimatischen und geologischen Begebenheiten diese geschaffen wurden, können bei veränderten Rahmenbedingungen keine korrekten Ergebnisse erzielt werden (Schrödter, 1985). Eine Übertragbarkeit auf andere Bedingungen, wie sie etwa in technischen Substraten vorzufinden sind, ist nicht möglich, da klassische Verdunstungsgleichungen auf natürlichen Böden erstellt wurden (Rana *et al.*, 2012; Valipour, 2012; Morel, Chenu und Lorenz, 2015). Dies konnte auch in Anbetracht der neu erstellten Gleichungen bestätigt werden. Für jedes in der Klimakammer getestete technische Substrat, wurden unterschiedliche Gewichtsverluste gemessen. Daraus ergeben sich für jedes dieser Substrate unterschiedliche Gleichungen. Diese variieren zusätzlich in Abhängigkeit einer allfälligen Bepflanzung. Je nach Art der Photosynthese (C3, C4 oder CAM) kommt es zu einer unterschiedlich hohen Wasserabgabe im Rahmen der Transpiration (Weiler, Nover und Nultsch, 2008). Im Rahmen des Versuches konnten deutliche Unterschiede zwischen den verwendeten Pflanzenarten *Sedum floriferum* (Photosynthesetyp CAM) und *Geranium x cantabrigiense* (Photosynthesetyp C3) dokumentiert werden. Wenn im Boden nicht ausreichend pflanzenverfügbares Wasser vorhanden ist, schließt die Pflanze die Spaltöffnungen und stellt die Wasserabgabe ein (Weiler, Nover und Nultsch, 2008). Bei einer geschlossenen Vegetationsdecke, liegt die Wasserabgabe durch 95 % bei der Transpiration vor (Fiedler, 2001). Sollte aufgrund von Trockenheit keine ausreichende Wassermenge mehr vorhanden sein, stellt die Pflanze die Wasserabgabe ein (Weiler, Nover und Nultsch, 2008). Durch das Bedecken der Bodenoberfläche stellt sich ein Mulcheffekt ein. Dieser kann dazu führen, dass die Evaporation um bis zu 80 % herabgesetzt wird (Papesch und Steinert, 1997). Durch die fehlende Bedeckung der Substratoberfläche, aufgrund des mäßigen Vorhandenseins einer Vegetationsdecke, verstärkt dies die schlechte Wasserspeicherfähigkeit des Standardbaumsubstrates somit zusätzlich. Bei den anderen Substraten kann die vorhandene Vegetation, aufgrund eines Einstellens der Transpiration während Trockenphasen als Mulchschicht fungieren.

Durch den Verlust an artenreichen Grünflächen, die Insekten als Lebensraum und Nahrungsquelle dienen, kommt es zu einem rapiden Rückgang an Insekten (Hallmann *et al.*, 2017; Sánchez-Bayo und Wyckhuys, 2019; Chemnitz und Gordon, 2020). Umso wichtiger erscheint es, diesem Negativtrend entgegenzuwirken. Durch artenreiche, strukturreiche und vielfältige Grünflächen kommt es im städtischen Kontext zu einer erhöhten Diversität der Fauna (Sattler, 2009; Obrist *et al.*, 2012). Um dies durch einfache Mittel zu erreichen, empfiehlt sich ein Ersetzen von artenarmen Standardrasenbegrünungen durch artenreiche Blumenrasen oder Blumenwiesen. Die für gewöhnlich verwendeten Standardrasenmischungen, wie im Rahmen dieser Arbeit verwendet, bestehen in der Regel aus nur wenigen unterschiedlichen Arten (Da Silva und Hendry, o.J.). In der betesteten Sickermulde wurden eine Blumenrasenmischung mit 34 Arten, sowie eine Blumenwiesenmischung mit 53 Arten ausgebracht und untersucht (Weiss, Minixhofer, Werner, *et al.*, 2021). Eine detaillierte Artenzusammensetzung der verwendeten Saatgutmischungen ist im Anhang der Publikation 3 „Alternative Engineered Soils and Seed Mixes Used in Seepage Troughs“ zu finden. Unter Berücksichtigung der Samenreife der verwendeten Arten, kann eine Selbstaussaat und Selbsterneuerung des Blumenrasens und der Blumenwiese erfolgen. Durch Anwendung eines intelligenten Mähkonzeptes, kann so das langfristige Bestehen durch Selbstregeneration der artenreichen Rasen- und Wiesengesellschaften erhalten bleiben (Jarvis, 2014; Neal, 2019; Sundermann, Whelan und Gaynor, 2020). Neben

dem langfristigen Bestehen der Pflanzengesellschaft kann durch Verwendung dieser beiden Saatgutmischungen und Anwendung des intelligenten Mähkonzeptes, die Pflege deutlich extensiver erfolgen, als bei der Standardrasenmischung. So wird der Blumenrasen nur jeden 2. Monat, die Blumenwiese gar nur 1-2x jährlich gemäht, während der Standardrasen zumindest 1x monatlich gemäht wird. Die hohe Artenvielfalt trägt außerdem zu einer Stabilisierung der Böschung der Sickermulden bei, da Flächen mit einer höheren Artenvielfalt ein deutlich geringeres Erosionsrisiko aufweisen, als Flächen mit nur wenigen Arten (Cyrill *et al.*, 2010). Neben einem Anlegen der Böschungsneigung von 2:3, wie es Larcher (2009) empfiehlt, kann dadurch ebenfalls ein Beitrag zum Erosionsschutz in Sickermulden geleistet werden.

Zusammenfassung

Es kann festgehalten werden, dass technische Substrate und natürliche Böden große Unterschiede aufweisen. Sowohl in der Berechnung der Evapotranspiration (klassische Verdunstungsgleichungen vs. neu erstellten Gleichungen), als auch im praktischen Einsatz in Sickermulden konnten deutliche Differenzen festgestellt werden. Unter den vorherrschenden Rahmenbedingungen in einer Stadt sind natürliche Böden nicht in der Lage die gewünschten und notwendigen Funktionen im ausreichenden Maße zu erfüllen. Aus diesem Grund sind in diesem Fall grundsätzlich technische Substrate zu empfehlen, wobei auch hier auf die notwendigen Eigenschaften geachtet werden muss. Als Beispiel kann das Standardbaumssubstrat genannt werden, das sich aufgrund der geringen Wasserspeicherfähigkeit für einen flächigen Einsatz in mit Gräsern und Kräutern begrünter Sickermulden nicht eignet. Um einen Beitrag zur Erhaltung und Steigerung der Biodiversität im urbanen Lebensraum zu leisten, empfiehlt sich eine Begrünung mit pflegeextensiven und artenreichen Blumenrasen- oder Blumenwiesenmischung, anstelle der bisher verwendeten artenarmen Standardrasenmischungen.

Daraus können die folgenden Kernaussagen abgeleitet werden:

- Es gibt deutliche Unterschiede hinsichtlich Verdunstungsleistung und Eignung für begrünte Sickermulden zwischen natürlich gewachsenen Böden und technischen Substraten.
- Klassische Verdunstungsgleichungen können für technische Substrate keine korrekten Ergebnisse liefern, weshalb eine Methode zur Erstellung einer Verdunstungsgleichung für technische Substrate mit bzw. ohne Bepflanzungen dargestellt wurde.
- In der praktischen Anwendung von technischen Substraten in einer Sickermulde, konnten klare Unterschiede zu der bisherigen Standardlösung (natürlicher Boden) aufgezeigt werden, die als ungeeignet eingestuft werden können.
- Sowohl im geotechnischen, als auch im vegetationstechnischen Monitoring konnten technische Substrate im Vergleich bessere Ergebnisse erzielen und sind daher grundsätzlich gegenüber der bisherigen Standardlösung zu bevorzugen.
- Maßgebende Eigenschaften von technischen Substraten für einen Einsatz in Sickermulden sind neben einer hohen Wasserspeicherfähigkeit gleichzeitig auch eine hohe Wasserdurchlässigkeit und ein hohes Porenvolumen. Aus diesem Grund

ist das Standardbaums substrat ebenfalls nicht für einen Einsatz in Sicker mulden zu empfehlen.

- Die artenreichen Saatgutmischungen von Blumenrasen und Blumenwiese leisten einen Beitrag zur Steigerung der Biodiversität, sind darüber hinaus resilient und pflegeextensiv, weshalb diese für zukünftige Einsätze gegenüber einer Standardrasenmischung bevorzugt werden sollten.

7 Ausblick und Limitationen

Die Schwerpunkte dieser Arbeit liegen auf der Findung einer Gleichung zur Bestimmung einer Ersteinschätzung der Evapotranspiration und ebenso der Eignung von technischen Substraten für Sickermulden, bilden – neben bereits bestehenden – nur zwei weitere wichtige Grundlagen, die für technische Substrate erforscht wurden. Für zukünftige Forschung gibt es jedoch noch zahlreiche weitere Aspekte (wie z.B. der Eignung für Gehölzpflanzungen oder dem Schadstoffrückhalt der ausgewählten technischen Substrate), die einer genaueren Betrachtung unterliegen sollten. Zudem können die beiden hier beschriebenen Schwerpunkte noch deutlich weiterentwickelt werden.

Die Verdunstungsgleichung aus dieser Arbeit beruht ausschließlich auf einer Variation der Lufttemperatur zwischen 11,7 °C und 35 °C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und einer täglichen 12-stündigen Beleuchtungsphase bei einer Stärke von 50 W/m². Gerade die Beleuchtungsintensität von 50 W/m² ist sehr gering und entspricht nicht einmal der Globalstrahlung eines trüben Wintertages (Weiss, 2017). Für Bedingungen außerhalb des dargestellten Bereiches können, bedingt durch das Versuchssetup keine validen Aussagen getroffen werden (Weiss, Minixhofer, Scharf, *et al.*, 2021). Daher sollten in Zukunft auch Betestungen mit Variationen in der relativen Luftfeuchtigkeit sowie der Beleuchtungsstärke durchgeführt und in der Gleichungserstellung berücksichtigt werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Substrate wurden aufgrund des Versuchssetups nur mit einschichtigem Aufbau eingebaut. Zweischichtige Substrateinbauten, wie bei den Versuchen in der Sickermulde oder bekannten Regenwassermanagementsystemen (Stockholm System), weisen damit eine wesentlich höhere Aufbaustärke auf, das die Vermutung eines geänderten Verdunstungsverhaltens nahelegt. Daher sollte zur Untersuchung weiterer Systemtypen bzw. Substratzusammensetzungen ein adaptiertes Versuchssetup etabliert werden (Weiss, Minixhofer, Scharf, *et al.*, 2021).

Mit der Betestung der begrüneten Sickermulde wurde ausschließlich ein System des Regenwassermanagements auf Tauglichkeit der entwickelten technischen Substrate analysiert. Regenwassermanagementsysteme, exemplarisch das duale System, in dem eine Entkoppelung des Abflusswassers erfolgt, bieten veränderte Standortbedingungen an denen eine Anwendung technischer Substratlösungen in Kombination mit unterschiedlichen Saatgutmischungen untersucht werden muss.

Sämtliche Untersuchungen an der Sickermulde beschränken sich ausschließlich auf einen Standort im Wiener Raum. Je nach Standort und klimatischer Zone, kommt es zu stark variierenden Bedingungen, die Einfluss auf die Ergebnisse haben. Dies führt dazu, dass unterschiedliche Belastungsintensitäten (Niederschlag, Lufttemperatur, Streusalz, etc.) der Sickermulde festgestellt werden. Neben der Fähigkeit technischer Substrate, sich unter diesen Bedingungen bewähren zu können, bedarf es auch einer standortabhängigen Anpassung der Artenzusammenstellung der Saatgutmischungen.

Nachdem es sich bei dieser Arbeit um Erstuntersuchungen zu diesen Themenbereichen handelt, konnten mehrheitlich Grundlagenerkenntnisse erlangt werden. Zusammenfassend können daher folgende Kernaussagen für eine Anwendung im Planungsalltag von Planerinnen und Planer identifiziert werden:

- Aufgrund der zahlreichen Limitationen und Erweiterungs- bzw. Vertiefungsmöglichkeiten der präsentierten Gleichung, kann die Berechnung der Verdunstung unter Verwendung der hier präsentierten Gleichungen nur als

Ersteinschätzung verwendet werden. Durch ein Verfeinern der Methode und dem Inkludieren mehrerer Parameter, können detailliertere Ergebnisse berechnet werden und so der Beitrag grün-blauer Infrastrukturen zur Kühlung quantitativ abschätzbar gemacht werden.

- Für einen Einsatz in begrüntem Sickermulden sollte auf technische Substrate mit hoher Durchlässigkeit und gleichzeitig hoher Wasserspeicherfähigkeit und einem hohen Porenvolumen zurückgegriffen werden. Zur Steigerung der Artenvielfalt und Reduktion der Pflegegänge empfiehlt sich das Ausbringen einer artenreichen Blumenrasen- oder Blumenwiesensaatgutmischung in zukünftigen Konzipierungen von Sickermulden.

8 Zusammenfassung – Summary

Durch die zunehmende Verstädterung und Versiegelung, sowie die immer stärker werdenden negativen Auswirkung des Klimawandels, wie Trockenperioden, Hitze und darauffolgender Starkregen wird grüner Infrastruktur (GI) in Städten immer größere Bedeutung beigemessen. Häufigere Starkregenereignissen führen zu einer deutlichen Zunahme der Niederschlagssummen in kürzerer Zeit. Bisherige Standardlösungen im Bereich des Regenwassermanagements, sind nicht dazu in der Lage diese Herausforderungen zu bewältigen.

Daher werden in dieser Arbeit technische Substrate für GI auf zwei für ihren Einsatz wesentliche Funktionen untersucht: a) die Verdunstungsleistung technischer Substrate, durch Erstellung einer Gleichung zur Berechnung der Evapotranspiration wird dargelegt; b) die Eignung ausgewählter technischer Substrate im Vergleich zu Standardlösungen werden für begrünte Sickermulden geprüft.

Es kann klar belegt werden, dass bisherige Gleichungen zur Berechnung der Verdunstung für eine Anwendung an technischen Substraten ungeeignet sind. Da diese nur korrekte Ergebnisse liefern, wenn sie unter jenen Bedingungen angewendet werden, unter denen sie entwickelt wurden. Durch Verwendung der präsentierten Methode kann für jedes technische Substrat mit bzw. ohne Bepflanzung eine einfache Gleichung für eine Ersteinschätzung der Evapotranspiration geschaffen werden. Im Einsatz ausgewählter technischer Substrate in einem Feldversuch in einer begrünten Sickermulde konnten klare Unterschiede zwischen den bisherigen Standardlösungen mit Oberboden und den technischen Substraten erkannt werden. Die Standardlösungen begrünt mit Standardrasen können nicht empfohlen werden, stattdessen weisen die neu konzipierten technischen Substrate in Kombination mit Blumenrasen und Blumenwiese im Vergleich dazu die besten Ergebnisse auf und eignen sich für zukünftige Anwendungen in Sickermulden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es große Unterschiede zwischen natürlichen Böden und technischen Substraten gibt. Dies zeigt sich sowohl in der Berechnung der Evapotranspiration (klassische Verdunstungsgleichungen vs. neu erstellten Gleichungen), als auch im praktischen Einsatz in begrünten Sickermulden. Unter den in einer Stadt vorherrschenden Rahmenbedingungen scheitern natürlich gewachsene Böden daran, die gewünschten und notwendigen Funktionen im ausreichenden Maße zu erfüllen. In diesem Fall sind technische Substrate grundsätzlich zu empfehlen, wobei auch hier auf die notwendigen Eigenschaften (hohe Wasserdurchlässigkeit, bei gleichzeitig hohem Porenvolumen und hoher Wasserspeicherfähigkeit) geachtet werden muss. Exemplarisch kann das Standardbaumssubstrat angeführt werden, welches sich aufgrund der geringen Wasserspeicherfähigkeit für einen flächigen Einsatz in mit Gräsern und Kräutern begrünten Sickermulden nicht eignet. Dieses wurde für einen flächigen Einsatz in Sickermulden, auch außerhalb der Bereiche der Baumpflanzung getestet. Um einen Beitrag zur Erhaltung und Steigerung der Biodiversität im urbanen Lebensraum zu leisten, bewährt sich eine Begrünung mit pflegeextensiven und artenreichen Blumenrasen- oder Blumenwiesenmischung, anstelle der bisher verwendeten artenarmen Standardrasenmischungen. Diese Arbeit liefert somit neue Grundlagen für einen wirkungsvollen Einsatz von technischen Substraten im Regenwassermanagement und soll wertvolle Grundlagen als Anknüpfungspunkte für Planerinnen und Planer bereitstellen.

9 Literaturverzeichnis der Rahmenschrift

- Amt der Kärntner Landesregierung (2019): Leitfaden zur Verbringung von Oberflächenwässern für das Bundesland Kärnten. Klagenfurt.
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2017): Leitfaden für Oberflächenentwässerung. Graz.
- Austrian Standards (2012): 'ÖNORM B2506-2: Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Teil 2: Qualitative Anforderungen an das zu versickernde Regenwasser sowie Anforderungen an Bemessung, Bau und Betrieb von Reinigungsanlagen'. Wien: Austrian Standards, S. 1–18.
- Austrian Standards (2013): 'ÖNORM B2506-1: Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Anwendung, hydraulische Bemessung, Bau und Betrieb'. Wien: Austrian Standards, S. 1–22.
- Bergman, M., Hedegaard, M., Petersen, M., Binning, P., Mark, O. und Mikkelsen, P. (2011): 'Evaluation of two stormwater infiltration trenches in central Copenhagen after 15 years of operation', *Water Science and Technology*, 63(10), S. 2279–2286. doi: 10.2166/wst.2011.158.
- Bernhardt, A., Karigl, B., Neubauer, M., Reisinger, H., Thaler, P. und Walter, B. (2016): *Aushubmaterialien - Materialien zur Abfallwirtschaft*. Wien.
- Chakraborty, T., Saha, S. und Reif, A. (2013) 'Decrease in available soil water storage capacity reduces vitality of young understory european beeches (*Fagus sylvatica* L.) – A case study from the black forest, Germany', *Plants*, 2(4), S. 676–698. doi: 10.3390/plants2040676.
- Chemnitz, C. und Gordon, D. (2020): *Insektenatlas - Daten und Fakten über Nütz- und Schädlinge in der Landwirtschaft*. Online: <https://www.global2000.at/sites/global/files/2020-Insektenatlas.pdf>. Stand: 26.10.2021.
- City of Portland (2009): *How to manage stormwater - Rain Gardens*. Portland. Online: <https://www.portlandoregon.gov/bes/article/188636>. Stand: 26.10.2021.
- Close, R., Kielbaso, J., Nguyen, P. und Schutzki, R. (1996): 'Urban Vs . Natural Sugar Maple Growth : li . Water Relations', *Journal of Arboriculture*, 22(4), S. 187–192. Online: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50803494/p0187-0192.pdf?1481300126=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUrban_vs_Natural_Sugar_Maple_Growth_II_W.pdf&Expires=1624446938&Signature=gzslPLyvf-kEfB5a5Y0iVJaxd2~SmNGOecNf7bUwOPn~W8YaCywltZE3U. Stand: 26.10.2021.
- Cyrill, M., Beeli, M., Alewell, C. und Körner, C. (2010): 'Interrill erosion at disturbed alpine sites: Effects of plant functional diversity and vegetation cover', *Basic and Applied Ecology*, 11(7), S. 619–626. doi: 10.1016/j.baae.2010.04.006.
- Dankers, R. und Hiederer, R. (2008): 'Extreme Temperatures and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario', *JRC Scientific and Technical Reports*, S. 1–66.
- Deeb, M., Groffman, P., Blouin, M., Perl Egendorf, S., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D., Walsh, D., Morin, T. und Séré, T. (2020): 'Using constructed soils for green infrastructure - Challenges and limitations', *Soil*, 6(2), S. 413–434. doi: 10.5194/soil-6-413-2020.
- Dellantonio, S. (2017): *Versickerungsfähige Pflanzbeete als Alternative zur konventionellen Regenwasserbewirtschaftung - Untersuchung und Bewertung von Wasserdurchlässigkeit und Speicherfähigkeit verschiedener Substratmischungen und deren Tauglichkeit für Bepflanzungen*. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

- Duble, R. (2004): Turfgrasses - Their Management and Use in the Southern Zone. 2. Auflage. Texas A&M University Press.
- DWA (2020): 'DWA-A 138-1: Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser - Teil 1: Planung, Bau, Betrieb'. Hefen.
- Ebrahimian, A., Wadzuk, B. und Traver, R. (2019): 'Evapotranspiration in green stormwater infrastructure systems', *Science of the Total Environment*, 688, S. 797–810. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.256.
- Ekwue, E. I. und Harrilal, A. (2010): 'Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils', *Biosystems Engineering. IAgRE*, 105(1), S. 112–118. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.10.001.
- Elhaus, D. (2015): Erosionsgefährdung - Informationen zu den Auswertungen der Erosionsgefährdung durch Wasser. Krefeld. Online: <https://www.gd.nrw.de/zip/erosionsgefaehrdung.pdf>. Stand: 26.10.2021.
- Embrén, B., Alvern, B., Stal, Ö. Und Orvesten, A. (2009): *Planting Pits in the City of Stockholm An Handbook*. Stockholm.
- Europäische Kommission (2013): *Green Infrastructure (GI) – Enhancing Europe's Natural Capital*. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52013DC0249>. Stand: 26.10.2021.
- Europäische Umweltagentur (2017): *What is green infrastructure?* Online: <https://www.eea.europa.eu/themes/sustainability-transitions/urban-environment/urban-green-infrastructure/what-is-green-infrastructure>. Stand: 26.10.2021.
- Fiedler, H. (2001): *Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten*. Renningen: Expert Verlag.
- FLL (2010): *Empfehlungen für Baumpflanzungen - Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen - Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate*. Bonn, Germany: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.
- Fohrer, N., Bormann, H., Miegler, K., Casper, M., Bronstert, A., Schumann, A. und Weiler, M. (2016): *Hydrologie*. 1. Ausgabe., UTB. Hrsg.: Nicola Fohrer. Bern: Haupt.
- Godyń, I., Grela, A., Stajno, D. und Tokarska, P. (2020): 'Sustainable rainwater management concept in a housing estate with a financial feasibility assessment and motivational rainwater fee system efficiency analysis', *Water*, 12(1), S. 1–22. doi: 10.3390/w12010151.
- Grimm, K., Doppler, B., Kubu, S. und Willerstorfer, C. (2013): *Regenwassermanagement - Nachhaltiger Umgang mit wertvollem Regenwasser*, Wiener Umweltschutzabteilung (MA 22). Online: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/regenwassermanagement.pdf>. Stand: 26.10.2021.
- Gyssels, G. und Poesen, J. (2003): 'The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates', *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(4), S. 371–384. doi: 10.1002/esp.447.
- Hallmann, C., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörren, T., Goulson, D. und De Kroon, H. (2017): 'More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas', *PLoS ONE*, 12(10). doi: 10.1371/journal.pone.0185809.
- Ishimatsu, K., Ito, K., Mitani, Y., Tanaka, Y., Sugahara, T. und Naka, Y. (2017): 'Use of rain gardens for stormwater management in urban design and planning', *Landscape and Ecological Engineering*. Springer Japan, 13(1), S. 205–212. doi: 10.1007/s11355-016-0309-3.

- Jarvis, D. (2014): Wildflower meadow: Creation and management in land regeneration, Best Practice Guidance for Land Regeneration. Farnham, Surrey.
- Kozłowski, T. (1999): 'Soil compaction and growth of woody plants', *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), S. 596–619. doi: 10.1080/02827589908540825.
- Kutschera, L. (1991): 'Short Review of the Present State of Root Research', *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*, 24, S. 1–8.
- Kutschera, L. und Lichtenegger, E. (1960): *Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen*. Frankfurt am Main: DLG-Verlags-GmbH.
- Kutschera, L., Lichtenegger, E. und Sobotik, M. (1997): *Bewurzelung von Pflanzen in den Verschiedenen Lebensräumen*. 5. Ausgabe. Linz: Botanische Arbeitsgemeinschaft am O.Ö. Landesmuseum. Online: https://www.zobodat.at/pdf/STAPFIA_0049_0001-0331.pdf. Stand: 26.10.2021.
- Larcher, H. (2009): *Planungshilfen für die Bemessung und Hinweise zur Sanierung von dezentralen Versickerungsanlagen für Niederschlagswasser*. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.
- Levine, B., Horne, D., Burkitt, L., Tanner, C., Sukias, J., Condrón, L. und Paterson, J. (2021): 'The ability of detainment bunds to decrease surface runoff leaving pastoral catchments: Investigating a novel approach to agricultural stormwater management', *Agricultural Water Management*. Elsevier, 243, S. 1–10. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106423.
- Morel, J., Chenu, C. und Lorenz, K. (2015): 'Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs)', *Journal of Soils and Sediments*, 15(8), S. 1659–1666. doi: 10.1007/s11368-014-0926-0.
- Murata, T. und Kawai, N. (2018): 'Degradation of the urban ecosystem function due to soil sealing: involvement in the heat island phenomenon and hydrologic cycle in the Tokyo metropolitan area', *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(2), S. 145–155. doi: 10.1080/00380768.2018.1439342.
- Neal, C. (2019): *Planting for Pollinators: Establishing a Wildflower Meadow from Seed*. Durham. Online: <https://extension.unh.edu/resource/planting-pollinators-establishing-wildflower-meadow-seed-fact-sheet>. Stand: 26.10.2021.
- Obrist, M., Sattler, T., Home, R., Gloor, S., Bontadina, F., Nobis, M., Braaker, S., Duelli, P., Bauer, N., Della Bruna, P., Hunziker, M. und Moretti, M. (2012) 'Biodiversität in der Stadt - für Mensch und Natur', *Merkblatt für die Praxis*, 48. Online: http://defragmentation.eu/pdf/WSL_Merkblatt_BiodiverCity_Sep2012.pdf. Stand: 26.10.2021.
- ÖWAV (2015) 'ÖWAV-Regelblatt 45: Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund'. Vienna: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), S. 1–48.
- Papesch, J. und Steinert, K. (1997): 'Mulch und Direktsaat im Mitteldeutschen Trockengebiet', *Landtechnik*, 52(3), S. 128–129. Online: <https://doi.org/10.1515/lt.1997.2539>. Stand: 26.10.2021.
- Prosser, I. und Dietrich, W. (1995): 'Field experiments on erosion by overland flow and their implication for a digital terrain model of channel initiation', *Water Resources Research*, 31(11), S. 2867–2876.
- Rana, G., Katerji, N., Lazzara, P. und Ferrara, R. (2012): 'Operational determination of daily actual evapotranspiration of irrigated tomato crops under Mediterranean conditions by one-step and two-step models: Multiannual and local evaluations', *Agricultural Water Management*. Elsevier, 115, S. 285–296. doi: 10.1016/j.agwat.2012.09.015.

- Sánchez-Bayo, F. und Wyckhuys, K. (2019): 'Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers', *Biological Conservation*, 232, S. 8–27. doi: 10.1016/j.biocon.2019.01.020.
- Sattler, T. (2009): *Biodiversity in urban landscape matrices: from species richness to functional community structure*. Universität Bern.
- Schrödter, H. (1985): *Verdunstung - Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden*. 1. Ausgabe., Hochschultext. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-70434-5.
- Da Silva, Y. und Hendry, L. (o.J.): *How to grow a lawn that's better for wildlife*. London. Online: <https://www.nhm.ac.uk/discover/how-to-grow-a-better-lawn-for-wildlife.html>. Stand: 26.10.2021.
- Stoffel, M., Stephenson, D. und Haywood, J. (2020): 'Antipyretic Medication for a Feverish Planet', *Earth Systems and Environment*. Springer International Publishing, 4(4), S. 757–762. doi: 10.1007/s41748-020-00182-6.
- Sundermann, A., Whelan, R. und Gaynor, B. (2020): *Practical advice on managing wildflower meadows*. Carriganore.
- Tejedor, M., Neris, J. und Jiménez, C. (2013): 'Soil Properties Controlling Infiltration in Volcanic Soils (Tenerife, Spain)', *Soil Science Society of America Journal*, 77(1), S. 202–212. doi: 10.2136/sssaj2012.0132.
- Uçar, Z., Akay, A. und Bilici, E. (2020): 'Towards green smart cities: Importance of Urban forestry and urban vegetation', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 44(4), S. 399–403. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-399-2020.
- Valipour, M. (2012): 'Ability of Box-Jenkins Models to Estimate of Reference Potential Evapotranspiration (A Case Study: Mehrabad Synoptic Station, Tehran, Iran)', *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 1(5), S. 01–11. doi: 10.9790/2380-0150111.
- Valipour, M., Bateni, S. und Jun, C. (2021) 'Global Surface Temperature : A New Insight', *Climate*, 9(5), S. 81. Online: <https://doi.org/10.3390/cli9050081>. Stand: 26.10.2021.
- VÖB (2018): *Sickermulde*, Verband Österreichischer Beton- und Fertigteilwerke. Online: <http://www.wasserwirtschaft.net/entwaesserunghochbau:sickermulde:start>. Stand: 26.10.2021.
- Voigt, A., Lampert, M. und Breuste, J. (2009): 'Anpassung an den Klimawandel als Aufgabe für eine ökologisch orientierte Stadtentwicklung', *SIR - Mitteilungen und Berichte*, 38, S. 181–190.
- Wang, X., Wang, X., Sun, X., Berlyn, G. und Rehim, A. (2020): 'Effect of pavement and water deficit on biomass allocation and whole-tree transpiration in two contrasting urban tree species', *Urban Ecosystems*. *Urban Ecosystems*, 23(4), S. 893–904. doi: 10.1007/s11252-020-00953-z.
- Weiler, E., Nover, L. und Nultsch, W. (2008): *Allgemeine und molekulare Botanik*. 1. Ausgabe. Stuttgart, Germany: Georg Thieme.
- Weiss, O. (2017): *Evapotranspiration von technischen Substraten*. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- Weiss, O., Minixhofer, P., Werner, N., Riedenbauer, S., Olesko, E., Lübke, K., Scharf, B. und Pitha, U. (2021): 'Alternative Engineered Soils and Seed Mixes Used for Seepage Troughs', *Land*, 10(11), 1152. Online: <https://doi.org/10.3390/land10111152>

- Weiss, O., Minixhofer, P., Scharf, B. und Pitha, U. (2021): 'Equation for Calculating Evapotranspiration of Technical Soils for Urban Planting', *Land*, 10(6), 622. Online: <https://doi.org/10.3390/land10060622>. Stand: 26.10.2021.
- Yang, F., Lau, S. und Qian, F. (2010): 'Summertime heat island intensities in three high-rise housing quarters in inner-city Shanghai China: Building layout, density and greenery', *Building and Environment*. Elsevier, 45(1), S. 115–134. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.05.010.
- Zhao, D., Lei, Q., Shi, Y., Wang, M., Chen, S., Shah, K. und Ji, W. (2020): 'Role of species and planting configuration on transpiration and microclimate for urban trees', *Forests*, 11(8). doi: 10.3390/f11080825.

10 Abbildungsverzeichnis der Rahmenschrift

Abbildung 1: Darstellung von den zugrundeliegenden Herausforderungen, den daraus abgeleiteten Zielen dieser Arbeit und Forschungsfragen, samt deren Ergebnisse (eigene Bearbeitung).....	21
Abbildung 2: Grafische Darstellung der Methode und Vorgehensweise für Erstellung einer Gleichung zur Berechnung der Evapotranspiration technischer Substrate mit bzw. ohne Bepflanzung (Weiss, 2019, eigene Bearbeitung).....	24
Abbildung 3: Grafische Darstellung der Methode und Vorgehensweise für Empfehlung geeigneter Aufbauten (Substrat und Saatgutmischungen) für einen zukünftigen Einsatz in Sickermulden im Bereich des nachhaltigen, urbanen Regenwassermanagement (eigene Bearbeitung).	26
Abbildung 4: Darstellung des Ausgangspunkts auf Basis der technischen Substrate und Entwicklung daraus entstandener Publikationen und Forschungsfragen in aufbauender Reihenfolge (eigene Bearbeitung).....	30

11 Publikationen

11.1 Publikation 1

Evapotranspiration of Technical Substrates

Methodology for Calculating Evapotranspiration of Technical Substrates

Journal of Ecological Engineering JEE (2019)

(Online: <https://doi.org/10.12911/22998993/112340> – Stand: 17.10.2021)

Evapotranspiration of Technical Substrates – Methodology for Calculating Evapotranspiration of Technical Substrates

Oliver Weiss^{1*}, Bernhard Scharf¹, Ulrike Pitha¹

¹ University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Department of Civil Engineering and Natural Hazards, Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction, Peter-Jordan Strasse 82, 1190 Vienna, Austria

* Corresponding author's e-mail: oliver.weiss@boku.ac.at

ABSTRACT

The existing formulae, like the well-known Penman-Monteith equation, used for calculating evapotranspiration are characterized by great differences concerning their results. These differences stem from the diversified climatic conditions and vegetation specifics during their development. Every formula of evapotranspiration only delivers 100% correct results, if it is used under the same climatic condition it was developed in. Therefore, a new method for calculating evapotranspiration via specific, but comparatively easily established formula was presented. After a theoretical introduction for illustrating some fundamental aspects for this work, the test setup and approach for creating these formulae are described in detail. The test set up considers typical climatic conditions and simulates, for example, the average temperature of Vienna, a summer day and an extremely hot day. While using a polynomial correlation, a formula for calculating evapotranspiration at any temperature is possible. For determining the evapotranspiration rate (in mm/m² per 24 hours day) due to the presented formula, only temperature, sort of vegetation and technical soil has to be defined. As a result, the relevance of this work is the presentation of a method to determine the evapotranspiration of any technical substrates (used for e.g. green roofs, façade greenery, indoor greenery, raingardens...) with or without any kind of vegetation, while using the created formula.

Keywords: water balance; evaporation; transpiration; equation; formula

INTRODUCTION

Water is probably the world's most important resource, which gains more and more importance in the arid parts of the world. At the moment, about one billion of people have insufficient access to drinking water. China, which holds about 20% of world's population, only provides about 5% of worldwide water supply (Watson 2014).

South Africa's capital Cape Town fights against a massive drought. Only a reduction to a water amount of 50 litres water per day will save people from closing the urban water system. Otherwise urban water system will be closed and people would have to get their daily water, with a maximum of 25 litres per day, from one of 200 distribution centres, managed by police and the military (National Geographic Partners 2018). In comparison, the daily use of drinking water

by the people in Luxembourg amounts to 20 litres (STATISTA 2016), the people in Austria use about 135 litres daily (Neunteufel, Richard, and Perfler 2012), while the people in America consume about 420 litres per day (STATISTA 2016).

Concerning plants, studies show that the mean evapotranspiration of turfgrass from May to October is between 4.6 and 5.6 mm/day (Peterson et al. 2017). It can be mentioned that sun flowers transpire about 1 litre per day during a summer day (Weiler, Nover, and Nultsch 2008).

Regarding the mentioned examples, it is obvious that the availability of water will be an increasing problem in the following years.

In order to evaluate the hydrological cycle and availability of water in a determined area, it is essential to have a formula for calculating evapotranspiration for the corresponding soil. The main problem in developing the formula is the multiplicity

of factors, which influence the evapotranspiration rate under different climatic conditions (Schrödter 1985). Especially the climatic, geological, and topographical characteristics (Schrödter 1985) as well as the influence of human formed soils (DVWK 1990) seem to have a great impact.

Advanced urbanization is one of the outcomes of the anthropogenic impact. Urban development has been practiced for years without taking care of the green infrastructure. Due to the permanent and current discussions on climate change, the green infrastructure gains higher importance in modern urban development. The use of green infrastructure is seen as a highly promising way to combat the increasing sealing of unbuilt soils and reduce the resulting negative impacts on microclimate (Voigt, Lampert, and Breuste 2009).

The current average temperature of Vienna is about 11.7°C (ZAMG 2016b); however, in the near future, the average temperature in cities will generally rise up (BMLFUW et al. 2016) and lead to a higher mean number of summer (Kuttler 2010), heat and desert days in cities. Furthermore the mean number of tropic nights will increase (ZAMG 2016a).

Kuttler (2010) defined a summer day as a day where the maximum air temperature in the course of a day reaches at least 25°C, whereas the temperature on a heat day reaches no less than 30°C (DWD 2016) and on desert days – at least 35°C (Wien Energie 2016). Tropic nights cover a period from 6 p.m. to 6 a.m., where the air temperature does not decline under 20°C (DWD 2016).

The specific habitat conditions for the plants in cities demand for special technical soils, the qualities of which cannot be satisfied with natural grown soils. These technical soils have to provide different kind of qualities to balance high water retention and sufficiently permeable to water and ensure sufficient supply with nutrients. Therefore, rooftop or facade greenery is a perfect example. Natural grown soils have much more weight, which turns out to be a real problem because of the limited carrying capacity of roofs and planting bowls fixed on the facade. Considering the different components, technical soils have the special feature to be adapted to any various habitats (Liesecke et al. 2004).

Due to a significant increase of the technical soils importance, it is necessary to gain insight into the evapotranspiration of technical soils themselves and include the plants growing in this sort of soil.

Evapotranspiration includes two processes, transpiration, which describes the transfer from the water in the plant to the atmosphere (Campbell and Norman 1998; Weiler, Nover, and Nultsch 2008) and evaporation which is the transfer from the soil water to the atmosphere (Campbell and Norman 1998). Both processes are combined in the already mentioned term evapotranspiration, but one has to keep in mind that transpiration and evaporation are two different physical aspects, which are described later on in chapter 2.1 (Campbell and Norman 1998).

The existing formulae for calculating evapotranspiration delivers unacceptable results for technical soils, because of the poor transferability of evapotranspiration equations, developed in natural grown soils. It is a well-known problem (Schrödter 1985, Valipour 2012, Rana et al. 2012); however, there are still no suggested formulae for calculating the evapotranspiration in technical soils.

As a result, the method for creating a formula for measuring the evapotranspiration in any technical soils, with or without any type of planting, was developed and described in detail. The presented method can be used for any type of soil or planting and any type of intended use.

MATERIAL AND METHODS

Figure 1 gives an insight in the used method of the process of creating those new formulae for calculating evapotranspiration in different technical soils with or without any type of planting.

The method of creating new formula for calculating evapotranspiration is based on four levels of knowledge (Knowledge of Description, Knowledge of Explication, Knowledge of Quality and Knowledge of Transformation) by von Spiegel (von Spiegel 2018). Knowledge of Description shows the topicality of an issue. Knowledge of Explication deals with the different correlations (von Spiegel 2018) (e.g. between Step I, Step II, Step III and the purpose of creating a new formula), whereas Knowledge of Quality continuously surveys the quality of argumentation and conclusion. Knowledge of Transformation finally leads to a suggestion for acting (von Spiegel 2018) (formula for calculating evapotranspiration).

First of all, an analysis of existing formulae was made. Therefore, a selection of the most popular formula for calculating evapotranspiration

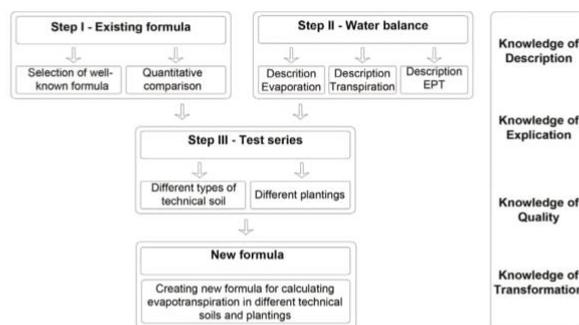


Fig. 1. Method of creating new formula for calculating evapotranspiration in different technical soils with or without any type of planting (Weiss 2018, von Spiegel 2018)

(e.g. Combination formula by Penman, Formula of radiation by Makkink) was taken. The chosen formula were compared with each other concerning their outcomes in calculating evapotranspiration, while using the same input parameters, like air temperature, wind speed, radiation. Another fundamental aspect was, to get a close insight into the water balance and the main processes of evaporation, transpiration and evapotranspiration.

Those two packages (existing formula and water balances) provide the initial position for the test series. During the test series, different types of technical soils and plantings were analysed due to their different results in evapotranspiration rate.

The three prepared packages (existing formula, water balance and test series) led to the development of new formula for calculating the evapotranspiration rate in different types of soils, with and without any plantings.

RESULTS

Water balance and test series for determining evapotranspiration rate were described in the following results concerning different formula for calculating evapotranspiration.

Step I – Selection of formula for calculating evapotranspiration

There is nearly an endless number of formulae for calculating evapotranspiration; however, they are all very time consuming in their use, because of the high amount of needed input. In order to allow quick and solid evaluation of evapotranspiration, a new

method for creating evapotranspiration formula is presented in the following section. A short insight in the existing formula for calculating evapotranspiration by using the following formula is given:

- Formula by Thornthwaite
- Formula by Blaney – Criddle
- Formula by Albrecht
- Formula by Haude
- Formula by Meyer
- Formula by Turc
- Formula of radiation by Makkink
- Combination formula by Penman

The design operations of the following formulae are extracted from Schrödters (1985) book of “Verdunstung – Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden” (Schrödter 1985).

Formula by Thornthwait

$$ETP [mm \text{ per day}] = 0.533 * f * \left(\frac{10 * Tm}{J}\right)^a \quad (1)$$

where: *ETP* – potential evapotranspiration (in mm/day)

f – correction factor (depending on duration of month and geographic latitude)

Tm – average month temperature (in °C)

a – coefficient (depending on type of climate)

J – heat index

Formula by Blaney – Criddle

$$ETP [mm \text{ per day}] = p * (0.457 * Tm + 8.128) \quad (2)$$

where: ETP – potential evapotranspiration (in mm/day)
 T_m – average month temperature (in °C)
 p – factor of maximum sunshine duration per day in percentage of annual sum

Extended formula of Blaney – Criddle

The difference to standard formula by Blaney – Criddle is that the a and b parameters are no absolute values and can be adapted to different locations.

$$ETP [mm \text{ per day}] = a + b * [p * (0.457 * T_m + 8.128)] \quad (3)$$

where: ETP – potential evapotranspiration (in mm/day)
 a – factor (influenced by different parameters)
 b – factor (influenced by different parameters)
 T_m – average month temperature (in °C)
 p – factor of maximum sunshine duration per day in percentage of annual sum

Formula by Albrecht

$$ETP [mm \text{ per day}] = 0.53 * (E_s - e) \quad (4)$$

where: ETP – potential evapotranspiration (in mm/day)
 E_s – saturation vapour pressure (in mm Hg)
 e – vapour pressure of average month (in mm Hg)

Formula by Haude

$$ETP [mm \text{ per day}] = f * (E_{s14} - e_{14}) \quad (5)$$

where: ETP – potential evapotranspiration (in mm/day)
 f – proportionality factor for annual length of day (in mm/mbar)
 E_{s14} – saturation vapour pressure measured at 2:00 p.m. CET (in mbar)
 e_{14} – vapour pressure measured at 2:00 p.m. CET (in mbar)

Formula by Meyer

$$ETP [mm \text{ per day}] = 0.5 * (E_s - e) * (1 + 0.224 * u) \quad (6)$$

where: ETP – potential evapotranspiration (in mm/day)
 E_s – saturation vapour pressure (in mm Hg)
 e – vapour pressure of average month (in mm Hg)
 u – wind velocity of average month (in m/sec)

Formula by Turc

$$ETP [mm \text{ per day}] = 0.0133 * \frac{T_m}{T_m + 15} * [Ra * (10.54 + 36.31 + \frac{n}{N}) + 50] \quad (7)$$

Location: 48° north latitude, maximum sunshine duration $N = 14.3$ h/day
 Evapotranspiration equivalence of extra-terrestrial radiation: $Ra = 14.33$ mm/day
 Average month temperature: $T_m = 16.5$ °C
 Average month relative humidity: $RH_m = 68$ %
 Average month sunshine duration: $n = 9.0$ h/day

Formula of radiation by Makkink

$$ETP [mm \text{ per day}] = -0.3 + b * \frac{s}{s + \gamma} * R_s \quad (8)$$

where: ETP – potential evapotranspiration
 b – constant, received out of relation between average month relative humidity and average month wind velocity
 s – Rise in saturation vapour pressure in as a function of temperature
 γ – Psychrometric constant
 R_s – total radiation

Combination formula by Penman

$$ETP [mm \text{ per day}] = c * [\frac{s}{s + \gamma} * R_n + (1 - \frac{s}{s + \gamma}) * (E_s - e) * 0.27 * (1 + \frac{u}{100})] \quad (9)$$

where: ETP – potential evapotranspiration
 c – correction factor for central European climate as a function of average month wind velocity and total radiation

s – Rise in saturation vapour pressure in as a function of temperature
 γ – Psychrometric constant
 E_s – Saturation vapour pressure (in mm Hg)
 e – average month vapour pressure
 u – average fetch length in an height of 2 m (in km/day)

Quantitative comparison of most popular formula:

Using the presented formula for calculating evapotranspiration while using the same inputs (air temperature, wind speed, air moisture, radiation,...), great differences in their output can be shown, as it is drawn in Table 1.

There are many other scholars, who tried to put evapotranspiration rate into a working formula. Concerning their results, there is also a wide discrepancy, which has been determined in many other papers before (Fernandes et al. 2012; Pandey, Dabral, and Pandey 2016). However, all of these formulae use natural grown soils including a short grass sod or agricultural plants as reference (Schrödter 1985). Therefore, the existing formulae cannot be used for technical soils including different kind of plantings.

Thus, the idea of this test series was to gain an insight into evapotranspiration while measuring the weight on load cells in a climate chamber. The difference in weight from the first and highest to the last and lowest measuring data on the load cells, within a 24-hour day, describes the evapotranspiration of a certain technical soil in a determined climatic scenario. By changing the level of air temperature, while using the same sort of technical soil, the results of evapotranspiration are obtained for different temperature scenarios. Using a polynomial trend line to combine the collected results, evapotranspiration (in mm/m² per 24 hours day) can be calculated for any temperature. In the following section, the test series is explained in detail. Before starting description of the test series, some fundamental aspects of water balance are presented.

Step II – Water balance

Water balance is the simplified sum of all inputs and losses of water in a system (Campbell and Norman 1998).

The basic formula for water balance is the water balance formula as it is described in FOHRER et al. (Fohrer et al. 2016):

$$P = ET + Q + \Delta S \quad (10)$$

where: P – Precipitation
 ET – Evapotranspiration
 Q – Water runoff
 ΔS – Changing in water balance (reserve – exhaustion)

As far as water runoff is concerned, one can distinguish between the water runoff of different soil layers. There is surface water runoff, interflow and groundwater runoff. The surface water runoff takes place above ground, the interflow water runoff above water bearing and the groundwater runoff in water bearing layers (Bormann 2013). The change in water balance is the difference between reserve and exhaustion and can be positive or negative, depending on the particular location (Fohrer et al. 2016; Schöninger and Dietrich 2016).

The importance of processes concerning evapotranspiration is underlined in the following.

Transpiration

Transpiration describes the loss of water through surface parts of plants, mainly leaves (Tracy 2004). It can be distinguished between cuticular transpiration and stomata transpiration (Weiler, Nover, and Nultsch 2008).

Cuticular transpiration is the one of minor importance. Primarily, it depends on the environmental conditions, the condition of swelling of cuticular and water deficit in leaves (Ruhland 1956). Plants with no protective mechanism to water loss show a cuticular transpiration of about 10% of the entire transpiration (Mohr and Schopfer 1995), whereas xerophytes reduce the cuticular transpiration, due to different adaptations to hot climate, to about 0.1% of their whole transpiration (Weiler, Nover, and Nultsch 2008).

Stomata transpiration has a higher impact on transpiration; 90% of entire transpiration is done via stomata transpiration (Hopkins and Hüner 2009), if stomata of plants are opened. Stomata open to absorb CO₂ and emit water at the same time. When there is no water available, stomata are closed and nearly no water is lost. This occurs mainly during midday, when transpiration on hot days reaches its maximum. This part of transpiration depends on the special adaptations to the environmental conditions and plant internal processes. In order to get insight into the transpiration height a sunflower transpires, if there is enough water consumption possible, about one litre per day on a warm and dry day (Weiler, Nover, and Nultsch 2008).

Table 1. Overview of wide ranges in results of some different formula for calculating evapotranspiration rate (Weiss 2017)

Formula	ETP in mm/day	ETP in mm/month (August)
Formula by Thornthwaite	3.37	104.49
Formula by Blaney – Criddle (Western USA)	5.01	155.43
Formula by Blaney – Criddle (Central Europe)	3.26	101.16
Extended formula by Blaney – Criddle	4.54	140.73
Formula by Albrecht	2.03	62.85
Formula by Haude	3.15	97.77
Formula by Meyer	3.03	93.82
Formula by Turc	3.67	113.88
Formula of radiation by Makkink	3.99	123.59
Combination formula by Penman	3.95	122.41

Radiation (Pieruschka and Berry 2010), air temperature, air humidity and wind velocity are the main factors which mainly influence transpiration (Hanami 1974).

Evaporation

Evaporation describes the loss of water to the atmosphere on an open expanse of water or fallow soils (Schrödter 1985). SCHRÖDTER (1985) (Schrödter 1985) describes three main influencing factors to evaporation:

- Meteorological parameters
- Biochemical parameters
- Landscape specific parameters

The meteorological parameters are total radiation, air temperature, air humidity and wind velocity (Schrödter 1985). The main biochemical parameters are the water content of soils (W. Brown 1912), the height of the groundwater level (Balugani et al. 2017) and the type of soil (Kodur 2017).

The landscape specific parameters are topography, vegetation and environmental structures (Schrödter 1985). Depending on exposition, density of vegetation and environmental structures, there are different climatic conditions, which influence evaporation.

Evaporation on soils abundantly covered with vegetation, represents about 5 % of total evapotranspiration (Fiedler 2001).

Evapotranspiration

Evapotranspiration is the sum of water exchange between plant and atmosphere (transpiration) as well as soil and atmosphere (evaporation) (Lawrence et al. 2007). The main difference between transpiration and evapotranspiration is the

way water is taken from soil to atmosphere (P. Brown 2000).

Evapotranspiration can be distinguished as:

- Real Evapotranspiration
- Potential Evapotranspiration

Real Evapotranspiration describes the demand of evapotranspiration of the atmosphere, which cannot be satisfied due to absence of water (DVWK 1990).

Potential Evapotranspiration is the theoretical maximum of evapotranspiration (DVWK 1990). It is the height of evapotranspiration, which would appear on an area partly covered with vegetation, with unlimited water supply. The ICID (International Commission of Irrigation and Drainage) also considers the predominant meteorological, soil physical, vegetation specific and horticultural requirements as important (Schrödter 1985).

Step III – Test series for determining evapotranspiration rate

In the first test series, three load cells made of aluminium, with a surface area of 40 x 40 cm and a thickness of 8 mm, are used for recording the changes in weight. During the whole test series, the used precision of load cells was adjusted in grams. Data of the load cells were measured in 10 second intervals and were formed to a mean value in intervals of 1 minute. The data were saved on a data logger every minute (Campbell CR1000) and can be downloaded by a specific read out software.

Before using these load cells in the climate chamber, they have to be calibrated by putting, in that case six, different weights (0.00 kg, 0.15 kg, 0.50 kg, 1.50 kg, 5 kg and 10 kg) on it. Using these five different weights, a regression line can be created, which allows an automatic transformation

of data measured (in mV), in weights (in kg) to a read out software.

In order to obtain some more information, air temperature, relative air humidity, wind velocity, soil moisture and soil temperature were measured as well and the data were collected on a separate data logger (Em50 by Decagon Devices) in an interval of 1 minute. For measuring relative air humidity, air temperature and wind velocity, a hygrometric and an anemometric ultrasound based (Decagon Devices 2017) sensor (VP-4 Temperature & Humidity/DS-2 Sonic Anemometer by Decagon Devices) were used. Soil moisture and soil temperature were measured after the volumetric based (Decagon Devices 2017) sensor (5TM by Decagon Devices) was calibrated to the in the test series used sort of technical soil.

A hygrometer was installed at a height of 80 cm, whereas the anemometer was fixed 10 cm above at a height of 90 cm (Fig. 2). Fig. 2 also gives an insight into the climate chamber including the three used load cells and the three soil moisture sensors.

Beside the technical parts of the test series, there are also the plant containers which have to be prepared. The plant containers with a volume of 10 litres (C10), were filled with different technical soils and plants. On the bottom of the container a fleece (100 g/m²) prevented the soil from being flushed out. Three containers of every used technical soil were filled with non-planted soils, each three were filled with technical soils and C3 plants and each three containers were filled with technical soils and CAM plants.

The difference between the C3 plants and CAM plants was the handling with water during

the photosynthetic process. The CAM plants need much less plants than the C3 plants, which is seen in the coefficient of transpiration. The coefficient of transpiration of the C3 plants is about 800, of C4 plants about 350, whereas it is about 30–50 for the CAM plants (Weiler, Nover, and Nultsch 2008). Moreover, the optimum temperature is diverse for the three different photosynthetic types. The C3 plants have an optimum temperature between 15–20°C, C4 plants between 30–40°C (Heinrich Heine University 2016) and CAM plants between 20–35°C (Weiler, Nover, and Nultsch 2008).

The cause for the three different types of filled containers is that this experimental set-up enables to create a formula for the unplanted technical soils, for the technical soils with C3 plants and for the technical soils with CAM plants. Table 2 gives an overview of the different combinations of the filled 10 litres plant containers.

During the tests in the climate chamber, all soil combinations should be stored temporarily in an air conditioned glass house with constant temperatures of about 20°C, due to the different optima in the temperature of C3 and CAM plants (Weiler, Nover, and Nultsch 2008), to keep their vitality constant.

The test set-up is described in Table 3 in detail. Scenario I simulates an air temperature of 11.7°C, the average temperature of a city like Vienna (ZAMG 2016b). Scenario II offers a temperature of 25°C, which is the meteorology defined as a summer day (Kuttler 2010). A extremely hot day is analysed in scenario III using a temperature of 35°C (Orlik 2018). The relative air humidity is adjusted constant at 50% during the whole experiment. Radiation of sun light is also constantly



Fig. 2. Insight into the climate chamber with the three used load cells, three soil moisture sensors and the fixed hygrometer in a height of 80 cm and the anemometer installed in a height of 90 cm (Weiss 2017)

simulated in the time from 06:00 a.m. to 06:00 p.m. (CET). The illumination level of the used illumination in the climate chamber was defined in another test series. The illumination level was measured on the different points and the result was a value of 230 $\mu\text{mol}^2/\text{s}$. In order to convert this value, a scaling factor of 4.6 is needed, so that a total radiation of 50 W/m^2 is reached (Nolz 2017). Temperature, relative air humidity and time of illumination of the climate chamber were controlled by external software.

The description of test procedure is quite simple. Each of the soil combinations, positioned on a load cell, stays in the climate chamber for exact 24 hours. After 24 hours, the next three soil combinations replace the existing ones. After 7 days, another temperature is chosen until every scenario is simulated. The selection of soil combination follows the principle of Table 4. After a soil combination was tested three times at scenario I and any soil combination was combined with each other, which is necessary to eliminate reciprocal effects, test series were continued with scenario II and scenario III in the same way.

Before changing the soil combinations on the load cells, the data were downloaded from data loggers. Another procedure, which has to be done every time before putting the soil combinations on the load cells, was to maximum saturate the soils. This was done based on "Dachbegruenungsrichtlinien – FLL 2018" (FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. 2018). On the basis of having many experiences with the behaviour of technical substrates, the procedure was slightly modified. Each soil combination was located in a water bath for two hours, which covered the soil surface for about 5 cm. Afterwards, the soils had to drip off for another two hours. After the whole procedure, which lasted four hours, plant containers were placed on the load cells in the climate chamber. Soil moisture sensors were inserted into the plant containers with a distance of 2 cm to the edge (Keller 2018) of the plant containers to minimize the contour effects.

The used soil combinations were sufficiently watered and again stored temporarily in an air conditioned glass house, until the next application

Table 2. Overview of the different combinations of with technical soils filled 10 litres plant containers. Each technical soil was filled into three containers with no plants, three containers of each used soil were filled with C3 plants and each three containers were filled with CAM plants (Weiss 2017)

Repetitions	Combination of different technical soils					
	A _A	A1 _A	A2 _A	B _A	B1 _A	B2 _A
	A _B	A1 _B	A2 _B	B _B	B1 _B	B2 _B
	A _C	A1 _C	A2 _C	B _C	B1 _C	B2 _C

Table 3. Detailed description of test procedure subdivided into three scenarios (Weiss 2017)

Scenario	I	II	III
Space of time	7 days	7 days	7 days
Temperature	11.7 °C	25 °C	35 °C
Relative air humidity	50 %	50 %	50 %
Time of illumination	06:00 a.m. – 06:00 p.m.	06:00 a.m. – 06:00 p.m.	06:00 a.m. – 06:00 p.m.

Table 4. Principle of combinations of different technical soils in scenario I (11,7 °C), scenario II (25 °C) and scenario III (35 °C) (Weiss 2017)

Repetitions	Temperature	Combinations of different technical soils						
		A _A	A _B	A _C	A1 _B	B _C	B2 _A	B1 _A
11.7 °C	25 °C	A1 _A	B _A	B1 _B	B _B	B1 _C	A1 _A	A1 _C
		A2 _A	B1 _A	B2 _A	B2 _B	B2 _C	A2 _C	A2 _B
		A _A	A1 _B	A1 _C	A2 _A	B _C	B _A	A2 _C
	35 °C	B _A	B _B	B1 _C	B1 _A	A _B	A _C	A1 _B
		B2 _B	B1 _B	B2 _C	B2 _A	A1 _A	A2 _B	B _B
		B _B	A2 _A	A2 _B	B2 _C	B2 _A	B1 _A	B1 _C
A1 _B	B _C	B _A	A _A	A _B	A _C	A _B		
	A2 _C	B1 _B	B2 _B	A1 _A	A2 _B	A2 _A	A1 _C	

Table 5. Listing of all measuring parameters including the corresponding measuring units during the test series in the climate chamber (Weiss 2017)

Measuring parameters	Measuring unit
Air temperature	°C
Relative air humidity	%
Wind velocity	m/s
Weight on load cells	kg
Soil moisture	Vol.-%
Temperature in technical soils	°C
Time of illumination	Hours
Illumination level	W/m ²

in the climate chamber. Finally, Table 5 gives an overview of any measured data during the test series, which are all included in the formula for calculating evapotranspiration of technical soils.

Summing up, the methodology of creating a new formula for evapotranspiration is based on Knowledge of Description, Knowledge of Explication, Knowledge of Quality and Knowledge of Transformation described by von Spiegel (2018) (von Spiegel 2018). The four levels of knowledge are transformed into the methodology for creating new formula, as it is described in Figure 1.

CONCLUSIONS

There are still some other approaches which follow the idea of measuring evapotranspiration, while using load cells (Tan et al. 2015), although there is no formula for calculating the evapotranspiration in technical soil considering different climate scenarios.

The formula with corresponding interpretations will be presented in another article. For that reason, only some fundamental critical aspects of test series were described now in detail. Additionally, feedback and evaluation of the differences in the results of the existing formulae and the new created formula was given.

Using this method for determining the evapotranspiration rate of technical soils, evapotranspiration was correctly described for the weather conditions of 11.7°C, 25°C and 35°C. Any other temperature was determined, using a polynomial correlation; however, there is a high adaption of formula to the measured evapotranspiration data during the experimental series ($R^2=0.9$). Furthermore, it should be noted that 11.7°C is the average temperature of Vienna (ZAMG 2016b), 25°C describes a summer day and 35°C presents

a desert day – all three chosen temperatures are very relevant because of the predominant urban conditions in the use of technical soils.

In a following article, the formula for calculating the evapotranspiration will be presented, including a direct comparison to existing formula, like the well-known Penman-Monteith equation. Furthermore, a relation between evapotranspiration, leaf area index (LAI), cubic volume, type of photosynthesis and different technical soils will be established to achieve a complete overview of this topic.

REFERENCES

- Balugani E. et al. 2017. Groundwater and Unsaturated Zone Evaporation and Transpiration in a Semi-Arid Open Woodland. *Journal of Hydrology* 547: 54–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.042>.
- Bmlfuw et al. 2016. Klimaszenarien Für Das Bundesland Wien Bis 2100. <https://www.bmlfuw.gv.at/dam/jcr:37b2b12b-dbe3-4057-a8ae-38339ad7a1d3/Factsheet-Wien.pdf>.
- Bormann H. 2013. Hydrologie: Der Wasserkreislauf. <http://www.hydrologie.uni-oldenburg.de/einbit/11829.html>.
- Brown P. 2000. Basics of Evaporation and Evapotranspiration. The University of Arizona Cooperative Extension: 1–4. <http://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1194.pdf>.
- Brown W. 1912. The relation of evaporation to the water content of the soil at the time of wilting. *The Plant World* 15(6): 121–34.
- Campbell G.S. and Norman J.M. 1998. An Introduction to Environmental Biophysics. New York: Springer.
- Decagon Devices. 2017. Measure the Soil-Plant-Atmosphere Continuum.
- DVWK. 1990. Grundlagen Der Verdunstungsermittlung Und Erosivität von Niederschlägen. Hamburg, Berlin: Paul Parey.
- DWD. 2016. Klimatologische Kenntage.
- Fernandes L.C., Paiva C.M., Corrêa O., Filho R. 2012. Evaluation of six empirical evapotranspiration equations – case study: Campos Dos Goytacazes / RJ Universidade Federal Do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil (UFRJ/COPPE), Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 27(3): 272–80.
- Fiedler H. 2001. Böden Und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften Und Ballungsgebieten. Renningen: Expert Verlag.
- FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. 2018. Dachbegrünungsrichtlinien.

13. Fohrer N. et al. 2016. Hydrologie. Bern: UTB GmbH.
14. Hanami Y. 1974. Effect of Environmental Factors upon Transpiration. ISHS Acta Horticulturæ 39.
15. Heinrich Heine University. 2016. Blatt Anatomie Der C4-Pflanzen.
16. Hopkins W. and Hüner N. 2009. Introduction to Plant Physiology. 4th ed. John Wiley & Sons.
17. Keller T. 2018. Written Information about Sensor Measurements, Sales, METER GROUP AG.
18. Kodur S. 2017. Improving the Prediction of Soil Evaporation for Different Soil Types under Dryland Cropping. Agricultural Water Management 193: 131–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.016>.
19. Kuttler W. 2010. Das Ruhrgebiet Im Wandel – Bestandsaufnahme Und Prognose. UNIKATE 38: 41–51. https://www.uni-due.de/~bys007/ressourcen/pdf_dokumente/38/unikate_38_04.pdf.
20. Lawrence D.M., Thornton P.E., Oleson K.W., Bonan G.B. 2007. The Partitioning of Evapotranspiration into Transpiration, Soil Evaporation, and Canopy Evaporation in a GCM: Impacts on Land–Atmosphere Interaction. Journal of Hydrometeorology 8(4): 862–80. <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JHM596.1>.
21. Liesecke H.J., Henz A., Pustal W., Brenneisen S. 2004. EFB-FBB-Gründachsymposium Dachbegrünungen Als Ausgleichsfläche Überbauter Natur.
22. Mohr H. and Schopfer P. 1995. Plant Physiology. Berlin, Heidelberg: Springer.
23. National Geographic Partners. 2018. Why Cape Town Is Running Out of Water, and Who's Next. <https://news.nationalgeographic.com/2018/02/cape-town-running-out-of-water-drought-taps-shutoff-other-cities/>.
24. Neunteufel R., Richard L., Perfler R. 2012. Wasserverbrauch Und Wasserbedarf. Report: 252.
25. Nolz R. 2017. Verbal Information to the Topic of Illumination in the Used Climate Chamber, Senior Scientist of University of Natural Resources and Life Sciences Vienna.
26. Orlik A. 2018. Written Information about Definition of Climatic Characteristics, Section Climatology, Division Customer Service, ZAMG – Zentralanstalt Für Meteorologie Und Geodynamik.
27. Pandey P.K., Dabral P.P., Pandey V. 2016. Evaluation of Reference Evapotranspiration Methods for the Northeastern Region of India. International Soil and Water Conservation Research 4(1): 52–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.02.003>.
28. Peterson K.W., Bremer D.J., Shonkwiler K.B., Ham J.M. 2017. Measurement of Evapotranspiration in Turfgrass: A Comparison of Techniques. Agronomy Journal 109(5): 2190–2198.
29. Pieruschka R. and J.A. Berry, 2010. The Control of Transpiration by Absorbed Radiation. Proceedings of the National Academy of Sciences 12(30): 2010.
30. Rana G., Katerji N., Lazzara P., Ferrara R.M. 2012. Operational Determination of Daily Actual Evapotranspiration of Irrigated Tomato Crops under Mediterranean Conditions by One-Step and Two-Step Models: Multiannual and Local Evaluations. Agricultural Water Management 115: 285–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.09.015>.
31. Ruhland W. 1956. Handbuch Der Pflanzenphysiologie – Band III Pflanze Und Wasser. III. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer.
32. Schöninger M. and Jörg D. 2016. Komponenten Des Wasserhaushalts. http://www.hydroskript.de/html/_index.html?page=/html/hykp0201.html (January 2, 2017).
33. Schrödter H. 1985. Verdunstung – Anwendungsorientierte Meßverfahren Und Bestimmungsmethoden. Heidelberg: Springer.
34. von Spiegel, Hiltrud. 2018. Methodisches Handeln in Der Sozialen Arbeit. 6th ed. Munich: Ernst Reinhardt Verlag Munich.
35. STATISTA. 2016. Jährlicher Pro-Kopf-Wasserverbrauch in Ausgewählten Ländern Weltweit Im Jahr 2013. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/6378/umfrage/wasserverbrauch-in-ausgewaehlten-laendern/>.
36. Tan, Chun Liang, Nyuk Hien Wong, Jusuf S.K., Zhi Quan Chiam. 2015. Impact of Plant Evapotranspiration Rate and Shrub Albedo on Temperature Reduction in the Tropical Outdoor Environment. Building and Environment 94(P1): 206–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.001>.
37. Sterling T. 2004. Transpiration – Water Movement through Plants.
38. Valipour M. 2012. Ability of Box-Jenkins Models to Estimate of Reference Potential Evapotranspiration (A Case Study: Mehrabad Synoptic Station, Tehran, Iran). IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science 1(5): 01–11. <http://www.iosrjournals.org/iosr-javs/papers/vol1-issue5/A0150111.pdf>.
39. Voigt A., Lampert M., Breuste J. 2009. Anpassung an Den Klimawandel Als Aufgabe Für Eine Ökologisch Orientierte Stadtentwicklung. SIR – Mitteilungen und Berichte 38: 181–190.
40. Watson R. 2014. Krieg Um Wasser. Berlin, Heidelberg: Springer.
41. Weiler E.W., Nover L., Nultsch W. 2008. Allgemeine Und Molekulare Botanik. Stuttgart: Georg Thieme.
42. Wien Energie 2016. Einstieg in Die Kühlung & Klimatisierung. <https://www.wko.at/service/w/umweltenergie/Einstieg-Kuehlung-Klimatisierung.pdf>.
43. ZAMG. 2016a. Neues Hitzetool Für Niederösterreich. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/news/neues-hitzetool-fuer-niederosterreich-1>.
44. Witterungsübersicht Für Das Jahr 2015. <http://www.zamg.ac.at/zamgWeb/klima/klimaruueckblick/archive/2015/wiewars15.pdf>.

11.2 Publikation 2

Equation for Calculating Evapotranspiration of Technical Soils for Urban Planting

Land MDPI (2021)

(Online: <https://doi.org/10.3390/land10060622> – Stand: 17.10.2021)

Article

Equation for Calculating Evapotranspiration of Technical Soils for Urban Planting

Oliver Weiss ^{*}, Pia Minixhofer ^{*}, Bernhard Scharf and Ulrike Pitha ^{*}

Department of Civil Engineering and Natural Hazards, Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction, University of Natural Resources and Life Sciences, Peter-Jordan-Strasse 82, A-1190 Vienna, Austria; pia.minixhofer@boku.ac.at (P.M.); bernhard.scharf@boku.ac.at (B.S.); ulrike.pitha@boku.ac.at (U.P.)

* Correspondence: oliver.weiss@boku.ac.at

Abstract: Equations for calculating evapotranspiration in technical soils show great differences regarding their results. Causes are the different climatic conditions and vegetation specifics during their development. Every equation of evapotranspiration only delivers 100% correct results if it is used under the same climatic condition as it was developed in. To determine the evapotranspiration, the loss of weight of different technical soils and plants was measured in a test series on load cells in a climate chamber. The result of these test series is the development of an easy-to-use equation. An equation for calculating evapotranspiration at any temperature is possible while using a polynomial correlation. To determine the evapotranspiration rate (in mm/m² per 24 h), only temperature, vegetation type, and technical soil have to be defined to obtain an output of evapotranspiration in mm/day. Using the well-known equation by Makkink, evapotranspiration in technical soils is 0.12 mm/day, whereas the newly developed equation calculates (1) 2.59–5.58 mm/day for the variant with no vegetation, (2) 3.15–4.00 mm/day for *Sedum floriferum*, (3) 4.40–4.55 mm/day for *Geranium x cantabrigiense*. The application of this equation will help to determine the evapotranspiration in chosen technical soils (used in the sector of rainwater management) with or without vegetation.

Keywords: evapotranspiration; green infrastructure; rainwater management; nature-based stormwater management; Vienna



Citation: Weiss, O.; Minixhofer, P.; Scharf, B.; Pitha, U. Equation for Calculating Evapotranspiration of Technical Soils for Urban Planting. *Land* **2021**, *10*, 622. <https://doi.org/10.3390/land10060622>

Academic Editors: Manfred Koehler and Daniel Kaiser

Received: 17 May 2021
Accepted: 9 June 2021
Published: 10 June 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The on-going climate crisis leads to an increase of heavy rainfall events and a higher risk of longer dry periods [1–3]. Although green infrastructure could cope with the intensified stormwater events, urban development has been practiced for years without including them [4]. Green infrastructures, such as bioswales or raingardens, are permeable and have a high impact on evapotranspiration, which influences the urban climate enormously [5–7].

Evapotranspiration can be described as the sum of water loss by soil surface (evaporation) and the water loss by plants (transpiration) [8]. The urban water cycle is heavily influenced by the high sealing rate and the decreasing infiltration capacity of the remaining open surfaces [9]. Heavy rainfall events hit the surface and spark fine particles, which cover the soil surface and change the soil structure [10]. In combination with the intensive input of many other external fine particles (e.g., tire wear particles from streets, sediments from close-by surfaces), the soil gets compacted [11]. The decreasing infiltration rate and higher surface water runoff [10] impacts further on the overall evapotranspiration rate.

To adapt to these extreme conditions, plantings in cities demand new solutions for technical soils with specific features concerning their composition. Technical soils, as defined for this article, are mineral planting substrates with characteristics of high infiltration rate, water absorption capacity, and pore volume [12,13]. These technical soils aim to be water permeable for many years without any decrease in infiltration rate [14] and are, therefore, often used for sustainable urban rainwater systems, ensuring the vital development of trees, shrubs, and perennials [12,15].

In standards for infiltration systems [16,17] and tree plantings [18], the infiltration rates for soils are described and regulated, but no information on the potential rate of evapotranspiration is available. Therefore, a very important field of application for evapotranspiration equations is rainwater management in urban areas. A large variety of different equations for calculating evapotranspiration exists, as already explained in-depth in the publication "Evapotranspiration of Technical soils—Methodology for calculating evapotranspiration of technical soils" [19]. Existing equations, such as the most famous combination equation by Penman [20], only delivers 100% correct results in conditions (such as vegetation, natural grown soil, climatic conditions, etc.) they were developed in. For technical soils, the provided results are not acceptable because of the poor transferability of evapotranspiration equations, which were all developed in natural grown soils [13,21,22].

Therefore, the creation of a new equation for technical soils is described in this publication. First, a test series was developed to assure the newly developed equation is applicable for different technical soils with or without vegetation. Then, the gained results were used to develop the new equation for the calculation of the evapotranspiration. To underline the relevance of the developed equation, the calculation was compared to the results of the well-known equation of radiation by Makkink (developed for natural grown soil). The results of this equation are specially determined for grass, which has no shortage of water [23]. In comparison to the well-known equation of Penman, the equation of radiation by Makkink is more easily applicable, due to the simpler measurements of the needed parameters. The equation of radiation by Makkink is an adaption of Penman's equation for Europe [24,25].

Evapotranspiration is influenced by transpiration of plant and evaporation of soil.

Solar radiation, air temperature, wind speed, and relative air humidity are the key factors influencing transpiration [26]. Up to a certain saturation point, photosynthesis increases with increasing irradiance. Depending on photosynthesis type and plant species, there are various differences in saturation points depending on air temperature and global radiation. The longer and higher radiation is available, the longer the plant can open its stomata and the gas exchange can take place. For photosynthesis to occur, a certain minimum temperature must be present. Generally, with the exception of specially adapted plants, the minimum temperature is around 0 °C. The higher the temperature rises, and provided that no other processes act as limiting factors, the more productive photosynthesis becomes. The evaporation chill caused by the transpiration of the plant can keep the temperature of the leaves up to 15 °C below the ambient air temperature [27]. The humidity of the atmosphere also plays a significant role in transpiration. Water vapor is diffused through the epidermis until the vapor pressure within the plant and the surrounding atmosphere is the same. Since the humidity in the atmosphere is usually much lower than that inside the plant, diffusion is only possible until the plant does not receive a water supply from the soil. Whether plant-available water prevails in the soil depends, among other things, on the binding forces in the soil. The capillary forces of the soil cavities, the surface forces of the soil colloids, and the osmotic forces of the nutrients dissolved in the soil play a major role. As water is consumed and the soil dries out, it becomes increasingly difficult for the plant to obtain water. In windy conditions, water vapor and dry air are carried away more quickly. Thus, there remains a persistently higher water vapor pressure. As mentioned above, the effect of wind can also be reduced by special adaptations. For example, by recessed stomata or stomata covered with trichomes [20].

Evaporation is influenced by meteorological, biochemical, and landscape-specific influencing factors. Meteorological parameters are the same, as explained above. Solar radiation, air temperature, wind speed, and relative air humidity significantly influence evaporation. Important biochemical parameters are the water content of the soil, depth of the groundwater surface, and the respective soil type. The soil type determines further soil physical properties [20]. Landscape-specific influencing factors include topography, vegetation, and surrounding structures. Depending on the exposure, vegetation density,

and surrounding structures of soils, soil surfaces are exposed to different climatic conditions. Thus, there is an influence and associated change in evaporation. The soil type determines further soil physical properties. Evaporation decreases as the soil dries out. There are clear differences between sandy and clayey soils. For example, the evaporation rate decreases faster in light sandy soils than in heavy loamy soils [20]. The reason for this is that in grainy soils, such as gravel or sandy soils, the surface dries quickly and the coarse soil material has a high hydraulic conductivity, which means that hardly any water can be supplied to the soil surface. Soils with a higher proportion of fine grains have a significantly lower hydraulic conductivity and thus store water much better than those with a high proportion of coarse grains. Depending on the grain size of the soil materials and the associated hydraulic conductivity, groundwater can reach the soil surface from different depths [28]. In vegetated soils with a closed vegetation layer, evaporation amounts to less than 5% of the total evapotranspiration [29]. The example presented profound and comprehensive knowledge that originates from research based on natural soils. Technical soils on the other hand do not match natural soils regarding many aspects, e.g., soil layers, grain size distribution, grain size composition, hydrologic properties, pore volumes, and biochemical properties. To enable the application of nature-based solutions in urban spheres as a measure to counteract the impact of global warming, it is necessary to transform the soil research-based knowledge to technical soils.

In this research work, we test the hypothesis that great differences in evapotranspiration between the equation of radiation by Makkink and the newly developed equation for evapotranspiration are expected.

The successful transformation of urban areas from grey to green needs profound planning and design. The knowledge of water demand of different plant species, the provision of water, and hydrologic properties of technical soils are core design parameters that need to be considered.

Thus far, no other work known to the authors dealt with the creation of an easily applicable equation for calculating evapotranspiration in technical soils. Many studies investigating the evapotranspiration properties of natural soils used load cells [30,31]. This approved methodology has been chosen for this research work, but the natural soil has been exchanged with technical soils. A comparison study showed that the radiation-based equations were found to perform best in calculating evapotranspiration because they are producing a similar pattern as the Penman–Monteith method [32]. Especially, the equation by Makkink was identified to perform best under the radiation-based ones under drier climatic conditions. It was found that the equations and their outcomes vary significantly depending on the climatic conditions of the region where they have been developed [20,32]. Accordingly, they cannot be easily applied in other climatic regions.

Therefore, easily applicable equations were created to determine evapotranspiration for different technical soils and plants and compared to the also comparatively easily applicable Makkink equation. The newly developed equations may be adapted to different required climatic conditions and technical soils, while using the proposed method.

2. Materials and Methods

Three main steps were necessary to create the new equation for calculating evapotranspiration. The first and second step were described in a previous paper by Weiss et al. [19]. Information about test set-up and the test series in the climate chamber were described in detail. A short overview of the information given in the previous paper, will be presented in Sections 2.1 and 2.2.

In this article, we built on these results and developed in the third step the equation itself. Therefore, a selection of well-known equations was taken, and their results were compared. A comparative analysis of the basics of evaporation, transpiration, and evapotranspiration revealed the different influencing factors on these three processes. Afterwards, a test series of different technical soils and plants on load cells in a climate chamber led to

the development of the new equation using polynomial trend lines for evapotranspiration of different technical soils and plants in various climate scenarios.

The test set-up, test series, and the development of the equations is described briefly in the following. Three repetitions were performed for each technical soil and plant in each of the three climate scenarios. Overall, there were nine values of evapotranspiration for each technical soil and plant, which were inserted in the polynomial trend line [19].

The process of evapotranspiration depends, as described above, on several framework conditions, e.g., air temperature, relative air humidity, type of photosynthesis, water provision. According to the fact that plant species reach saturation of photosynthetic performance, a linear or potential equation has been eliminated from consideration to calculate the evapotranspiration. Given the example of the soil moisture equation of capacitive sensors, the polynomial trend line has been chosen for the equations. Equations for soil moisture measurements are typically polynomial functions of second or third degree, depending on soil type. The polynomial trend line of second degree was used due to the least deviations within the measured results in evapotranspiration. However, representative values can only be expected between minimum and maximum air temperature of chosen climate scenarios simulated in the test series, due to the characteristics of polynomial trend lines.

2.1. Test Set-Up

The test set-up is already described in detail in the paper “Evapotranspiration of Technical soils—Methodology for calculating evapotranspiration of technical soils” [19]. Here, a short summary of the test set-up is given once more for a better understanding of the processes, which led to the equation for calculating evapotranspiration.

To develop an equation for calculating evapotranspiration, three important climatic scenarios were simulated in a climate chamber. Therefore, the relative air humidity was constantly at 50% and the radiation of sun light with an illumination level of 50 W/m^2 [33] was also constantly simulated from 06:00 a.m. to 06:00 p.m. (CET). The average temperature of a city such as Vienna ($48^\circ 12' \text{ N } 16^\circ 22' \text{ E}$ in oceanic climate), with 11.7° C , represents scenario I [34]. A meteorologically defined summer day with a temperature of 25° C is analyzed in scenario II [35]. Scenario III offers an extremely hot day with a temperature of 35° C [36].

The used plant containers contained a volume of 10 L and were filled with the desired technical soils. To prevent the soil from being flushed out, a fleece (100 g/m^2) surrounded the bottom of the containers. The test set-up consisted of three replicates for each combination of technical soils with and without vegetation. In this test series, some of the usually used C3 (*Geranium x cantabrigiense*) and CAM (*Sedum floriferum* ‘Weihestephaner Gold’) plants in raingardens were selected. The main difference of C3 and CAM plants is the type of photosynthesis (the optimum in temperature and the coefficient of transpiration) [27], as shown in Table 1.

Table 1. Overview of the type of photosynthesis of C3 and CAM plants with differences in optimum in temperature and coefficient of transpiration (based on Weiler et al., 2008 [27]).

Type of Photosynthesis	C3	CAM
Optimum in temperature	30–40 °C	20–35 °C
Coefficient of transpiration	<350	30–50

2.2. Test Series

In the climate chamber, load cells were located for recording changes in weight. The precision of load cells during the whole test series was in grams and data were measured in intervals of 10 s and formed to a mean value in intervals of 60 s. Technical data of the used load cells can be found in the following Table 2. Each of the soil combinations were positioned on a separate load cell and remained for exactly 24 h in the climate chamber. After 24 h, the next soil combination replaced the existing ones. Each soil combination was

placed in the climate chamber at least three times per scenario and any soil combination was combined with the others, which was necessary to eliminate reciprocal effects.

Table 2. Overview of technical data of used load cells (based on Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH [37]).

Parameters	Specific Data of Used Load Cells
type	PW10AC3MR
maximum capacity (E_{\max})	100 kg
minimum capacity (E_{\min})	0 kg
minimum verification interval (v_{\min})	10 g
max. platform size	600 × 500 mm
sensitivity (C_n)	2.0 + −0.2 mV/V

Table 3 gives an overview of the different soil combinations, which were analyzed with and without planting, and also shows the combination of different technical soils, which were tested only without any vegetation.

Technical soil A and B are already used in different raingardens (planted with perennials) in Ober-Grafendorf, Austria [38], and technical soil C is a standard technical soil usually used in Vienna for planting street trees. Technical soils D and E are newly developed technical soils for the research project SAVE, which are also used for tree plantings to generate better living conditions for street trees [39]. Substrate F is another technical soil for raingardens. Technical soils C–F are specially designed for the infiltration of stormwater runoff and are used in a test series for rainwater management in the City of Vienna (Austria). The used technical soils were designed according to the requirements of ÖNORM B 2506-3 [16].

Table 3. Overview of the different combinations of technical soils (A–F). Each technical soil is filled into three 10 L plant containers with three replicates (a–c) with CAM plants, C3 plants, and no plants (based on Weiss, 2017 [40]).

CAM Plants	Repetitions	
	C3 Plants	No Plants
A_Sedum_A	A_Geranium_A	A _A
A_Sedum_B	A_Geranium_B	A _B
A_Sedum_C	A_Geranium_C	A _C
B_Sedum_A	B_Geranium_A	B _A
B_Sedum_B	B_Geranium_B	B _B
B_Sedum_C	B_Geranium_C	B _C
		C _A
		C _B
		C _C
		D _A
		D _B
		D _C
		E _A
		E _B
		E _C
		F _A
		F _B
		F _C

The maximum saturation of the used technical soils was tested according to the Green Roof Guidelines of the FLL [41]. The procedure was slightly modified based on a lot of experience with the performance of technical soils. Therefore, different substrate combinations were placed in a water bath for two hours (instead of four hours as described in the Green Roof Guidelines [41]). The water level was 5 cm above the technical soil's

surface. Afterwards, the containers had to drip off for another two hours (instead of four hours as described in Green Roof Guidelines [41]). After the whole procedure, which lasts four hours in total, the plant containers were placed on the load cells in the climate chamber [19].

2.3. Equation Development

After the test series, data were analyzed. Therefore, the differences in weight (kilograms equate to liters) with a precision of grams was determined every 24 h for each of the technical soil combinations on the load cells.

On the basis of the loss in weight in liters per 24 h, we developed equations for calculating evapotranspiration. As equations only deliver correct results under the conditions they were created in [20–22], each technical soil combination calls for a separate equation.

By using a polynomial trend line with the newly developed equation, evapotranspiration in liters for each soil combination within a 24 h day and for any chosen temperature can be easily calculated. Through insertion of any chosen x-value for the temperature, the created equation delivers a y-value for the evapotranspiration in liters per 24 h in the analyzed containers. To determine evapotranspiration of a technical soil per m^2 , the equation has to be divided by the surface area ($0.0593957 m^2$) of the used containers.

The equations for calculating evapotranspiration are described in detail in Section 3.

2.4. Comparison with the Radiation Equation by Makkink

The well-known equation by Penman needs many different and complex parameters to calculate the evapotranspiration. The radiation equation by Makkink is an adaption and simplification of this equation for Europe [25,41].

The used input parameters for calculating evapotranspiration using the radiation equation by Makkink are extraterrestrial radiation (Ra), average monthly sunshine duration (n), maximum sunshine duration (N), monthly wind velocity (Um), relative air humidity (Rhm), and an auxiliary table delivering a temperature-dependent input value [20].

In contrast, the newly developed equation (while choosing the corresponding technical soil and planting) only needs the parameter “air temperature” as an input value.

Table 4 gives an overview of the different parameters used in the radiation equation by Makkink and the newly developed equation.

In the following Figure 1, a summarized overview for better understanding of the processes taken for the research work, is given.

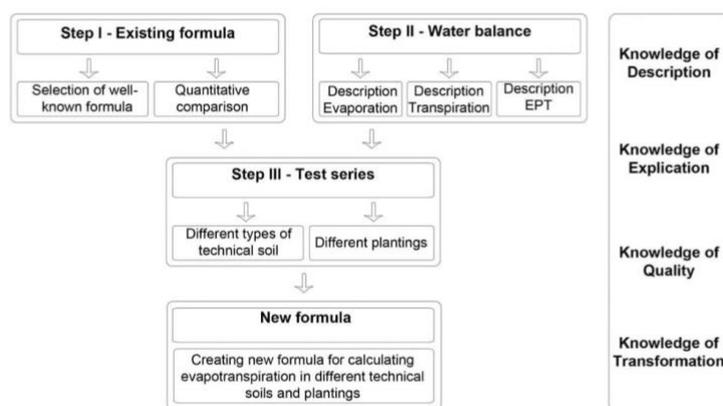


Figure 1. Overview of the used research design (based on Weiss et al., 2019 [19]).

Table 4. Comparison of input parameters between the radiation equation by Makkink and the newly developed equation.

Radiation Equation by Makkink	Newly Developed Equation
average monthly air temperature (<i>T</i>)	average monthly air temperature (<i>T</i>)
extraterrestrial radiation (<i>R_a</i>)	
average monthly sunshine duration (<i>n</i>)	
maximum sunshine duration (<i>N</i>)	
monthly wind velocity (<i>U_m</i>)	
relative air humidity (<i>R_{hm}</i>)	
input value using an auxiliary table	

3. Results

In the following, equations are presented for calculating evapotranspiration in different chosen substrates (used for rainwater management) with or without any type of planting.

3.1. Equation for Calculating Evapotranspiration

Figures 2–4 show the development of equations for calculating evapotranspiration, using polynomial regression lines for describing the height of evapotranspiration (see Section 2.1) per 24 h (e.g., technical soil A and B).

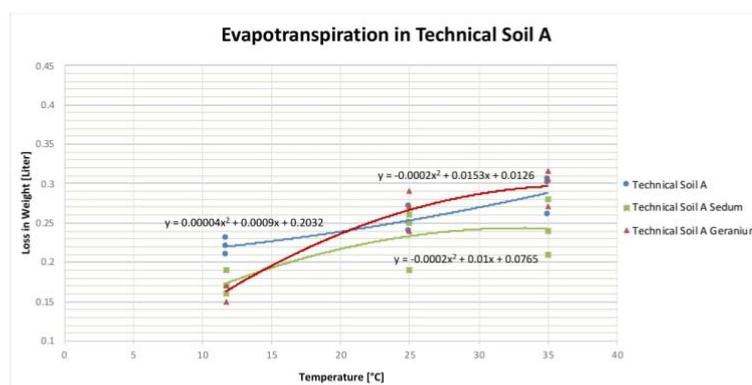


Figure 2. Regression lines were inserted through the differences in weight of any soil combination of technical soil A (with and without planting) in climate scenario I, II, and III, to create equations for calculating evapotranspiration (based on Weiss, 2017 [40]).

Figure 2 shows the evapotranspiration of technical soil A without any type of planting compared to the planted version with *Sedum floriferum* ‘Weihenstephaner Gold’ and with *Geranium x cantabrigiense* in the used 10 L containers. Figure 3 presents the evapotranspiration of technical soil B without any greenery compared to the planted containers with *Sedum floriferum* ‘Weihenstephaner Gold’ and *Geranium x cantabrigiense*. Figure 4 shows the evaporation of the technical soils D–F, without any planting.

The equations follow the principal of a polynomial regression of the second degree (E0):

$$y = \frac{a * x^2 + b * x + c}{d}$$

y represents evapotranspiration (mm/day);
 x = the chosen temperature (°C);
 a, b, and c = the constants of the corresponding equation;

d = the equation has to be divided by the surface area (0.0593957 m²) of the used containers to determine evapotranspiration of a technical soil per m².

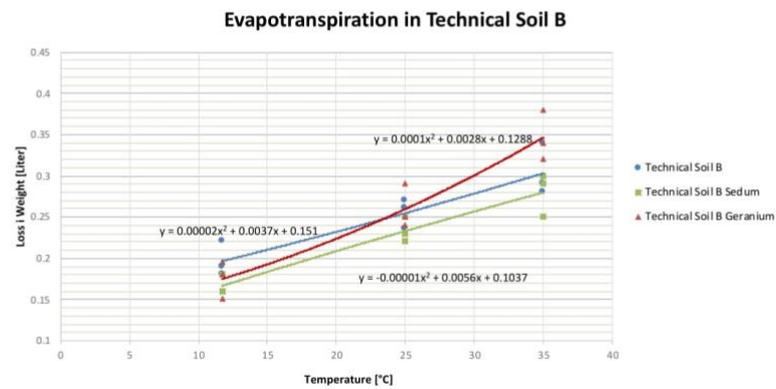


Figure 3. Regression lines were inserted through the differences in weight of any soil combination of technical soil B (with and without planting) in climate scenario I, II, and III, to create equations for calculating evapotranspiration (based on Weiss, 2017 [40]).

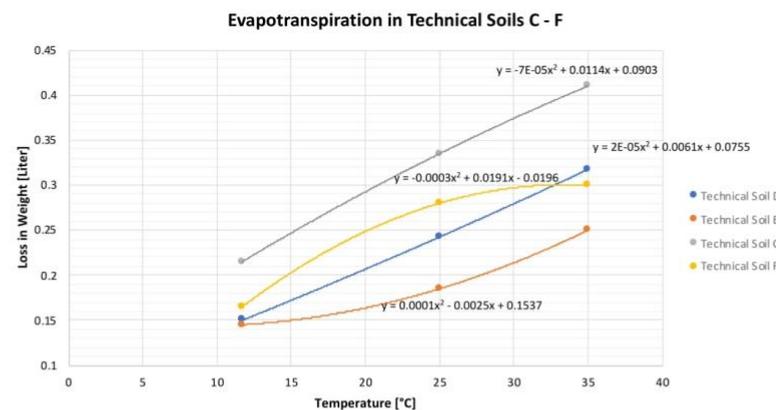


Figure 4. Regression lines were inserted through the differences in weight of any technical soil C–F in climate scenario I, II, and III, to create equations for calculating evapotranspiration.

These results led to the following equation for calculating evapotranspiration:
 (E1) Equation for calculating evapotranspiration of unplanted technical soil A:

$$y = \frac{0.00004 * x^2 + 0.0009 * x + 0.2032}{0.0593957}$$

(E2) Equation for calculating evapotranspiration of *Sedum floriferum* planted technical soil A:

$$y = \frac{-0.0002 * x^2 + 0.01 * x + 0.0765}{0.0593957}$$

(E3) Equation for calculating evapotranspiration of *Geranium x cantabrigiense* planted technical soil A:

$$y = \frac{-0.0002 * x^2 + 0.0153 * x + 0.0126}{0.0593957}$$

(E4) Equation for calculating evapotranspiration of unplanted technical soil B:

$$y = \frac{0.00002 * x^2 + 0.0037 * x + 0.151}{0.0593957}$$

(E5) Equation for calculating evapotranspiration of *Sedum floriferum* planted technical soil B:

$$y = \frac{-0.00001 * x^2 + 0.0056 * x + 0.1037}{0.0593957}$$

(E6) Equation for calculating evapotranspiration of *Geranium x cantabrigiense* planted technical soil B:

$$y = \frac{0.0001 * x^2 + 0.0028 * x + 0.1288}{0.0593957}$$

In the following, equations for non-planted technical soils C, D, E, and F are presented:

(E7) Equation for calculating evapotranspiration of unplanted technical soil C (standard technical soil usually used in Vienna for planting street trees):

$$y = \frac{-0.00007 * x^2 + 0.0114 * x + 0.0903}{0.0593957}$$

(E8) Equation for calculating evapotranspiration of unplanted technical soil D (advanced technical soil used for street trees in raingardens):

$$y = \frac{0.00002 * x^2 + 0.0061 * x + 0.0755}{0.0593957}$$

(E9) Equation for calculating evapotranspiration of unplanted technical soil E (another advanced technical soil used for street trees in raingardens):

$$y = \frac{0.0001 * x^2 - 0.0025 * x + 0.1537}{0.0593957}$$

(E10) Equation for calculating evapotranspiration of unplanted technical soil F (advanced technical soil used for seeding-greenery in raingardens):

$$y = \frac{-0.0003 * x^2 + 0.0191 * x - 0.0196}{0.0593957}$$

The following Table 5 shows the differences in evapotranspiration, depending on the used technical soil or planting.

Table 5. Overview in evapotranspiration per m² of the used technical soils A–F (A and B non-planted, planted with *Sedum floriferum* and *Geranium x cantabrigiense*, and C–F non-planted), while using the newly developed equations (E1–E10).

Type of Substrate	ETP (mm/day)	ETP (mm/month)
A non-planted (E1)	3.43	102.92
A (<i>Sedum floriferum</i>) (E2)	3.15	94.50
A (<i>Geranium x cantabrigiense</i>) (E3)	4.55	136.42
B non-planted (E4)	4.31	129.30
B (<i>Sedum floriferum</i>) (E5)	4.00	119.93
B (<i>Geranium x cantabrigiense</i>) (E6)	4.40	131.98
C non-planted (E7)	5.58	167.46
D non-planted (E8)	4.05	121.47
E non-planted (E9)	2.59	77.63
F non-planted (E10)	4.55	136.58

3.2. Comparison with the Equation of Radiation by Makkink

To underline the relevance of the developed equation, the evapotranspiration was assessed by comparing the well-known equation of radiation by Makkink and the here established Equations (E0–E10).

As an example, the data of the technical soil A planted with *Sedum floriferum* (E2), shown in Table 6, was used to determine the evapotranspiration with the two different equations. The radiation equation by Makkink is designed to calculate evapotranspiration for natural grown soils and a vegetation of short grass [42]. The result cannot be transferred to technical soils with any other kind of planting, as it will only deliver 100% correct results for this type of substrate and vegetation.

Table 6. Data for comparing the newly developed equation with the already existing equation of radiation by Makkink.

Parameter	Data
global radiation (r)	50 W/m ²
sunshine duration (n)	12 h
maximum sunshine duration (N)	12 h
average monthly air temperature (T)	25 °C
relative air humidity (Rhm)	50%
average monthly wind velocity (Um)	1 Bft (equates 0.51–2.06 m/s)

The following Table 6 shows an overview of the input parameters for calculating evapotranspiration with the equation of radiation by Makkink. Here, we used exactly the same data for sunshine duration, average monthly temperature, relative air humidity, and average monthly wind velocity, as for calculation of evapotranspiration by Equations E1–E10 in Table 5.

We calculated the evapotranspiration with the equation of radiation by Makkink [20]:

- Determination of the evapotranspiration equivalent of extraterrestrial radiation Ra using an auxiliary table [20].
To calculate Ra , global radiation r of 50 W/m² has to be converted to mm/day. Therefore, W/m² are transformed to J/cm² = 216 J/cm². According to the auxiliary table, extraterrestrial radiation Ra is about 0.88 mm/day.
- Identification of the relation between average monthly sunshine duration n and the maximum sunshine duration N .

$$\frac{n}{N} = \frac{12}{12} = 1$$

- Calculation of total radiation Rs , using the following equation.

$$\begin{aligned}Rs &= Ra * [0.2 + 0.5 * (\frac{n}{N})] \\Rs &= 0.88 * [0.2 + 0.5 * 1] \\Rs &= 0.616 \text{ mm/day}\end{aligned}$$

- While using another auxiliary table [20], the following value is defined by an average monthly temperature of $T = 25$ °C.

$$\frac{s}{s + \gamma} = 0.741$$

- Using the average monthly wind velocity $Um = 1$ Bft and relative air humidity $Rhm = 50\%$, the coefficient b is determined using the equation mentioned below:

$$\begin{aligned}
 b &= 1.165 + 0.043 * Um - 0.00575 * Rhm \\
 b &= 1.165 + 0.043 * 1 - 0.00575 * 50 \\
 b &= 0.9205
 \end{aligned}$$

6. The following radiation equation by Makkink calculated the evapotranspiration (ETP) using the already determined parameters in (a) to (e):

$$\begin{aligned}
 ETP &= -0.3 + b * \frac{s}{s+\gamma} * Rs \text{ mm/day} \\
 ETP &= -0.3 + 0.9205 * 0.741 * 0.616 \text{ mm/day}
 \end{aligned}$$

Finally, the calculation of evapotranspiration (ETP) using the equation of radiation by Makkink delivers the following result:

$$ETP = 0.12 \text{ mm/day and } 3.60 \text{ mm/month}$$

4. Discussion

The newly developed equations (E1–E10) deliver great differences in results compared to the equation of radiation by Makkink. Using the new equations (E1–E10) for calculating evapotranspiration in technical soils, the evapotranspiration per day nearly correlated with the evapotranspiration of a whole month by using the equation of radiation by Makkink (see Table 4). The main reason is the poor transformability of equations developed in natural grown soils compared to technical soils, because each equation only delivers 100% correct results under the conditions it was developed in [20].

However, compared to the results of the radiation equation by Makkink, all of the newly developed equations (E1–E10) showed similar results. These equations can be used to gain a quick and valid first insight and estimate of the evapotranspiration of each technical soil. If more precise information about evapotranspiration is needed, evapotranspiration for each technical soil and plant used in this study can be determined by using the presented method. As a result, it is clear that there is a loss of accuracy due to the strong simplification of the calculation of evapotranspiration, while only using air temperature as a key factor, which should be clearly mentioned as a strong weakness of the equations. As mentioned in the introduction, evapotranspiration is a physical process determined by many different parameters [20,26]. However, the main advantage of the proposed equations is that they deliver more precise results in evapotranspiration for the chosen technical soils than already existing well-known equations. Additionally, they offer the possibility to gain a first and quick insight into evapotranspiration. Furthermore, they are really easily applicable, even for non-professionals. Additional parameters (as wind speed, relative air humidity, global radiation, and of course, a larger variation of different technical soils and plants) could make the equations more precise. It needs to be assessed if simulations with tighter measured values for temperature, wind speed, or solar radiation are beneficial or unnecessarily cumbersome. We expect no additional benefit as the equations will become more and more complex with each added parameter, which will complicate the application. The focus on technical soil, vegetation, and temperature simplified the equation to include all essential parameters.

As air temperature is the only determining factor in the developed equations, results can be theoretically transferred to other climates. However, air temperature, wind speed, relative air humidity, and the global radiation depend on region and climate. Thus, cities in different climates will show large differences to the height of input parameters, which will affect the results. To ensure a better fitting of the results, input parameters should be changed in test series conducted in the climate chamber and adapted to the intended climatic situation to create more appropriate results. Until now, the presented equations are applicable for the climatic region of Central Europe only, but the developed methodology can be easily expanded to any geographical region.

Thus far, evapotranspiration of raingardens (made of natural grown soil) seemed to be estimated quite low, when calculated with the radiation equation by Makkink

(0.12 mm/day). Until now, it was not possible to determine evapotranspiration of an infiltration area constructed with technical soils. The new equations for technical soils calculated an evapotranspiration rate of 3.15 mm/day (E2), which is about 30 times higher than the value of the common equations for calculating evapotranspiration.

It can be also seen that there is a variation in evapotranspiration, due to the different types of technical soils. The here used technical soils were mineral planting substrates with characteristics of high infiltration rate, water absorption capacity, and pore volume. Differences in grain size distribution, roughness (surface of the whole technical soil and each component), amount of grain size <0.06 mm, and organic matter influenced the evapotranspiration [39,43].

Another aspect influencing evapotranspiration were the plants used for these test series (see Table 1). Depending on the type of photosynthesis, there were great differences in the optimum temperature and the correlating level of evapotranspiration [27]. Plants of photosynthesis type C3 (e.g., *Geranium x cantabrigiense*) transpired more water at a temperature of 25 °C (E3 and E6), whereas technical soils planted with CAM plants (e.g., *Sedum floriferum*) transpired even less (E2 and E5) than a non-planted substrate (E1 and E4) due to their high water-efficiency, and wind and radiation protection.

Tan et al. [30] also followed the idea of measuring evapotranspiration while using load cells. In their studies, they measured water loss of technical soils (filled in a tray of 0.5 by 0.5 m) with three different plant species (*Phyllanthus cochinchinensis*, *Heliconia* 'American Dwarf', and *Sphagneticola trilobata*) to determine evapotranspiration of an extensive roof. Cells were placed next to the extensive roof to have the same conditions. Weight was measured every 20 s and averaged to minute- and hourly-intervals. As a result of these measurements, they were able to determine evapotranspiration over time for this specific green roof [30]. Still, their equation for calculation evapotranspiration is not completely transferable to different technical soils and for different climate scenarios. The outdoor test series of their study and the use of only one technical soil do not allow a transferability to other technical soils and climate scenarios.

In our test series, 10 L pots with a height of about 30 cm were used for calculating evapotranspiration of technical soils and corresponding plants. In practical application, a soil layer with a height of 30 cm is required by regulations in Austria [17]. The pots were not rooted by the plants through the whole pot and evapotranspiration was only measured for 24 h, which does not allow a complete drying of the used technical soil. However, if there are multilayered technical soils or further developed plants used, pot size has to be adapted to plant size, to deliver more precise results.

Evapotranspiration has a large impact on the cooling of urban climate [44–46]. Studies in Shenzhen (China) show that two urban hedges (*Hymenocallis littoralis* of 0.4 m height and *Ligustrum quihoui* of 0.5 m height, both of an area of 40 m²) were able to cool down the underlying surface more than 19 °C. The hedge, which showed higher evapotranspiration, also showed a larger effect of cooling [46]. Hence, knowledge on evapotranspiration may contribute to the calculation of the cooling capacity of urban areas as evapotranspiration is one key factor of different simulation tools for urban microclimate [47,48].

Planted infiltration areas have a large impact on local microclimate through cooling via evapotranspiration [49]. To provide the positive effects on the microclimate, plants need enough water. To ensure the water availability, the calculation of evapotranspiration helps to determine water loss of plants and used technical soil.

Additionally, the calculation of evapotranspiration can be important to measure the size of infiltration areas. Thus far, standards and regulations do not include evapotranspiration in the planning process [17]. However, considering evapotranspiration would slightly reduce the necessary volume for water storage in the infiltration area and could be used to implement more infiltration areas.

The here presented equations were especially applicable for single-layered systems, equipped with technical soils and C3 or CAM plants (especially for *Geranium x cantabrigiense* and *Sedum floriferum*), because in these test series, the test set-up was designed for these two

plant types and single-layered technical soils. However, the created equation also has great relevance for C4 plants and any other technical soil, because the delivered results using the presented equation are even far more suitable for determining evapotranspiration of technical soils than using already existing ones, as it is shown in the comparison to the equation by Makkink. For more precise results, the required plant type (C4) or technical soil (multilayered systems) has to be tested in a climate chamber analog to the proposed method. Furthermore, the equations can be used for various sustainable rainwater management systems, as well as for green roofs and green facades. For example, the developed technical soils offered ideal living conditions for street trees, as shown in the test series in Vienna (Austria) [39]. Because of the limited size of the climate chamber, no trees or multilayered technical soils were tested during the test series.

Future research should adapt the equations to other rainwater management systems to include multilayer constructions, such as the Stockholm System with different layers of technical soil (planting soil, layer of crushed rock for infiltration of surface water, and airing of soil, structural soil: crushed rock 100/150 filled with fine soil particles) [50] or various systems of green roofs and green facades.

5. Conclusions

Evapotranspiration is a key factor for the improvement of urban climate. However, the calculation of evapotranspiration is difficult. This article presents a new, simpler approach to design equations for calculating evapotranspiration for any technical soil or plant. Each equation for calculating evapotranspiration can only be used under the conditions it was developed in. Here, the comparison of already existing equations to the newly developed ones shows this effect clearly.

Different equations for technical soils used in raingardens and tree plantings are presented and compared to the existing equation of radiation by Makkink. The great differences in results underline the fact once more to develop equations for technical soils. Therefore, the hypothesis that great differences in evapotranspiration between the equation of radiation by Makkink and the newly developed one are expected can be supported.

The results underline the relevance of the newly developed equations for calculating evapotranspiration loss of technical soils. The developed equations cannot only be used for applications outside, but in any area where technical soils are involved (e.g., calculating evapotranspiration of indoor greeneries, infiltration areas, building greeneries). By using the presented method, an equation for calculating evapotranspiration for any kind of technical soil and plant can be established.

Future research should assess the transferability of the developed equations for equations to calculate more complex rainwater management systems, such as multi-layer systems such as the Stockholm System, street trees, and indoor greeneries.

Overall, these are the five key findings of this research work:

- Due to the extreme condition for plantings in cities, new solutions for technical soils with specific features concerning their composition (e.g., water retention capacity, water permeability, pollutant retention, carrying capacity) are needed.
- Already existing well-known equations for calculating evapotranspiration cannot be used for technical soils because of their poor transferability.
- Newly developed and easily applicable equations for calculating evapotranspiration of different technical soils and plants were presented.
- There are large differences in results concerning evapotranspiration of the new equations and well-known ones.
- While using the presented method, easily applicable equations can be established for all kinds of technical soils and plants.

Author Contributions: Conceptualization, O.W. and U.P.; methodology, O.W.; validation, O.W., P.M., and U.P.; formal analysis, O.W.; investigation, O.W.; data curation, O.W.; writing—original draft preparation, O.W. and P.M.; writing—review and editing, O.W., P.M., B.S., and U.P.; visualization,

O.W. and P.M.; supervision, B.S. and U.P.; project administration, O.W.; funding acquisition, B.S. and U.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available in this article.

Acknowledgments: Open access funding provided by BOKU Vienna Open Access Publishing Fund.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Dankers, R.; Hiederer, R. Extreme Temperatures and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario. *JRC Sci. Tech. Rep.* **2008**, 1–66.
- Valipour, M.; Bateni, S.M.; Jun, C. Global Surface Temperature: A New Insight. *Climate* **2021**, *9*, 81. [[CrossRef](#)]
- Stoffel, M.; Stephenson, D.B.; Haywood, J.M. Antipyretic Medication for a Feverish Planet. *Earth Syst. Environ.* **2020**, *4*, 757–762. [[CrossRef](#)]
- Voigt, A.; Lampert, M.; Breuste, J. Anpassung an den Klimawandel als Aufgabe für eine ökologisch orientierte Stadtentwicklung. *SIR Mitt. Ber.* **2009**, *38*, 181–190.
- Liu, Y.; Xiao, J.; Ju, W.; Xu, K.; Zhou, Y.; Zhao, Y. Recent trends in vegetation greenness in China significantly altered annual evapotranspiration and water yield. *Environ. Res. Lett.* **2016**, *11*, 1–14. [[CrossRef](#)]
- Li, G.; Zhang, F.; Jing, Y.; Liu, Y.; Sun, G. Science of the Total Environment Response of evapotranspiration to changes in land use and land cover and climate in China during 2001–2013. *Sci. Total. Environ.* **2017**, *597*, 256–265. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Grimm, K. *Integratives Regenwassermanagement: Motivenbericht*; Magistrat der Stadt Wien; Wiener Umweltschutzabteilung—MA 22: Vienna, Austria, 2010; pp. 1–104.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evaporation: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*; FAO: Rome, Italy, 1998; pp. 1–300.
- Murata, T.; Kawai, N. Degradation of the urban ecosystem function due to soil sealing: Involvement in the heat island phenomenon and hydrologic cycle in the Tokyo metropolitan area. *Soil Sci. Plant Nutr.* **2018**, *64*, 145–155. [[CrossRef](#)]
- Elhaus, D. *Erosionsgefährdung*; Geologischer Dienst NRW: Krefeld, Germany, 2015; pp. 1–32.
- Fohrer, N.; Bormann, H.; Miegel, K.; Casper, M.; Bronstert, A.; Schumann, A.; Weiler, M. *Hydrologie*, 1st ed.; Fohrer, N., Ed.; Haupt: Bern, Switzerland, 2016; ISBN 978-3-8252-4513-9.
- Deeb, M.; Groffman, P.M.; Blouin, M.; Perl Egendorf, S.; Vergnes, A.; Vasenev, V.; Cao, D.L.; Walsh, D.; Morin, T.; Séré, G. Using constructed soils for green infrastructure Challenges and limitations. *Soil* **2020**, *6*, 413–434. [[CrossRef](#)]
- Morel, J.L.; Chenu, C.; Lorenz, K. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAS). *J. Soils Sediments* **2015**, *15*, 1659–1666. [[CrossRef](#)]
- Ebrahimian, A.; Wadzuk, B.; Traver, R. Evapotranspiration in green stormwater infrastructure systems. *Sci. Total Environ.* **2019**, *688*, 797–810. [[CrossRef](#)]
- Yilmaz, D.; Cannavo, P.; Séré, G.; Vidal-Beaudet, L.; Legret, M.; Damas, O.; Peyneau, P.E. Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening. *J. Soils Sediments* **2018**, *18*, 442–455. [[CrossRef](#)]
- Austrian Standards ÖNORM B 2506-3: *Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und Befestigten Flächen-Teil 3: Filtermaterialien-Anforderungen und Prüfmethoden*; Austrian Standards Institute: Vienna, Austria, 2018; pp. 1–26.
- Austrian Standards ÖNORM B2506-1: *Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen-Teil 1 Anwendung, Hydraulische Bemessung, Bau und Betrieb*; Austrian Standards Institute: Vienna, Austria, 2013; pp. 1–22.
- FLL. *Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate*; Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.: Bonn, Germany, 2010; pp. 1–64.
- Weiss, O.; Scharf, B.; Pitha, U. Evapotranspiration of Technical Substrates Methodology for Calculating Evapotranspiration of Technical Substrates. *J. Ecol. Eng.* **2019**, *20*, 28–37. [[CrossRef](#)]
- Schrödter, H. *Verdunstung Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden*, 1st ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1985; pp. 1–190.
- Valipour, M. Ability of Box-Jenkins Models to Estimate of Reference Potential Evapotranspiration (A Case Study: Mehrabad Synoptic Station, Tehran, Iran). *IOSR J. Agric. Vet. Sci.* **2012**, *1*, 1–11. [[CrossRef](#)]
- Rana, G.; Katerji, N.; Lazzara, P.; Ferrara, R.M. Operational determination of daily actual evapotranspiration of irrigated tomato crops under Mediterranean conditions by one-step and two-step models: Multiannual and local evaluations. *Agric. Water Manag.* **2012**, *115*, 285–296. [[CrossRef](#)]
- Jacobs, A.F.G.; De Bruin, H.A.R. Makkink's equation for evapotranspiration applied to unstressed maize. *Hydrol. Process.* **1998**, *12*, 1063–1066. [[CrossRef](#)]

24. Climate Service Center Germany. Verdunstung. Available online: https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063226/ (accessed on 3 May 2021).
25. Hoermann, G. Speichermodelle zum Bodenwasserhaushalt. *Simpel* **2005**, 1–61.
26. Jhajharia, D.; Dinpashoh, Y.; Kahya, E.; Singh, V.P.; Fakheri-Fard, A. Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. *Hydrol. Process.* **2012**, *26*, 421–435. [CrossRef]
27. Weiler, E.W.; Nover, L.; Nultsch, W. *Allgemeine und Molekulare Botanik*, 1st ed.; Georg Thieme: Stuttgart, Germany, 2008; ISBN 3131476613.
28. Campbell, G.S.; Norman, J.M. *An Introduction to Environmental Biophysics*; Springer: New York, NY, USA, 1998.
29. Fiedler, H. *Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten*; Expert Verlag: Renningen, Germany, 2001.
30. Tan, C.L.; Wong, N.H.; Jusuf, S.K.; Chiam, Z.Q. Impact of plant evapotranspiration rate and shrub albedo on temperature reduction in the tropical outdoor environment. *Build. Environ.* **2015**, *94*, 206–217. [CrossRef]
31. Kaiser, D.; Köhler, M.; Schmidt, M.; Wolf, F. Increasing Evapotranspiration on Extensive Green Roofs by Changing Substrate Depths, Construction, and Additional Irrigation. *Buildings* **2019**, *9*, 173. [CrossRef]
32. Tukimat, N.N.A.; Harun, S.; Shahid, S. Comparison of different methods in estimating potential évapotranspiration at Muda Irrigation Scheme of Malaysia. *J. Agriculatural Rural Dev. Trop. Subtrop.* **2012**, *113*, 77–85.
33. Nolz, R.; (Institute for Soil Physics and Rural Water Management (SoPhy), University of Natural Ressources and Life Sciences Vienna, Austria). Personal communication, 2017.
34. ZAMG. Witterungsübersicht für das Jahr 2015. Available online: <https://www.zamg.ac.at/zamgWeb/klima/klimarueckblick/archive/2015/wiewars15.pdf> (accessed on 3 May 2021).
35. Kuttler, W. Das Ruhrgebiet im Wandel Bestandsaufnahme und Prognose. *UNIKATE* **2010**, *38*, 41–51.
36. Orlik, A.; (Section Climatology, Division Customer Service, ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik). Personal communication, 2018.
37. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) Data Sheet PW10A Single Point Load Cell. Available online: <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B02190.pdf> (accessed on 27 May 2021).
38. Graf, R. Pflanzen für Versickerungsflächen Weiterführende Vegetationsuntersuchungen an einer Versuchsfläche in Ober-Grafendorf/Niederösterreich. Master's Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2018; pp. 1–163.
39. Lübke, K. Dezentrales Regenwassermanagement in der Stadt Multifunktionale Sickerflächen. Master's Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2019; pp. 1–200.
40. Weiss, O. Evapotranspiration von Technischen Substraten. Master's Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2017; pp. 1–139.
41. FLL. *Dachbegrünungsrichtlinien*; Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.: Bonn, Germany, 2018; pp. 1–118.
42. Cristea, N.C.; Kampf, S.K.; Burges, S.J. Revised Coefficients for Priestley-Taylor and Makkink-Hansen Equations for Estimating Daily Reference Evapotranspiration. *J. Hydrol. Eng.* **2013**, *18*, 1289–1300. [CrossRef]
43. Kos, B. Untersuchungen zu Baums substraten und Straßenbäumen Mittels Ausgewählter Geotechnischer und Vegetationstechnischer Methoden im Rahmen des SAVE Projekts der Stadt Wien Research of tree Substrates and Street-Trees with Geotechnical and Vegetation- Techn. Master's Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2017.
44. Jim, C.Y. Assessing climate-adaptation effect of extensive tropical green roofs in cities. *Landsc. Urban Plan.* **2015**, *138*, 54–70. [CrossRef]
45. Jim, C.Y.; Tsang, S.W. Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs. *Energy Build.* **2011**, *43*, 1341–1350. [CrossRef]
46. Zou, Z.; Yang, Y.; Qiu, G.Y. Quantifying the evapotranspiration rate and its cooling effects of urban hedges based on three-temperature model and infrared remote sensing. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 202. [CrossRef]
47. Gros, A.; Bozonnet, E.; Inard, C.; Musy, M. Simulation tools to assess microclimate and building energy A case study on the design of a new district. *Energy Build.* **2016**, *114*, 112–122. [CrossRef]
48. Huttner, S. *Further Development and Application of the 3D Microclimate Simulation ENVI-Met*; Johannes Gutenberg-Universität in Mainz: Mainz, Germany, 2012; Volume 147.
49. Hunt, W.F.; Lord, B.; Loh, B.; Sia, A. *Plant Selection for Bioretention Systems and Stormwater Treatment Practices*, 1st ed.; Springer: Singapore; Berlin/Heidelberg, Germany; New York, NY, USA; Dordrecht, The Netherlands; London, UK, 2015; ISBN 9789812872449.
50. Embrén, B.; Alvem, B.M.; Stal, Ö.; Orvesten, A. *Planting Pits in the City of Stockholm An Handbook*; City of Stockholm: Stockholm, Sweden, 2009; pp. 1–83.

11.3 Publikation 3

Alternative Engineered Soils and Seed Mixes Used for Seepage Troughs

Land MDPI (2021)

(Online: <https://doi.org/10.3390/land10111152> – Stand: 31.10.2021)

Article

Alternative Engineered Soils and Seed Mixes Used for Seepage Troughs

Oliver Weiss ^{*}, Pia Minixhofer, Nadine Werner, Stefan Riedenbauer, Elisabeth Olesko, Katharina Lübke, Bernhard Scharf and Ulrike Pitha

Department of Civil Engineering and Natural Hazards, Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Peter-Jordan-Strasse 82, A-1190 Vienna, Austria; pia.minixhofer@boku.ac.at (P.M.); nadine.werner@students.boku.ac.at (N.W.); stefan.riedenbauer@students.boku.ac.at (S.R.); Elisabeth.olesko@students.boku.ac.at (E.O.); katharina.luebke@students.boku.ac.at (K.L.); bernhard.scharf@boku.ac.at (B.S.); ulrike.pitha@boku.ac.at (U.P.)
* Correspondence: oliver.weiss@boku.ac.at



Citation: Weiss, O.; Minixhofer, P.; Werner, N.; Riedenbauer, S.; Olesko, E.; Lübke, K.; Scharf, B.; Pitha, U. Alternative Engineered Soils and Seed Mixes Used for Seepage Troughs. *Land* **2021**, *10*, 1152. <https://doi.org/10.3390/land10111152>

Academic Editors: Manfred Koehler and Daniel Kaiser

Received: 22 September 2021
Accepted: 27 October 2021
Published: 29 October 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Green Infrastructure measures such as seepage troughs are an integral part of sustainable urban rainwater management. In Austria, seepage troughs are currently almost exclusively produced with a 30 cm thick active soil filter passage made of topsoil. A standard seed mix is used as vegetation, which usually consists of only three different turfgrass species. During a three-year trial, engineered soils with improved properties (increased water storage capacity, infiltration rate and pore volume) were tested for their suitability as seepage troughs compared to topsoil. In addition to the standard turf seed mix, a flowering turf seed mix (34 species) and flowering meadow seed mix (53 species) were applied. The engineered and reference soils were analyzed for infiltration rate, vitality, cover ratio and inflorescence. The results were further assessed with the evaluation chart showing quantitatively the suitability of the tested soils for rainwater management. The investigations showed that engineered soils in combination with flowering meadow seed mix lead to the best results. Therefore, this type of vegetation for seepage troughs is recommended for future applications. The reference alternatives cannot be recommended.

Keywords: green infrastructure; urban rainwater management; engineered soil; infiltration; cover ratio

1. Introduction

Green Infrastructure (GI) measures such as seepage troughs or rain gardens are an integral part of sustainable urban rainwater management. Their importance is rapidly increasing as the climate crisis will lead to more frequent extreme weather events such as heavy rainfalls, heatwaves and sustained dry periods [1–3]. Green-Blue Infrastructure measures contribute to flood protection and urban heat island reduction [4,5]. Their performance depends on their technical construction, layer composition and vegetation selection [6,7]. The interplay of soil and vegetation is essential for their infiltration capacity during stormwater events as well as their evaporation capacity to contribute to a livable urban climate [8,9].

1.1. The Use of Engineered Soils

Usually, rain gardens are constructed using topsoil on-site [10]. Topsoil is the natural surface soil layer, which might be slightly improved with soil amendments. Already established systems for seepage troughs such as rain gardens work with (improved) topsoil or engineered soils [10,11]. ‘Engineered soils’ are constructed soil layers made up of artificially produced plant substrates, which can be produced by (re)using excavated materials, such as sand, gravel or soil, combined with technical soil amendments to enhance essential soil functions such as water retention [12]. In this article, ‘plant substrates’ were defined as soil

substitutes used as a plant medium that is mixed from predominantly mineral materials according to predefined requirements [13].

Internationally, the application of rain gardens is fairly common [14], but it is rare that any data on specifications for engineered soil development is published. In most cases, however, the topsoil found on site is reused and, if necessary, the desired properties are achieved by adding sand, gravel or compost, for example, to create a mix of two-thirds sandy loam topsoil and one-third compost to improve conditions for plant growth [10]. However, different ratios are applied of the composition by gravel, sand, loam, topsoil and compost of a suitable rain garden [10,15]. The currently used engineered soils still have the potential to optimize the geotechnical properties of water storage capacity and long-term water permeability while allowing for optimal plant growth in seepage troughs.

1.2. Seepage Troughs

Seepage troughs are swales in the open ground, where surface water or runoff is infiltrated into the existing subsoil [16]. Seepage troughs are vegetated channels to provide linear conveyance, retention and water treatment of stormwater. Especially the first flush contains high levels of contaminants, which causes high demands on filtering media and vegetation [17]. The design of seepage troughs is of importance in reducing erosion and ensuring long-term infiltration. In Austria, the area and depth of a seepage trough are calculated according to the guidelines of the Austrian Water and Waste Management Association (ÖWAV) [18] and should consist of a 30 cm thick active soil filter passage located above the subsoil [16]. The bottom of the seepage trough is enclosed by adjacent slopes, which should be designed with a 2:3 ratio to ensure erosion stability and maintenance [19].

Depending on the type of soil filter (natural or technical), the main indicators to be fulfilled for suitability as a soil filter are infiltration, soil composition and retention capacity [20]. The standard version of a seepage trough built in Austria is not suited to tackle these challenges. The permeability coefficient, also called *k_f*-value (given in meters per second), describes the infiltration rate of a soil layer. The higher the value, the higher the water permeability of the soil [21]. In the case of a one-year rainfall event, a damming time of 24 h should not be exceeded, and the *k_f*-value should not be below 1×10^{-5} , which is why the selection of suitable plant substrates is essential for long-term functionality [21]. Frequent flooding of the seepage troughs leads to a limited infiltration rate due to the accumulation of fine particles and compaction [22–24]. Due to the external input of contaminants and fine sediments, the highest reduction of the infiltration rate could be observed within the first year after installation [22]. Structure stability and grain size are essential indicators that influence the long-term infiltration rate of soils [25,26].

1.3. Vegetation in Seepage Troughs

In cities, sufficient water storage capacity has a major influence on the vitality and development of woody plants and turfgrass communities, especially because of the hostile environment for vegetation [27–29]. The reduced air-soil interconnectivity also results in reduced plant vitality [30]. However, established and vital vegetation is essential to stabilize the soil with the root system and the surface coverage of the soil by leaf mass [31–33]. Water is released into the surrounding air masses through transpiration during photosynthesis, which is why sufficient water in the soil is essential for high vitality [34,35]. Plants require different amounts of water depending on the type of photosynthesis (C3, C4 or CAM) [35]. Therefore, it is important to use suitable seed mixes for urban areas. Not only engineered soils need to adapt to the new extreme conditions, but the vegetation does as well to assure the long-term success of the GI measures. Vital vegetation provides a habitat and food source for numerous insects. Through the increasing urbanization, there is less plant diversity and supply that may serve as a food source for insects [36–38]. In the last 27 years, there has been a 75% decline in the total insect biomass [36]. In 2019, over 40% of insects were threatened with extinction [38]. It seems to be of significant importance to provide habitats for them in urban environments. However, a standard turf seed mix currently

used usually consists of only a few different turfgrass species [39], which do not contribute to maintaining and increasing biodiversity. This can be assured by replacing species-poor standard turf mixes with species-rich flowering turf or flowering meadow mixes.

1.4. Research Aim and Questions

These shortcomings lead to the need for newly engineered soils with long-lasting, robust performances and high biodiversity. In this article, the closely interlinked aspects of biodiversity, geotechnical and hydrological properties of the engineered soils are presented together to allow a comprehensive understanding of the complex plant-soil-water system.

Engineered soils with improved properties (increased water storage capacity, infiltration rate and pore volume) were tested for their suitability in seepage troughs during a three-year research project. A pilot system was installed in Vienna, Austria, to observe its effectiveness and functionality. The emphasis was on drainage and planting systems that were allowed to persist along streets and roads over the long term. The project aimed to retain as much rainwater as possible on-site to simplify the irrigation of the vegetation. Thus, improving the vitality, the microclimate and unburdening the sewer system in case of heavy rainfall events.

In this article, the following research questions shall be answered:

- How is the geotechnical performance of the newly engineered soils compared to the standard solution using topsoil?
- How is the vegetational performance of the tested seed mixes on new engineered soils compared to the reference soils?
- Which combination(s) of tested soil alternative and seed mix can be recommended for future applications?

2. Materials and Methods

2.1. Site Description and Set-Up

The test series was conducted in Kuchelauer Hafentraße in the North-West of Vienna, Austria (48°17'15.6" N 16°20'42.9" E), between July 2018 and December 2020. The test site was installed in June 2018 and is positioned in the suburbs of the 19th district of Vienna, next to the city boundary. Annual precipitation is 650 mm [40] and the average temperature is 10.5 °C [41]. According to the Köppen-Geiger climate classification, Vienna has a warm-moderate climate with summer and winter precipitation (Cfb), which is still valid despite climate change [42,43]. Kuchelauer Hafentraße was chosen as the test site because flood damage was already caused here by a heavy rain event in June 2013, and the research work was done in cooperation with the City of Vienna.

The test site was a linear seepage trough of about 120 m in length, 3 m in width, and 0.3 m in depth, and 0.1 m freeboard beside a bicycle route in an area largely devoid of automobiles. The slope sides that border the bottom of the seepage trough were designed in a ratio of 2:3. The built-up depth depended on the tested engineered soil alternatives and was either 0.3 m (single-layered) or 0.8 m (multi-layered). Accordingly, both single- and double-layers were tested. The alternatives contained a sandy gravel layer as a naturally occurring subsoil with a k_f -value between 10^{-3} and 10^{-4} [21]. The soil was backfilled by dump truck into the excavated trough directly onto the existing in-situ sandy gravel layer and placed by hand without compaction.

In total, the seepage trough consisted of eight different engineered soil alternatives (E1–E8) and two reference soils (R1 and R2, topsoil and tree engineered soil). The engineered soils (E1–E8) were constructed with mineral plant substrates based on one (E1, E2, E3, E4) or a combination of calcareous, zeolite or perlite materials (multi-layered engineered soils consisting of a base layer (Chalk, Perlite, Zeolite) and a sublayer of retention substrate). These components allow the characteristics of high infiltration rate, high water absorption capacity and high pore volume [26,44].

The following Table 1 gives an overview of the tested soil alternatives.

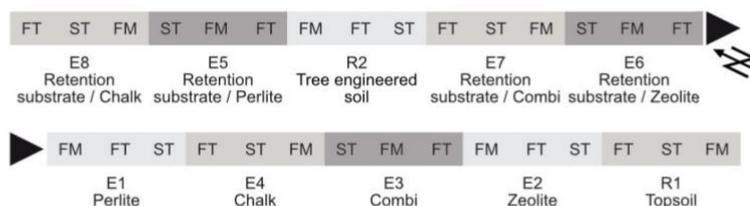
Table 1. Overview of the tested soil alternatives.

Tested Soil Alternative	Acronym
Topsoil (single-layered)	R1
Tree engineered soil (coarse/fine-grained, multi-layered)	R2
Perlite (single-layered)	E1
Zeolite (single-layered)	E2
Combi Perlite + Zeolite (single-layered)	E3
Chalk (single-layered)	E4
Retention substrate/Perlite (multi-layered)	E5
Retention substrate/Zeolite (multi-layered)	E6
Retention substrate/Combi Perlite + Zeolite (multi-layered)	E7
Retention substrate/Chalk (multi-layered)	E8

The topsoil alternative (R1) was built in a single layer construction, typical for standardized seepage troughs in the City of Vienna with a built-up height of 30 cm according to ÖNORM B2506-1 [21]. Engineered soils E1–E4 were also single-layered, with a built-up height of 30 cm. A tree engineered soil (R2) was a multi-layered (30 cm vegetation base layer, 50 cm sub-layer) engineered soil usually used in Vienna for planting street trees. The tree engineered soil is currently used for tree pits in the seepage troughs and was not designed for an application of greenery with grasses and herbs. However, this study evaluated the possibility of a surface application of the engineered soils in seepage troughs around the tree pits as an alternative to the currently used topsoil.

Engineered soils E5–E8 were multi-layered, with a built-up height of 80 cm. Additionally, these alternatives were equipped with a water retention soil layer of 50 cm up to the 30 cm high base layer. The retention layer consists of a mixture with a grain-size distribution of 0/64 (i.e., the size of the smallest stones are very fine-grained close to 0 mm, the largest stones are up to 64 mm), based on the structural soil concept of the Stockholm system [11].

The tested soil alternatives were placed randomly next to each other in ten different test plots along the seepage trough. These fields were subdivided into three parts with different alternatives of seed mixes. Figure 1 shows the different engineered soils and the three different seed mix alternatives (ST = standardized turf, FT = flowering turf, FM = flowering meadow). The detailed species list is attached in the Appendix A (Table A1). As specified in the regulations, 15 g/m² were applied for the standard seed mix, 10 g/m² for the flowering turf seed mix and 8 g/m² for the flowering meadow seed mix [45].

**Figure 1.** Overview of the tested soil alternatives (R1, R2, E1–E8) in the linear seepage trough in Vienna, constructed in a randomized order and planted with the three different seed mixes (ST = standardized turf, FT = flowering turf, FL = flowering meadow).

The maintenance intensity varied between the seed mixes. No initial maintenance treatment in the form of irrigation was carried out. During the vegetation period, the standardized turf was cut regularly once a month (about eight times a year during the vegetation period), flowering turf every second month and flowering meadow twice a year.

The clippings were removed without residue during mowing. Besides cutting, we applied no further actions in maintenance.

2.2. Analyzed Indicators

In the course of the geotechnical and vegetation monitoring, the following indicators were investigated in the period from August 2018 to November 2020: infiltration rate, precipitation, cover ratio, vitality and inflorescence. The geotechnical indicator infiltration rate was measured at the beginning and the end of each vegetation period starting after the finished installation in June 2018. Precipitation was measured continuously by sensors over the entire period (technical specifications in Appendix A Table A2). The vegetation monitoring was carried out once a month during the vegetation period (08.2018–11.2018; 03.2019–11.2019; 03.2020–11.2020), starting one month after the installation of the study site after the establishment of the applied seed mixes could be observed.

2.2.1. Infiltration Rate

According to Austrian Standards [46,47] and the Austrian Research Association for Road, Railways and Transport [48] different methods are described to assess the infiltration rates of the soil alternatives. Two methods have been identified as suitable for coarse engineered soils and tested prior to the field monitoring.

As a result, the infiltration rate, indicating the permeability of the soil, is measured in meters per second (m/s) and is decisive for the determination of the seepage capacity [21]. The infiltration rate was tested with a double ring infiltrometer according to the Austrian Standards [47], using method C for sports soils with surfaces made of unbound mineral materials.

The water infiltration rate (I_C) is calculated according to Austrian Standards [47]:

$$I_C = F_{WC}/t_C \quad (1)$$

I_C water infiltration rate

F_{WC} sinking of the water level (mm)

t_C the time for the water level to sink (h)

The measurements were carried out once in spring and once in autumn, to represent the beginning and the end of the vegetation period. Each measurement was carried out centrally at the bottom of the seepage trough for each engineered soil alternative and each seed mix. The measurement was carried out in three replicates and the k_f -value calculated from the mean value.

The descriptive statistical analysis of the infiltration rate included the bar and line chart and box plot to graphically identify any differences in the infiltration performance of the tested engineered soils.

2.2.2. Vegetation Monitoring

The vegetation monitoring was designed to answer the research question on vegetation performance. In the application of vegetation in seepage troughs, the focus is on cover ratio and vitality to prevent surface erosion. In addition, the aspect of biodiversity and nutrient supply to pollinators should be monitored. Based on previous research [49–51], the two indicators, vitality and inflorescence, were rated with the visual assessment index (shown in Table 2) to allow efficient and tailored monitoring. For each soil alternative and seed mix, one of five vitality classes was assigned. Vitality and inflorescence were rated according to their vitality class from (partially) dead (vitality stage 5, 1 point) to lush (vitality stage 1, 9 points). All test plots were assessed in terms of vigor, coloration and the general condition of the vegetation. Visually recorded data was collected by two people to account for potential biases [49].

Table 2. Visual assessment index of the vitality and inflorescence classes [49].

Vitality Stage	Points		Vitality	Inflorescence
1	9	lush	healthy, vital, cover ratio well above specified target, vigorous growth, no effects of pest infestation, disease, deficiency or mechanical damage evident	>20 blossoms
2	7	vigorous	Healthy, vital, cover ratio above specified target, hardly any dead or impacted plants, hardly any impact from pest infestation, disease, deficiency or mechanical damage evident	11–12 blossoms
3	5	average	Weakened, stagnant in growth, sufficient cover ratio, dead or impaired plants, effects of pest infestation, disease, deficiency or mechanical damage if any visible	4–10 blossoms
4	3	puny	Heavily weakened, puny growth, insufficient cover ratio, many dead or impaired plants, visible pest infestation and/or disease and/or deficiency and/or mechanical damage	1–3 blossoms
5	1	(partially) dead	dying, very low cover, predominantly dead	0 blossoms

Inflorescence was addressed by the species-specific blossoms produced, which is the species' ability to reproduce.

Furthermore, the vegetation monitoring included the cover ratio, which was assessed for each soil alternative and seed mix. The cover ratio represents the percentage of surface covered by vegetation in its projection on the ground relative to the area of the surveyed area. Estimates are given by two people in 5% increments, with 0% representing absent or very puny vegetation, and 100% representing complete cover ratio of the experimental area [52].

For a statistical analysis of the vegetation indicators, the descriptive statistical procedures of the line and bar chart were also applied in order to identify possible graphical differences with regard to the individual indicators of the tested soil alternatives. In addition, existing correlations between the indicators vitality and cover ratio, as well as vitality and precipitation, were tested.

2.2.3. Evaluation Chart

Based on the geotechnical (infiltration rate) and vegetation indicators (vitality, cover ratio, inflorescence) collected, the evaluation chart provides an overview of the suitability of the various engineered soil and seed mix alternatives investigated in the seepage trough to recommend the best combination for its intended purpose. The results are separated into three categories with a different score ('Good' = 3 points, 'Sufficient' = 2 points, 'Insufficient' = 1 point) [45,53].

An infiltration rate between 4.9×10^{-4} and 1.1×10^{-5} m/s was 'Good' (3 points). 'Sufficient' values (2 points) were between $\leq 5.0 \times 10^{-3}$ to 5.0×10^{-4} m/s and 'Inadequate' infiltration results were 1.0×10^{-5} and $\geq 5.0 \times 10^{-6}$ m/s. The values were derived from the standard regulations [13,21]. The first guideline recommends a permeability coefficient of 1.0×10^{-4} to 1.0×10^{-5} m/s for the uppermost 30 cm of the installed engineered soil in seepage troughs [21]. The second guideline recommends an infiltration rate of at least 5.0×10^{-6} m/s and a permeability coefficient of 5.0×10^{-5} m/s should not be exceeded [13].

A high plant vitality is necessary for a long-term existence of the greening. Only vital plants can provide satisfactory ecosystem services, such as cooling by evapotranspiration [54] or reduction by erosion through stabilization by roots and above-ground leaf mass [31–33]. Accordingly, vitality is of high importance. The classification of the vitality was 'Good' 6.1–9.0, 'Adequate' 4.1–6.0, and 'Inadequate' 1.0–4.0 [49].

The cover ratio was based on the Austrian standards for landscaping and landscape construction [55], which stipulates a projective cover ratio of 60%, and the Austrian standards for natural turf and sports fields [56], which stipulates a projective cover ratio of 95% after the inspection and approval of the follow-on care period [55,56]. Accordingly, a cover ratio of 95% or more is described as ‘Good’, 60–95% as ‘Sufficient’, and <60% as ‘Insufficient’.

A high number of blossoms (with average inflorescence values between 7.1 and 9.0) were rated as ‘Good’. Moderate inflorescence between 4.1 and 7.0 was ‘Sufficient’, and low inflorescence (between 1.0 and 4.0) was rated ‘Insufficient’ [49].

To account for the varying relevance of the indicators for the seepage troughs, they were given different weightings. Indicators with high relevance were weighted with a multiplier of ‘3’, those with moderate relevance with a multiplier of ‘2’ and indicators with lower relevance with a multiplier of ‘1’ [53]. In Table 3, the prioritization of the indicators is ranked according to their importance.

Table 3. Description of the rating system with and the weightings of the used indicators (based on Olesko 2021).

Indicator	Weighting
Infiltration rate	3
Cover ratio	3
Vitality	2
Inflorescence	1

The infiltration rate and the cover ratio were assigned the highest weight of ‘3’, due to their essential function to achieve a permeable seepage trough with lower erosion risk [31–33]. Vitality was of less importance but still essential for the long-term existence of the vegetation [27,28,57] and was weighted with ‘2’. Another factor was inflorescence, as biodiversity and food availability for insects were important aspects for green infrastructure in cities and therefore weighted with ‘1’ [36–38].

The maximum achievable score per engineered soil and seed mix alternative was 27 points per year and a total score of 81 points (100%) over the entire trial period 2018–2020.

3. Results

Results were separated into (1) the geotechnical assessment of the engineered soil alternatives, and (2) the visual rating of the vegetation. Section 3.1 describes the geotechnical assessment of the engineered soil alternatives (precipitation, infiltration rate, soil moisture). Section 3.2 shows the results of the vegetation monitoring (cover ratio, vitality, inflorescence).

3.1. Geotechnical Assessment of the Engineered Soil Alternatives

3.1.1. Precipitation and Infiltration Rate

In 2019, the annual sum of precipitation was 682 mm. Compared to the year 2020, the year 2019 was wetter (661 mm). However, during the vegetation period (April–November), the average sum of precipitation was lower in 2019 (515 mm) than in 2020 (547 mm).

The following Figure 2 shows the coefficient of permeability as a unit for the infiltration rate over the three monitored vegetation periods in 2018–2020. Infiltration was measured (as described in Section 2.2.1) twice a year.

It can be shown that there were no significant differences regarding infiltration rate between the three years (2018–2020) within each tested soil. However, there were high differences in infiltration between the tested soil alternatives. By far, the lowest infiltration rate had R1, followed by R2. The highest infiltration rates were evident for E2 and E4. In contrast to the different infiltration values of the tested soil alternatives, no differences in infiltration were documented for the seed mixes.

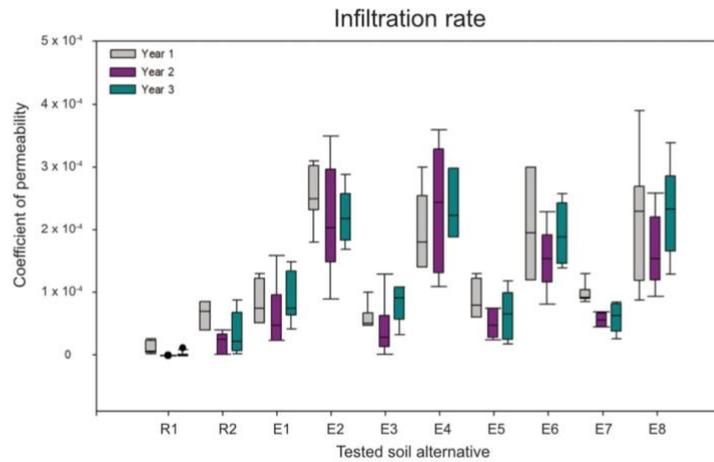


Figure 2. Boxplots of infiltration rate for the tested soil alternatives for 2018–2020.

The soil moisture of selected alternatives (R1, R2, E1–E5 and E8) was measured using a soil moisture sensor (TEROS 12, technical specifications see Appendix A Table A2). Based on a heavy rainfall event (intensity of a triennial rainfall event for the site of the seepage trough) on 7 June 2019, Figure 3 shows the different developments of soil moisture. In this figure, the soil moisture values of the engineered soils (E1, E2, E3, E4, E5 and E8) were combined in one average line as the performance was similar and the readability of the graph enhanced.

Soil moisture after a heavy rain event (7 June 2019)

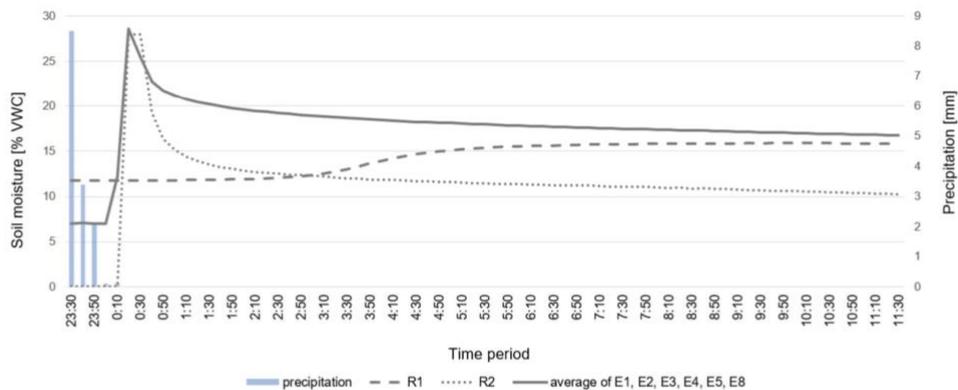


Figure 3. Trend of soil moisture after a heavy rain event on 7 June 2019 (22.2 mm within 30 min) for R1, R2 and engineered soils E1, E2, E3, E4, E5 and E8.

During the rain event, 22.2 mm of precipitation occurred within 30 min, which roughly corresponded to a triennial heavy rain event for the site (design precipitation at grid point 2657 of the Austrian Hydrographic Service) [58].

The engineered soils (E1–E5 and E8) showed a similar trend independent of their layering, but a difference in maximum water storage of more than 10% volumetric water content (VWC) was observed (see Figure 3). After the recorded heavy rain event, the soil

moisture increased rapidly and decreased slowly afterwards. In comparison, R2 showed a rapid decrease in soil moisture after the event. Twelve hours after the heavy rain event, soil moisture of only 10% volumetric water content (VWC) had been assessed for R2, while the soil moisture of the engineered soil alternatives remained higher with values ranging from 13 to 21% volumetric water content (VWC). In contrast to all other alternatives, R1 showed a very slow increase in soil moisture with a maximum of 16% volumetric water content (VWC) after 12 h, which can be explained by the low infiltration rate shown in Figure 2.

3.2. Vegetation Monitoring of the Seed Mix

3.2.1. Vitality

The vitality of the tested soil alternatives and seed mixes varied depending on the soil and seed mix alternative. The average vitality values are shown in the following Table 4 for the years 2018, 2019 and 2020 and the total over all three years. The results for the individual three years are the average values of the monthly monitoring during the vegetation period. The location of the tested alternative was not decisive for the assessed vitality, e.g., R2 is surrounded by alternatives E5 and E7 with better vitalities of all seed mix alternatives. E1 and E5 had the highest vitality, whereas R2 had the lowest. The flowering meadow had the highest vitality rate, followed by flowering turf and standardized turf. R2 showed a below-average vitality rate.

Table 4. Overview of different vitality for the different seed mixes (standardized turf, flowering turf and flowering meadow) on tested soil alternatives in 2018–2020 (green = high vitality from 7–9, yellow = moderate vitality from 4–6, red = low vitality from 1–3).

Soil Alternative	Seed Mix	Vitality				Average Total
		2018	2019	2020		
R1	ST	6.0	5.0	6.0	6.0	6.0
	FT	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	FM	6.0	6.0	7.0	6.0	6.0
R2	ST	2.0	3.0	2.0	2.0	2.0
	FT	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	FM	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0
E1	ST	8.0	7.0	5.0	7.0	7.0
	FT	8.0	7.0	5.0	7.0	7.0
	FM	8.0	8.0	7.0	8.0	8.0
E2	ST	6.0	7.0	6.0	6.0	6.0
	FT	7.0	6.0	5.0	6.0	6.0
	FM	7.0	8.0	6.0	7.0	7.0
E3	ST	8.0	8.0	6.0	7.0	7.0
	FT	4.5	7.0	7.0	6.0	6.0
	FM	8.0	8.0	6.0	7.0	7.0
E4	ST	4.0	7.0	6.0	6.0	6.0
	FT	4.0	7.0	5.0	5.0	5.0
	FM	4.0	8.0	7.0	6.0	6.0
E5	ST	6.0	5.0	6.0	6.0	6.0
	FT	9.0	7.0	7.0	8.0	8.0
	FM	9.0	7.0	7.0	8.0	8.0
E6	ST	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	FT	4.0	6.0	6.0	5.0	5.0
	FM	8.0	8.0	7.0	8.0	8.0
E7	ST	4.0	6.0	6.0	5.0	5.0
	FT	8.0	8.0	7.0	8.0	8.0
	FM	8.0	7.0	7.0	7.0	7.0
E8	ST	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	FT	8.0	8.0	6.0	7.0	7.0
	FM	6.0	8.0	7.0	7.0	7.0

3.2.2. Cover Ratio

The flowering meadow had the highest cover ratio, with an average of 73% over the entire investigation period. The second-best cover ratio had been assessed for the flowering turf with an average within three years of 66%. The lowest cover ratio had been observed for standardized turf (see the following three Figures 4–6) with an average of 63%. An increase in the cover ratio was evident from 2018–2020 for all tested soil alternatives and seed mixes. The highest cover ratio had E7 and the lowest R2. In 2020, the highest cover ratio was on average 97% for E1 and E7. Furthermore, there was a significant correlation between vitality and cover ratio ($n = 200, \alpha = 0.05; p \leq 0.001, r = 0.424$).

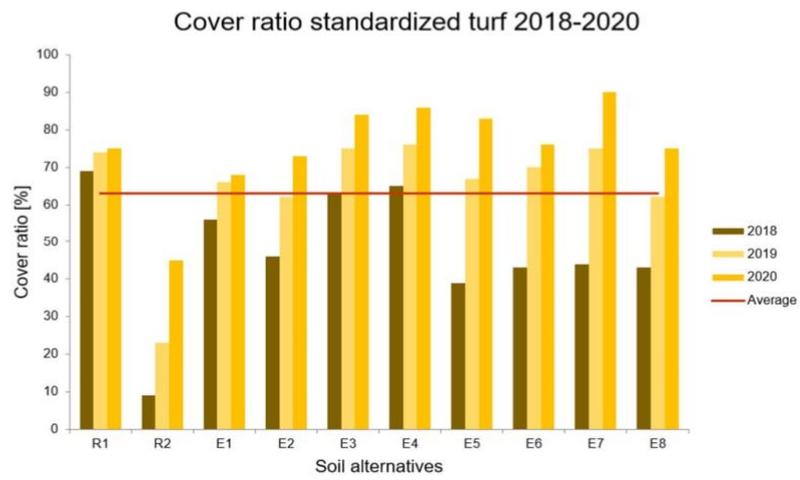


Figure 4. Comparison of the different average cover ratios [%] of standardized turf for the tested soil alternatives in 2018–2020.

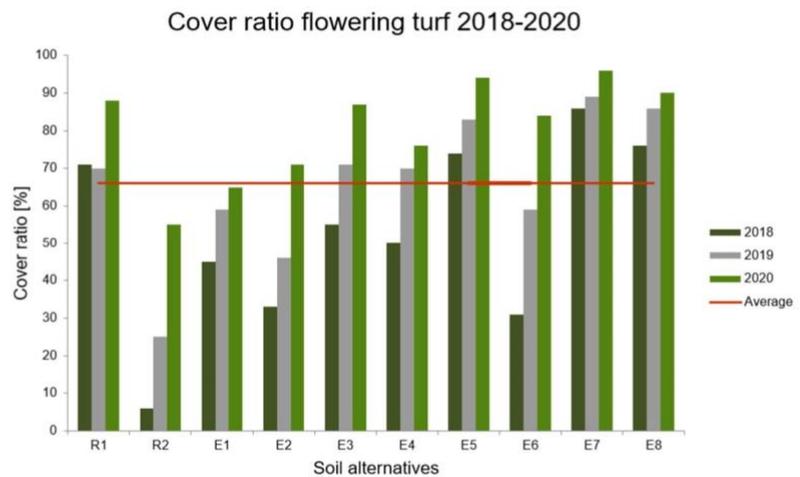


Figure 5. Comparison of the different average cover ratios [%] of flowering turf for the tested soil alternatives in 2018–2020.

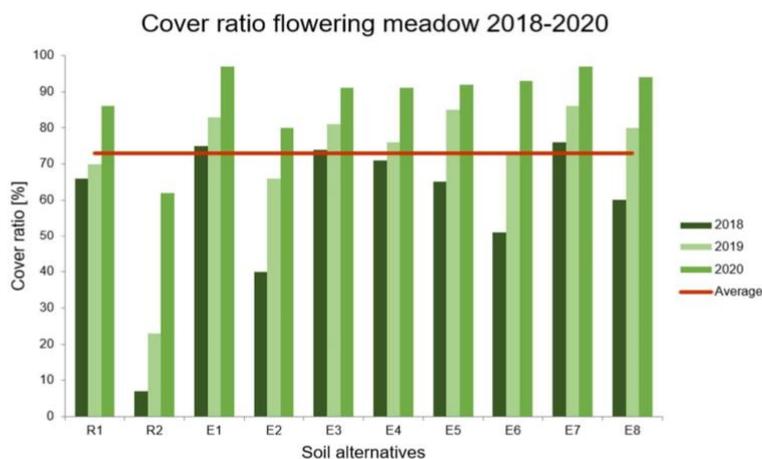


Figure 6. Comparison of the different average cover ratios [%] of flowering meadow for the tested soil alternatives in 2018–2020.

The average cover ratio values are presented in Figures 4–6 for 2018, 2019 and 2020, indicated by the red line. The average values for the individual three years were based on the monthly monitoring during the growing season.

Figure 7 shows the vitality in comparison to the monthly sum of precipitation. Especially in 2020, the vitality increased with increasing precipitation delayed by a month. Although a graphical correlation was recognizable, there were no significant correlations ($n = 48, \alpha = 0.05; p = 0.182, r = 0.196$) between vitality and precipitation. Especially in 2020, low precipitation led to an increase and thus improvement of vitality in the following month. Over both vegetation periods, R2 was performing far worse than the engineered soils. No effects of layering have been observed.

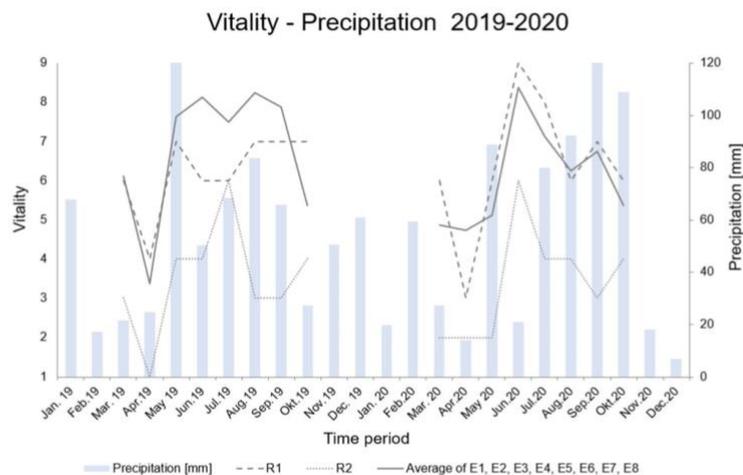


Figure 7. Vitality trend of the tested soil alternatives in comparison to precipitation over the vegetation period 2019 and 2020 (grey bars = precipitation, lines = vitality trend).

3.2.3. Inflorescence

Table 5 shows the inflorescence for the different engineered soil alternatives. The tested seed mixes and their individual cutting management had a considerable influence on the inflorescence. In the flowering meadow mix, cutting only twice a year resulted in the highest average blossom abundance. The flowering meadow (cutting interval every two months) showed the second-highest inflorescence. The lowest number of flowers was found in the monthly cut standardized turf. R2 had the lowest number of blossoms, whereas E1–E7 had the highest number of blossoms. There were no differences between single- and multi-layered engineered soils.

Table 5. Overview of different inflorescence for the different seed mixes (standardized turf, flowering turf and flowering meadow) on tested soil alternatives in 2018–2020 (green = high vitality from 7–9, yellow = moderate vitality from 4–6, red = low vitality from 1–3).

		Inflorescence				
Soil Alternative	Seed Mix	2018	2019	2020	Average Total	
R1	ST	5	5	5	5	
	FT	5	7	7	6	
	FM	5	7	7	6	
R2	ST	1	5	3	3	
	FT	1	5	5	4	
	FM	1	7	7	5	
E1	ST	5	7	7	6	
	FT	7	7	7	7	
	FM	7	7	7	7	
E2	ST	7	7	7	7	
	FT	5	7	7	6	
	FM	7	9	7	8	
E3	ST	7	7	7	7	
	FT	5	7	7	6	
	FM	9	7	7	8	
E4	ST	5	7	7	6	
	FT	7	9	7	8	
	FM	9	9	7	8	
E5	ST	5	5	7	6	
	FT	9	9	7	8	
	FM	9	9	7	8	
E6	ST	5	7	7	6	
	FT	5	7	7	6	
	FM	9	9	7	8	
E7	ST	5	7	7	6	
	FT	9	7	7	8	
	FM	9	9	7	8	
E8	ST	5	7	5	6	
	FT	9	7	7	8	
	FM	9	9	7	8	

3.3. Evaluation Chart

The prioritization and weighting of the key indicators resulted in the following evaluation chart (see Table 6), which shows the ‘Good’ (65.1–81 points, 81–100%), ‘Sufficient’ (49.1–65 points, 61–80%) and ‘Insufficient’ (0–49 points, <60%) engineered soil alternatives and seed mixes. Table 6 shows the results for 2018–2020 and the total of the individual engineered soils and seed mixes. An annual maximum score of 27 points could have been achieved in the evaluation chart, and the total maximum score was 81 points (100%).

Table 6. Overview of evaluation chart for the different seed mixes (standardized turf, flowering turf and flowering meadow) on tested soil alternatives in 2018–2020.

Evaluation Chart							
Soil Alternative	Seed Mix	2018	2019	2020	Total Points	Average Total	%-Total
R1	ST	13.0	13.0	18.0	44.0	48.7	60
	FT	17.0	17.0	17.0	51.0		
	FM	17.0	17.0	17.0	51.0		
R2	ST	16.0	16.0	15.0	47.0	50.7	63
	FT	16.0	16.0	16.0	48.0		
	FM	18.0	18.0	21.0	57.0		
E1	ST	23.0	23.0	21.0	67.0	66.7	82
	FT	20.0	20.0	21.0	61.0		
	FM	23.0	23.0	26.0	72.0		
E2	ST	23.0	23.0	21.0	67.0	66.3	82
	FT	20.0	20.0	21.0	61.0		
	FM	24.0	24.0	23.0	71.0		
E3	ST	23.0	23.0	21.0	67.0	68.3	84
	FT	23.0	23.0	23.0	69.0		
	FM	23.0	23.0	23.0	69.0		
E4	ST	23.0	23.0	23.0	69.0	69.7	86
	FT	24.0	24.0	21.0	69.0		
	FM	24.0	24.0	23.0	71.0		
E5	ST	21.0	21.0	21.0	63.0	68.3	84
	FT	24.0	24.0	23.0	71.0		
	FM	24.0	24.0	23.0	71.0		
E6	ST	23.0	23.0	21.0	67.0	65.0	80
	FT	18.0	18.0	21.0	57.0		
	FM	24.0	24.0	23.0	71.0		
E7	ST	23.0	23.0	21.0	67.0	71.0	88
	FT	23.0	23.0	26.0	72.0		
	FM	24.0	24.0	26.0	74.0		
E8	ST	21.0	21.0	21.0	63.0	67.7	84
	FT	23.0	23.0	23.0	69.0		
	FM	24.0	24.0	23.0	71.0		

The highest value was determined for the engineered soils E3, E5, E7 and E8. The worst results were determined for R1 and R2. They reached just over half of the maximum achievable points. R1 delivered the worst results in geotechnical indicators, and R2 in vegetation indicators.

4. Discussion

First, the performance of the tested soil alternatives was assessed regarding the different indicators (infiltration, plant cover, vitality, inflorescence; see Section 4.1). Second, the analysis led to recommendations for engineered soil alternatives and seed mixes in Section 4.2.

4.1. Evaluation and Assessment of the Tested Soil Alternatives

4.1.1. Infiltration Performance

Based on the results obtained, it can be shown that there were significant differences in the infiltration performance of the individual engineered soil alternatives (see Figure 2). While all engineered soil alternatives met the requirements of the established technical standards [13,21], the reference soil R1 (topsoil) showed significantly lower infiltration rates. In 2019, k_f -values of 1×10^{-9} m/s were achieved here, although the limit values according to the technical standards were 1×10^{-5} m/s and 5×10^{-6} m/s [13,21]. Compaction is the main reason why soils can no longer allow water to infiltrate due to the increased silting of sediments [22–24]. Especially during the first years after installation, this results in a

significantly slower infiltration rate [22,26]. As stated in the literature [25], a high proportion of fine grains, as well as organic material, results in low resistance to compaction. As seen in additional carrying capacity measurements (see Appendix A Table A3), R1 had the lowest average carrying capacity of 4.0 MN/m² in 2018–2020. This leads to the conclusion that the infiltration rate would diminish even further in case of any compaction caused by e.g., cars or pedestrians. Therefore, the standard alternative R1 cannot be recommended.

However, there were also significant differences between the individual engineered soil alternatives. The engineered soil alternatives E2, E4 and E8 can be particularly recommended in regard their infiltration performance when compared to the technical standards [13,21] under consideration of the progressing decreasing infiltration rate [26].

Significant findings of infiltration rates were supported by the soil moisture measurements. Thus, the engineered soils E1–E5 and E8 experienced a rapid increase in soil moisture due to the high infiltration already described (see Section 3.1.1, Figure 3). The soil moisture slowly decreased over time. This is an indication that precipitation can be retained in the engineered soils for a long time. In comparison, the tree engineered soil (R2) absorbed water just as quickly as the engineered soils but also dried out again very quickly. Thus, R2 had a significantly lower water retention capacity than the engineered soil.

The infiltration performance also affects the cooling capacity through evaporation, which is essential for the urban climate [8]. Green Infrastructures, such as seepage systems, green roofs, and green facades, provide an important contribution to urban cooling [9]. If there is too little plant-available water in the soil, the cooling capacity essential for the urban climate can also be inadequately provided by greatly reduced transpiration. During photosynthesis, water is released into the surrounding air masses through transpiration, which is why the presence of sufficient water in the soil is essential for the process and high vitality [34,35]. In urban areas, sufficient water storage capacity is essential [26], especially because of the hostile environment for vegetation [29].

4.1.2. Impact of Plant Cover

In general, the highest reduction of the infiltration rate can be observed within the first year due to the external input of fine sediments [22]. Consequently, the design of the seepage trough system is specifically important. To reduce erosion, not only plants play a decisive role. Animal processes in the soil can reduce the risk of erosion [59]. As an example, earthworm burrows can increase infiltration in the soil. To a much greater extent, established and vital vegetation can significantly reduce erosion. Because of this, in addition to stabilizing the soil by plant roots, it is primarily the surface coverage of the soil by leaf mass that is protecting the soil surface [31–33]. Therefore, the cover ratio results are of great importance.

Considering all tested alternatives over the three-year trial period, the highest average cover ratio could be documented for the seed mix alternative of the flowering meadow (73%), followed by the flowering turf (66%). The standardized turf mix had the lowest cover ratio with 63% and is, therefore, most susceptible to erosion [60].

The soil alternatives were assessed for their differentiated suitability for the different seed mixes. The engineered soils reached an average cover ratio of 71%, ranging from 66% for standard turf to 78% for flowering meadow. The topsoil (R1) showed the highest average cover ratio with 74%, ranging from 73% for standardized turf to 76% for flowering turf. The, by far, lowest values had been calculated for R2 with only 28% cover ratio on average, ranging from 26% for standardized turf to 31% for flowering meadow. Although R2 was not designed to function as a turf soil, the very low result was still surprising. The low result could be caused by the rapidly sinking soil moisture and the associated low water storage capacity of the base layer. Especially during the germination process, sufficient soil moisture of the substrate layer is important [61]. As the cover ratio was less than 60 % (as requested as the minimum ratio in the Austrian guidelines [55]), R2 cannot be recommended for use in seepage trough systems.

In comparison, some of the engineered soils (E1, E7, E8) and topsoil (R1) reached a cover ratio of more than 95% in the third monitoring year and even met the requirements of turf in sports field construction [56].

4.1.3. Impact of Vitality

Accordingly, vitality is strongly influenced by the water storage capacity of the soil. As shown in Figure 7, R2 had the lowest water holding capacity and by far the lowest average vitality, which is in line with the findings of the previously cited researchers as the performance of woody plants and turfgrass communities depends very much on the soil water availability [27,28,57]. With an average vitality of just over 3 and an average vitality for the standardized turf seed mix of 2, R2 had the lowest vitality of all investigated test alternatives. The highest vitality could be documented for two of the engineered soils (E1 and E5). R1 was in the (lower) middle range with a vitality of 6.0 for all seed mixes. The tree engineered soil R2 could also not be described as suitable for use in terms of vitality.

4.1.4. Impact on Inflorescence

Due to the high rate of insect decline in rural environments [36], it is important to provide urban habitats for the decreasing fauna. Since flowers serve as a food source for numerous insects [36–38], the inflorescence is considered an important indicator for decision selection and is included in the evaluation chart. However, since inflorescence has no direct effect on the performance of a seepage trough, it is included with a moderate weighting of '1'. No significant differences in inflorescence could be identified between the individual engineered soils. The tree engineered soil (R2) showed a significantly lower number of blossoms due to its low cover ratio and vitality. Similarly, topsoil (R1) used for seepage troughs also exhibited reduced inflorescence. Therefore, again, these two alternatives cannot be recommended for use in biodiverse seepage troughs.

4.2. Recommendations for Engineered Soil Alternatives and Seed Mixes

Looking at the evaluation chart in Table 6 (Section 3.3), the alternatives E3, E4, E5, E7 and E8 can be recommended for the tested indicators collected during the study period (infiltration, vitality, cover ratio and inflorescence). E3 and E4 are single-layer alternatives, while E5, E7 and E8 have multi-layer structures. This leads to the conclusion that both single-layer and multi-layer alternatives can deliver equally convincing results. Depending on the characteristics of the existing subsoil, single- or multi-layer alternatives can be chosen [62].

For each of these five engineered soil types, the flowering meadow mixture was able to achieve the best results, followed by the flowering turf mixture. This result can also be observed in the two reference materials R1 and R2. Therefore, based on the indicators collected, the use of flowering turf mixes is recommended.

Flower turf and flower meadow seed mixes offer the advantage of self-renewal in addition to the increase in biodiversity. An intelligent cutting concept waits for sufficient seed maturity and carries out the cut then, thus guaranteeing self-seeding and self-renewal of the flower turf or flower meadow while maintaining the highest possible species diversity [63–65]. In addition, higher species diversity causes less erosion than in areas with only a few plant species present [60].

Further research will need to focus on the use of novel engineered soils specifically for seepage systems with tree plantings. Furthermore, the species-specific root density and depth of trees as well as grasses and herbs might play a role in the water retention capacity. In further studies, chemical analyses of the filtering performance of the engineered soils should take place to quantify the contribution to groundwater protection and the absorption of pollutants from road runoff.

5. Conclusions

Previous designs of seepage systems with standardized topsoil and a structure height of 30 cm meet the regulatory framework conditions for a seepage system right after installation. However, due to silting and compaction, seepage systems already show a significantly slowed infiltration rate after a short period. In the trial, the standard alternative (R1) was already unable to achieve sufficient infiltration values after the first year of operation. In Austria, the area and depth of a seepage trough are calculated according to the guidelines of the Austrian Water and Waste Management Association (ÖWAV) [18]. The infiltration rate is a crucial factor in the calculation formula. Therefore, a significant change of infiltration rate changes the design parameters (regarding necessary area and depth) and may lead to malfunction of built seepage systems and increased risk of pluvial flooding. The tree engineered soil (R2) can only be recommended to a very limited extent for use in seepage systems with greening by seed mix. The infiltration rate remained within the limits during the entire monitoring period, but the results of the analysis, as well as the low water storage capacity, did not allow a recommendation for use in this combination.

The vegetation development in terms of cover ratio, vitality, inflorescence and the greatly reduced maintenance effort due to extended cutting intervals allowed a clear recommendation for flowering turf and flowering meadows in seepage systems. Thus, it could be clearly shown that engineered soils are a promising alternative to existing ones. In combination with a flowering turf or flowering meadow seed mix, these engineered soils can lead to optimal results with significantly reduced maintenance requirements and, at the same time, contribute to increasing biodiversity in urban areas.

The focus of the research was on the performance of plant development and infiltration rate rather than cost aspects. Considering the results presented in Table 6, the tested engineered soil alternatives proved to be more suitable for the long-term implementation and compensate for potentially higher costs for the initial soil material. The following cost ranges were based on quotes from local producers. The reference alternatives topsoil R1 and tree engineered soil R2 cost around 30 EUR per cubic meter. The tested engineered soils had a cost range from 40 EUR per cubic meter for E1 without zeolite to 80 EUR per cubic meter for E2 with the highest proportion of zeolite. The difference in costs was related to the type and amount of soil additives used for the mixtures of the tested engineered soils. The E3 and E4 had a cost of around 50 EUR per cubic meter, which is significantly cheaper than the less performing tested alternative E2. E7 and E8 included a retention layer costing in total of 70 EUR per cubic meter. Within the engineered soils, the combination of perlite and zeolite reached the best evaluation. In a decision-making process and considering public budgets and economic aspects, the engineered soils E3 and E4 seemed favorable.

In total, the following five key findings can be summarized for this work:

- The tested standard topsoil cannot be recommended due to rapid silting and the associated low infiltration performance.
- The tree engineered soil (R2) cannot be recommended for use in seepage systems with seed mix. Despite its high infiltration rate, it held a low water storage capacity and showed a poorly developing vegetation.
- No differences in geotechnical and vegetation results could be detected between the single- and multi-layer engineered soil structures of the engineered soils investigated.
- Flowering turf and flowering meadow seed mix provided an excellent alternative to species-poor standardized turf mix, increased urban biodiversity, and reduced maintenance requirements.
- The use of the tested engineered soil in combination with a flowering turf or flowering meadow seed mix can be recommended as a promising option for future use in seepage systems.

Author Contributions: Conceptualization, O.W., P.M., B.S. and U.P.; methodology, O.W., B.S. and U.P.; validation, O.W., P.M., B.S. and U.P.; formal analysis, O.W., S.R. and B.S.; investigation, O.W.,

K.L., E.O., N.W. and S.R.; data curation, O.W. and S.R.; writing—original draft preparation, O.W. and P.M.; writing—review and editing, O.W., P.M., B.S. and U.P.; visualization, O.W. and P.M.; supervision, B.S. and U.P.; project administration, O.W., B.S. and U.P.; funding acquisition, B.S. and U.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by WIEN KANAL and MA 48.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available in this article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Appendix A

Table A1. Species list for the three seed mixes standardized turf, flowering turf and flowering meadow.

Seed Mix	Standardized Turf [% by Mass]	Flowering Turf [% by Mass]	Flowering Meadow [% by Mass]
Grasses	100	80	76
<i>Agrostis capillaris</i>		5	5
<i>Anthoxanthum odoratum</i>			5
<i>Bromus erectus</i>			7
<i>Cynodon dactylon</i>		5	
<i>Cynosurus cristatus</i>		5	5
<i>Dactylis glomerata</i>			
<i>Festuca arundinacea</i>		5	7
<i>Festuca guestfalica</i>		10	5
<i>Festuca nigrescens</i>		10	5
<i>Festuca ovina duriuscula</i>		10	
<i>Festuca pratensis</i>			7
<i>Festuca rubra (rubra)</i>	5	5	5
<i>Festuca rubra trichophylla</i>		5	5
<i>Lolium perenne</i>	50	5	5
<i>Poa compressa</i>		5	
<i>Poa pratensis</i>	45	10	10
Legumes	0	5	6
<i>Anthyllis vulneraria</i>			
<i>Lotus corniculatus</i>		1.5	1
<i>Medicago lupulina</i>		3	1.5
<i>Trifolium prepens</i>		0.5	
<i>Onobrychis vicifolia</i>			1
<i>Trifolium pratense</i>			0.5
<i>Vicia villosa</i>			1
Herbs	0	15	18
<i>Achillea millefolium</i>		2	1
<i>Agrostemma githago</i>			0.5
<i>Ajuga reptans</i>		0.5	0.5
<i>Anthemis nobilis</i>		1	0.5
<i>Anthemis tinctoria</i>			0.5
<i>Bellis perennis</i>		0.5	0.5
<i>Calendula officinalis</i>			0.5
<i>Campanula patula</i>			0.5
<i>Carum carvi</i>			0.5
<i>Centaurea cyanus</i>			0.5
<i>Centaurea jacea</i>		0.75	0.5
<i>Cichorium intybus</i>			0.5
<i>Daucus carota</i>			0.5

Table A1. Cont.

Seed Mix	Standardized Turf [% by Mass]	Flowering Turf [% by Mass]	Flowering Meadow [% by Mass]
<i>Dianthus deltoides</i>			0.5
<i>Galium album</i>		0.5	0.5
<i>Knautia arvensis</i>			0.5
<i>Leontodon autumnalis</i>		0.5	0.5
<i>Leontodon hispidus</i>		0.5	0.5
<i>Leucanthemum vulgare</i>		1	0.5
<i>Lychnis flos cuculi</i>			0.5
<i>Lychnis viscaria</i>			0.5
<i>Matricaria chamomilla</i>			0.5
<i>Papaver rhoeas</i>			0.5
<i>Petrorhagia saxifraga</i>		0.5	0.5
<i>Phacelia tanacetifolia</i>			0.5
<i>Pimpinella saxifraga</i>		1	0.5
<i>Plantago lanceolata</i>			0.5
<i>Plantago media</i>		0.5	
<i>Potentilla verna</i>		0.5	0.5
<i>Prunella vulgaris</i>		0.75	0.5
<i>Salvia nemoralis</i>		1	0.5
<i>Sanguisorba minor</i>		1.5	1
<i>Silene vulgaris</i>		0.5	0.5
<i>Thymus pulegioides</i>		1	0.5
<i>Veronica chamaedrys</i>		0.5	0.5

Table A2. Specifications of the used soil moisture sensor TEROS 12 and precipitation sensor ECRN-10 by METER (München, Germany) [66,67].

Type of Sensor	ECRN-100 [66]	TEROS 12 [67]
Dimensions	height: 16.0 cm	length: 9.4 cm width: 2.4 cm height: 2.0 cm
Measuring volume	-	1010 mL
Range of measurement	-	0–57% VWC
Operating environment	0–60 °C	–40–60 °C
Resolution	Rainfall per tip: 0.2 mm	0.001 m ³ /m ³
		Using a generic calibration: ±3% VWC
Precision	Volume per tip: 4.02 mL/tip	Using a soil specific calibration: ±1–2% VWC

Table A3. Carrying capacity of R1, R2, E1–E8.

Soil Alternative	Carrying Capacity [MN/m ²]		
	Dynamic Evd [MN/m ²]		
	2018	2019	2020
R1	3.8	4.1	4.0
R2	9.3	14.8	12.0
E1	4.0	5.2	4.6
E2	6.4	6.2	6.3
E3	4.8	4.7	4.7
E4	5.2	7.1	6.1
E5	4.4	4.7	4.5
E6	5.9	6.7	6.3
E7	5.2	5.6	5.4
E8	6.1	7.1	6.6

References

- Dankers, R.; Hiederer, R. Extreme Temperatures and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario. *JRC Sci. Tech. Rep.* **2008**, 1–66.
- Valipour, M.; Bateni, S.M.; Jun, C. Global Surface Temperature: A New Insight. *Climate* **2021**, *9*, 81. [CrossRef]
- Stoffel, M.; Stephenson, D.B.; Haywood, J.M. Antipyretic Medication for a Feverish Planet. *Earth Syst. Environ.* **2020**, *4*, 757–762. [CrossRef]
- O'Donnell, E.; Thorne, C.; Ahilan, S.; Arthur, S.; Birkinshaw, S.; Butler, D.; Dawson, D.; Everett, G.; Fenner, R.; Glenis, V.; et al. The Blue-Green Path to Urban Flood Resilience. *Blue-Green Syst.* **2020**, *2*, 28–45. [CrossRef]
- Zhao, D.; Lei, Q.; Shi, Y.; Wang, M.; Chen, S.; Shah, K.; Ji, W. Role of Species and Planting Configuration on Transpiration and Microclimate for Urban Trees. *Forests* **2020**, *11*, 825. [CrossRef]
- Gülbaz, S.; Kazezyilmaz-Alhan, C.M. Experimental Investigation on Hydrologic Performance of LID with Rainfall-Watershed-Bioretenion System. *J. Hydrol. Eng.* **2017**, *22*, 1–10. [CrossRef]
- Mobilia, M.; D'Ambrosio, R.; Longobardi, A. Climate, soil moisture and drainage layer properties impact on green roofs in a Mediterranean environment. In *Frontiers in Water-Energy-Nexus—Nature-Based Solutions, Advanced Technologies and Best Practices for Environmental Sustainability*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; pp. 169–171.
- Yang, F.; Lau, S.S.Y.; Qian, F. Summertime Heat Island Intensities in Three High-Rise Housing Quarters in Inner-City Shanghai China: Building Layout, Density and Greenery. *Build. Environ.* **2010**, *45*, 115–134. [CrossRef]
- Uçar, Z.; Akay, A.E.; Bilici, E. Towards Green Smart Cities: Importance of Urban Forestry and Urban Vegetation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch.* **2020**, *44*, 399–403. [CrossRef]
- City of Portland How to Manage Stormwater—Rain Gardens; City Of Portland Environmental Services: Portland, OR, USA, 2009.
- Embrén, B.; Alvm, B.M.; Stal, Ö.; Orvesten, A. *Planting Pits in the City of Stockholm An Handbook*; Stockholms Stad: Stockholm, Sweden, 2009.
- Deeb, M.; Groffman, P.M.; Blouin, M.; Egendorf, S.P.; Vergnes, A.; Vasenev, V.; Cao, D.L.; Walsh, D.; Morin, T.; Séré, G. Using Constructed Soils for Green Infrastructure—Challenges and Limitations. *Soil* **2020**, *6*, 413–434. [CrossRef]
- FLL Empfehlungen für Baumpflanzungen—Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen—Pflanzgruben und Wurzelraumvergrößerung, Bauweisen und Substrate; Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.: Bonn, Germany, 2010.
- Ishimatsu, K.; Ito, K.; Mitani, Y.; Tanaka, Y.; Sugahara, T.; Naka, Y. Use of Rain Gardens for Stormwater Management in Urban Design and Planning. *Landsc. Ecol. Eng.* **2017**, *13*, 205–212. [CrossRef]
- Vaculová, V.; Štěpánková, R. Application of Rain Gardens to an Urban Area—Housing Estate in Nitra, Slovakia. *Acta Hort. Regiotech.* **2017**, *20*, 1–5. [CrossRef]
- VÖB Sickermulde. Available online: <http://www.wasserwirtschaft.net/entwaesserunghochbau:sickermulde:start> (accessed on 10 September 2021).
- Johnson, K.; Cai, M.; Patil, M.; Saftner, D.; Swanson, J. *Comparing Properties of Water Absorbing/Filtering Media for Bioslope/Bioswale Design*; Minnesota Department of Transportation: St. Paul, MN, USA, 2017.
- ÖWAV. ÖWAV-Regelblatt 45: Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund. 2015. Available online: <https://www.oewav.at/Page.aspx?target=196960&mode=form&app=134598&edit=0¤t=293666&view=205658&predefQuery=-1> (accessed on 26 October 2021).
- Larcher, H. Planungshilfen für die Bemessung und Hinweise zur Sanierung von dezentralen Versickerungsanlagen für Niederschlagswasser. Master's Thesis, Leopold-Franzens-University of Innsbruck, Innsbruck, Austria, 2009. Available online: https://www.uibk.ac.at/umwelttechnik/teaching/master/da_larcher.pdf (accessed on 26 October 2021).
- Austrian Standards ÖNORM B2506-2. Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und Befestigten Flächen—Teil 2: Qualitative Anforderungen an das zu Versickernde Regenwasser Sowie Anforderungen an Bemessung, Bau und Betrieb von Reinigungsanlagen; Austrian Standards International: Vienna, Austria, 2012; pp. 1–18.
- Austrian Standards ÖNORM B2506-1. Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und Befestigten Flächen—Anwendung, Hydraulische Bemessung, Bau und Betrieb; Austrian Standards International: Vienna, Austria, 2013; pp. 1–22.
- Bergman, M.; Hedegaard, M.R.; Petersen, M.F.; Binning, P.; Mark, O.; Mikkelsen, P.S. Evaluation of Two Stormwater Infiltration Trenches in Central Copenhagen after 15 Years of Operation. *Water Sci. Technol.* **2011**, *63*, 2279–2286. [CrossRef] [PubMed]
- Ekwue, E.I.; Harrilal, A. Effect of Soil Type, Peat, Slope, Compaction Effort and Their Interactions on Infiltration, Runoff and Raindrop Erosion of Some Trinidadian Soils. *Biosyst. Eng.* **2010**, *105*, 112–118. [CrossRef]
- Levine, B.; Horne, D.; Burkitt, L.; Tanner, C.; Sukias, J.; Condon, L.; Paterson, J. The Ability of Detainment Bunds to Decrease Surface Runoff Leaving Pastoral Catchments: Investigating a Novel Approach to Agricultural Stormwater Management. *Agric. Water Manag.* **2021**, *243*, 1–10. [CrossRef]
- Tejedor, M.; Neris, J.; Jiménez, C. Soil Properties Controlling Infiltration in Volcanic Soils (Tenerife, Spain). *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2013**, *77*, 202–212. [CrossRef]
- Dellantonio, S. Versickerungsfähige Pflanzbeete als Alternative zur konventionellen Regenwasserbewirtschaftung—Untersuchung und Bewertung von Wasserdurchlässigkeit und Speicherfähigkeit verschiedener Substratmischungen und deren Tauglichkeit für Bepflanzungen. Master's Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2017.
- Duble, R.L. *Turfgrasses—Their Management and Use in the Southern Zone*, 2nd ed.; Texas A&M University Press: College Town, TX, USA, 2004.

28. Close, R.E.; Kielbaso, J.J.; Nguyen, P.V.; Schutzki, R.E. Urban vs. Natural Sugar Maple Growth: II. Water Relations. *J. Arboric.* **1996**, *22*, 187–192.
29. Schneider, B.U.; Hüttl, R.F. Naturräumliche Ausstattung. In *Historische Gärten und Klimawandel: Eine Aufgabe für Gartenkmalpflege, Wissenschaft und Gesellschaft*; Hüttl, R.F., David, K., Schneider, B.U., Eds.; De Gruyter Akademie Forschung: Berlin, Germany, 2019; pp. 151–153. ISBN 9783110607482.
30. Kozłowski, T.T. Soil Compaction and Growth of Woody Plants. *Scand. J. For. Res.* **1999**, *14*, 596–619. [[CrossRef](#)]
31. Gyssels, G.; Poesen, J. The Importance of Plant Root Characteristics in Controlling Concentrated Flow Erosion Rates. *Earth Surf. Process. Landf.* **2003**, *28*, 371–384. [[CrossRef](#)]
32. Prosser, I.P.; Dietrich, W.E. Field Experiments on Erosion by Overland Flow and Their Implication for a Digital Terrain Model Ofchannel Initiation. *Water Resour. Res.* **1995**, *31*, 2867–2876. [[CrossRef](#)]
33. Kutschera, L. Short Review of the Present State of Root Research. *Dev. Agric. Manag. For. Ecol.* **1991**, *24*, 1–8.
34. Schrödter, H. *Verdunstung—Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden*, 1st ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1985.
35. Weiler, E.W.; Nover, L.; Nultsch, W. *Allgemeine und Molekulare Botanik*, 1st ed.; Georg Thieme: Stuttgart, Germany, 2008; ISBN 3131476613.
36. Hallmann, C.A.; Sorg, M.; Jongejans, E.; Siepel, H.; Hofland, N.; Schwan, H.; Stenmans, W.; Müller, A.; Sumser, H.; Hörrn, T.; et al. More than 75 Percent Decline over 27 Years in Total Flying Insect Biomass in Protected Areas. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0185809. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Chemnitz, C.; Gordon, D. *Insektenatlas—Daten und Fakten über Nütz- und Schädlinge in der Landwirtschaft*; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.: Berlin, Germany, 2020.
38. Sánchez-Bayo, F.; Wyckhuys, K.A.G. Worldwide Decline of the Entomofauna: A Review of Its Drivers. *Biol. Conserv.* **2019**, *232*, 8–27. [[CrossRef](#)]
39. Da Silva, Y.; Hendry, L. How to Grow a Lawn That’s Better for Wildlife. Available online: <https://www.nhm.ac.uk/discover/how-to-grow-a-better-lawn-for-wildlife.html> (accessed on 10 September 2021).
40. ZAMG Niederschläge Februar 2019 bis Februar 2021. Available online: <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/niederschlag.html> (accessed on 10 September 2021).
41. ZAMG. Lufttemperatur Februar 2019 bis Februar 2021. Available online: <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/lufttemperatur.html> (accessed on 10 September 2021).
42. Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorol. Z.* **2006**, *15*, 259–263. [[CrossRef](#)]
43. Köppen, W. Versuch einer Klassifikation der Klimazone, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geogr. Z.* **1900**, *6*, 657–679.
44. Kos, B. Untersuchungen zu Baumsubstraten und Straßenbäumen Mittels Ausgewählter Geotechnischer und Vegetationstechnischer Methoden im Rahmen des “SAVE“-Projekts der Stadt Wien. Master’s Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2017.
45. Lübke, K. Dezentrales Regenwassermanagement in der Stadt Multifunktionale Sickerflächen. Master’s Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2019.
46. Austrian Standards ÖNORM B 4422-2. *Geotechnical Engineering (Foundation Engineering)—Soil Analysis—Determination of Water Permeability—Field Methods for Layer Near to the Surface*; Austrian Standards International: Vienna, Austria, 2002; pp. 1–21.
47. Austrian Standards ÖNORM EN 12616:2013. *Sports Soils—Determination of Water Infiltration Rate*; Austrian Standards International: Vienna, Austria, 2013; pp. 1–9.
48. Austrian Research Association for Roads, Railways and Transport. *RVS 11.06.27 Bestimmung der Durchlässigkeit von Tragschichtmaterial und Tragschichten*; FSV: Vienna, Austria, 2018; pp. 1–9.
49. Thelen-Germann, M. Entwicklung Eines Bewertungsschemas zur Beurteilung Krautiger Pflanzen bei Vegetationstechnischen Aufnahmen. Master’s Thesis, Universität für Bodenkultur, Vienna, Austria, 2015.
50. Graf, R. Pflanzen für Versickerungsflächen—Weiterführende Vegetationsuntersuchungen an Einer Versuchsfläche in Ober-Grafendorf/Niederösterreich. Master’s Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2018.
51. Pichler, A. GrünStadtKlima—Dachbegrünung Auswirkung der Vegetationsentwicklung bei Dachbegrünungen auf Ausgewählte Mikroklimatische Parameter. Master’s Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2013.
52. Traxler, A. *Handbuch des Vegetationsökologischen Monitorings—Methoden, Praxis, Angewandte Projekte Teil A: Methoden*, 1st ed.; Umweltbundesamt: Vienna, Austria, 1997.
53. Olesko, E. Decentralised Rainwatermanagement in Urban Areas. Master’s Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, 2021.
54. Doick, K.; Hutchings, T. *Air Temperature Regulation by Urban Trees and Green Infrastructure*; Forestry Commission: Farnham, UK, 2013.
55. Austrian Standards ÖNORM B 2241. *Gartengestaltung und Landschaftsbau—Werkvertragsnorm*; Austrian Standards International: Vienna, Austria, 2013; pp. 1–30.
56. Austrian Standards ÖNORM 2606-1. *Sportplatzbeläge—Teil 1: Naturrasen*; Austrian Standards International: Vienna, Austria, 2009; p. 24.

57. Chakraborty, T.; Saha, S.; Reif, A. Decrease in Available Soil Water Storage Capacity Reduces Vitality of Young Understorey European Beeches (*Fagus Sylvatica* L.)—A Case Study from the Black Forest, Germany. *Plants* **2013**, *2*, 676–698. [CrossRef] [PubMed]
58. BMLRT Bemessungsniederschlag 2020. Available online: <https://ehyd.gv.at/#> (accessed on 25 June 2021).
59. Trimble, S.W. Vegetation and erosion. Processes and environments. In *Geomorphic Effects of Vegetation Cover and Management: Some Time and Space Considerations in Prediction of Erosion and Sediment Yield*; Thornes, J.B., Ed.; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 1990; pp. 55–65.
60. Cyrill, M.; Beeli, M.; Alewell, C.; Körner, C. Interrill Erosion at Disturbed Alpine Sites: Effects of Plant Functional Diversity and Vegetation Cover. *Basic Appl. Ecol.* **2010**, *11*, 619–626. [CrossRef]
61. Klatz Beal, S. The Importance of Water in Seeds Germination. Available online: <https://sciencing.com/the-importance-of-water-in-seeds-germination-12003533.html> (accessed on 22 July 2021).
62. DFB—Deutscher Fussball-Bund Sportplatzbau & Erhaltung, 5th ed.; Deutscher Fussball-Bund: Frankfurt/Main, Germany, 2017.
63. Neal, C. *Planting for Pollinators: Establishing a Wildflower Meadow from Seed*; University of New Hampshire: Durham, UK, 2019.
64. Jarvis, D. Wildflower Meadow: Creation and Management in Land Regeneration. Available online: https://www.forestresearch.gov.uk/documents/2446/BPG_15.pdf (accessed on 10 September 2021).
65. Sundermann, A.; Whelan, R.; Gaynor, B. Practical Advice on Managing Wildflower Meadows. Available online: <https://biodiversityireland.ie/practical-advice-on-managing-wildflower-meadows/> (accessed on 10 September 2021).
66. METERGROUP Bodenfeuchte und Elektrische Leitfähigkeit. Available online: <https://www.metergroup.com/de/environment/produkte/teros-12/> (accessed on 10 September 2021).
67. METERGROUP ECRN-100 Rain Gauge (High Resolution). Available online: <https://www.metergroup.com/environment/products/ecrn-100/> (accessed on 10 September 2021).

12 Curriculum Vitae



Persönliche Daten

Name: DI Oliver Weiss, MBA
Geburtsdatum: 14.08.1994
Geburtsort: Wien
Staatsbürgerschaft: Österreich
Anschrift: Steinerweg 34
2410 Hainburg/Donau
E-Mail: weiss.oliver@aon.at

Berufliche Erfahrungen

Seit 10.2019 Projektleiter bei Green4Cities GmbH
Seit 07.2017 Lektor am Institut für Angewandte Statistik, sowie Lektor und Projektmitarbeiter am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau an der Universität für Bodenkultur Wien
04.2017 – 05.2017 Gartenbau und Projektmanagement Lange GmbH Berlin
10.2015 – 06.2017 Studentischer Mitarbeiter im Lehrbetrieb am Institut für Angewandte Statistik, sowie am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau an der Universität für Bodenkultur Wien

Praktika

08.2012 08.2014 09.2015 08.2016 Stadtgemeinde Hainburg/Donau
07.2016 & 07.2017 Vienna International Airport Schwechat
08.2015 Österreichische Post AG Hainburg/Donau

Ausbildung

08.2020 – 10.2021 Masterstudium an der Donau-Universität Krems
Studienrichtung: General Management
Seit 04.2018 Doktoratsstudium an der Universität für Bodenkultur Wien
08.2015 – 07.2017 Masterstudium Universität für Bodenkultur Wien
Studienrichtung: Landschaftsplanung und -architektur
10.2012 – 08.2015 Bachelorstudium Universität für Bodenkultur Wien
Studienrichtung: Landschaftsplanung und -architektur
09.2004 – 06.2012 Bundesrealgymnasium in 2460 Bruck a. d. Leitha

Auszeichnungen

2019 Erster Platz beim Co-Creation Lab Vienna der Wirtschaftsagentur Wien „Nachhaltige Entwässerung und Nutzung von Regenwasser in der Stadt“
2016/17 Leistungsstipendium aus der „Windhag-Stipendienstiftung für Niederösterreich“
2014/15 2015/16 2016/17 Leistungsstipendium an der Universität für Bodenkultur Wien

Zusatzqualifikationen

Führerschein Klasse B
Sprachen Deutsch Muttersprache, Englisch B2, Französisch B2, Spanisch A2
Spezielle EDV-Kenntnisse MS Office, Statistiksoftware IBM SPSS, AutoCAD, Adobe InDesign CC und Adobe Photoshop