



UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN

# Masterarbeit

## Innovative Bewässerung durch Grauwasserrecycling. Untersuchung der Eignung von Grauwasser zur Bewässerung gebäudenaher Begrünung

verfasst von

Katharina HOFBAUER, BSc BA

im Rahmen des Masterstudiums

Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Wien, April 2022

Betreut von:

Univ.Prof.<sup>in</sup> DI<sup>in</sup> Dr.<sup>in</sup> Rosemarie Stangl  
Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau  
Department für Bautechnik und Naturgefahren

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Katharina Hofbauer', written in a cursive style.

Wien, am 23.04.2022

Katharina Hofbauer

# DANKSAGUNG

Große Dankbarkeit und Wertschätzung möchte ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Anna und Thomas, meiner lieben Siglinde, meinem Bruder Andi sowie der wunderbaren Jacqui zukommen lassen. Eure Unterstützung und euer Zuspruch haben mich dazu ermutigt zu mir selbst zu stehen und so zu sein, wie ich bin. Ihr habt mir die Möglichkeit geschenkt einen selbstbestimmten Lebensweg zu gehen und dafür bin ich euch zutiefst dankbar.

Besonderer Dank gilt meinem Mitbetreuer Michael Gräf. Ohne deine riesige Unterstützung und deinen stets motivierenden Zuspruch hätte ich nicht diesen Lern- und Erfahrungsschatz der letzten 14 Monate sammeln können. Ich bin dankbar für dich als Betreuer, Arbeitskollege und Freund.

Meiner Betreuerin Rosemarie Stangl möchte ich zudem für die wertvolle Unterstützung danken, die nicht erst mit dieser Masterarbeit begann. Durch vielzählige Besuche deiner Lehrveranstaltungen entwickelte sich meine Begeisterung und Leidenschaft für dieses Fachgebiet.

Ich möchte zudem Ulrike Pitha danken, die mich herzlichst in das greenWATERrecycling-Projekt aufgenommen hat und mir die Chance gab hautnah in die Wissenschaft und Forschung einzutauchen.

Allgemein möchte ich dem gesamten gWr-Projektteam für die Zusammenarbeit danken, insbesondere Bernhard Pucher für die angenehme gemeinsame Arbeitsweise und dein wertvolles, fachliches Feedback.

Zuallerletzt möchte ich meinen Freund\*innen meine tiefste Dankbarkeit aussprechen: Martina, Caro, Lisa, Tobi, Juli, meiner alten WG in der Krenngasse, der ganzen GaZ-Familie, für ihren bedingungslosen Beistand in guten und schlechten Zeiten, für ihre Liebe und Freundschaft, die mich immer wieder Kraft schöpfen lassen.

# ZUSAMMENFASSUNG

Die Bewässerung grüner Infrastrukturen mit Grauwasser ist bereits in vielen Ländern der Welt gängige Praxis, um der ressourcenintensiven Bewässerung mit Frischwasser eine nachhaltige und zukunftssträchtige Alternative zu bieten. In Europa ist die Verwendung einer bis dato kaum gebrauchten Wasserquelle wenig etabliert. Die notwendigen Gesetze und Normen für ein Grauwasserrecycling bestehen allerdings. In einem 17-wöchigen Pflanzenversuch wurden zwei urbane Straßenbaumarten (*Acer pseudoplatanus* und *Tilia cordata*) und drei Pflanzenarten, die häufig in Vertikalbegrünungen eingesetzt werden (*Geranium macrorrhizum*, *Hedera helix* und *Heuchera sanguinea*), in jeweils drei Bewässerungsgruppen (Frischwasser, behandeltes Grauwasser und unbehandeltes Grauwasser) untersucht. Ziel war es herauszufinden, ob die Bewässerung mit Grauwasser (behandelt und unbehandelt) eine negative Wirkung auf die Untersuchungsparameter stomatäre Leitfähigkeit, relativer Chlorophyllgehalt, Zuwachs (Blattanzahl, Frischgewicht Spross und Wurzel, Biomasse, Terminaltrieb) ausübt sowie Nitrat-, Phosphat- und pH-Werte des Bodens beeinflusst. In wiederholten Messungen wurden die Parameter erhoben und in Form einfacher sowie mehrfacher Varianzanalysen statistisch ausgewertet. Anhand einer Bewertungsmatrix konnte die Eignung der untersuchten Pflanzenarten für eine Bewässerung mit Grauwasser beurteilt werden. Der Vergleich mit frischwasserbewässerten Pflanzen zeigte, dass nur kleine artabhängige Unterschiede bestanden und der Chlorophyllgehalt und der Zuwachs durch die Grauwasserbewässerung nicht beeinträchtigt wurden. Des Weiteren konnte nur ein leichter Anstieg des Boden-pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit beobachtet werden. Die Wiederverwendung von Grauwasser zu Bewässerungszwecken stellt somit eine langfristig stabile Wasserressource dar, um dem klimawirksamen Grün bei der Minimierung des Urban Heat Island Effects die notwendige Wasserverfügbarkeit zu garantieren.

## ABSTRACT

Worldwide many countries already established greywater irrigation systems for urban green infrastructure. The recycling of greywater offers a great opportunity to save fresh water and to implement a lasting and promising use of irrigation water. There is still a lack of use in Europe, but the laws for greywater recycling indeed do exist. The research at issue tried to survey the impact of treated and untreated greywater irrigation on plant vitality and growth. To this end an 17-week-long examination of two common street trees (*Acer pseudoplatanus* and *Tilia cordata*) and three plant species, which are often used for vertical green (*Geranium macrorrhizum*, *Hedera helix* und *Heuchera sanguinea*) was carried out in three different irrigation groups (freshwater, treated greywater and untreated greywater). The objective was to detect if these forms of irrigation had a negative impact on the following parameters of interest: stomatal conductivity, relative chlorophyll content, growth rates (number of leaves, wet weight of sprout and root, biomass, terminal shoot) as well as the nitrate-, phosphate- and pH-value of the soil. Repeatedly, the parameters were measured and statistically evaluated by making use of ANOVA and two-way ANOVA for repeated measurements. By means of an evaluation matrix, the applicability of the examined plants for greywater irrigation could be assessed successfully. The irrigation with treated and untreated greywater had no significant effect on chlorophyll- and growth-rates of most of the examined species. Greywater irrigation resulted in a small increase in soil pH and phosphate but had no significant influence on nitrate. The results suggest that the greywater recycling instead of the use of fresh water for irrigation provides a high potential to guarantee a sustainable long-term water supply. Greywater helps to meet the water demand of plants in urban green infrastructures, which maintain necessary ecosystem services.

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<i>A. pseudoplatanus</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i> (Bergahorn)
Bauwerksbegrünung	Sammelbegriff für Dach- und Vertikalbegrünungen
BSB <sub>5</sub>	biochemischer Sauerstoffbedarf
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i> (Kolibakterium)
FW	Frischwasser
<i>G. macrorrhizum</i>	<i>Geranium macrorrhizum</i> (Balkan- Storchschnabel)
bGW	Grauwasser aus der Referenzanlage, <b>behandelt</b>
sGW	synthetisches Grauwasser aus dem Labor, <b>unbehandelt</b>
<i>H. helix</i>	<i>Hedera helix</i> (Gemeiner Efeu)
<i>H. sanguinea</i>	<i>Heuchera sanguinea</i> (Purpurglöckchen)
<i>T. cordata</i>	<i>Tilia cordata</i> (Winterlinde)
UHIE	Urban Heat Island Effect
Vertikalbegrünung	vertikale Begrünung von Fassaden und Wänden

# INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	12
1.1	Problemstellung und Motivation .....	12
1.2	Ziele und Erwartungshaltung.....	13
1.3	Forschungsfragen und Hypothesen.....	14
2	Grauwasser .....	17
2.1	Definition und Inhaltsstoffe .....	17
2.2	Reinigung für Grauwassernutzung.....	19
2.3	Verwendung und Potenziale der Grauwassernutzung zu Bewässerungszwecken .....	21
2.3.1	Erfahrungen aus internationalen Studien.....	21
2.3.2	Anforderungen an Bewässerungswasser in Österreich.....	22
2.3.3	Risiken der Grauwasserbewässerung .....	28
3	Gebäudenahe Begrünung.....	29
3.1	Vertikalbegrünung .....	29
3.1.1	Vertikalbegrünungssysteme .....	30
3.1.2	Pflanzen für Vertikalbegrünungen. Übersicht.....	32
3.1.3	Bewässerungssysteme .....	32
3.2	Stadtbäume .....	34
3.2.1	Problematiken von Stadtbäumen.....	34
3.2.2	Bewässerung von Stadtbäumen .....	35
4	Methode. Pflanzenversuch.....	37
4.1	Aufbau des Pflanzenversuchs .....	37
4.2	Auswahl der Pflanzenarten .....	38
4.3	Töpfe und Substrat.....	39
4.4	Bewässerung.....	40

4.4.1	Behandeltes Grauwasser (bGW).....	41
4.4.2	Unbehandeltes Grauwasser (sGW).....	42
4.5	Zeitlicher Ablauf der Datenerhebung.....	42
4.6	Datenerhebung.....	43
4.6.1	Stofflich-chemische und mikrobiologische Analyse der Grauwasserproben	43
4.6.2	Relativer Chlorophyllgehalt.....	47
4.6.3	Stomatäre Leitfähigkeit .....	48
4.6.4	Zuwachs.....	49
4.6.5	Frischgewicht .....	49
4.6.6	Bodenanalysen: pH-Wert, Nitrat und Phosphat.....	50
4.6.7	Eignungstabelle.....	52
4.7	Statistische Auswertung .....	53
5	Ergebnisse .....	55
5.1	Grauwasseranalyse .....	55
5.1.1	Analyse des Ab- und Zulaufs der Referenzanlage Wiener Neustadt .....	55
5.1.2	Analyse des bGW und sGW in den Tanks des Gewächshauses .....	57
5.2	Relativer Chlorophyllgehalt.....	59
5.2.1	<i>Acer pseudoplatanus</i> .....	59
5.2.2	<i>Tilia cordata</i> .....	60
5.2.3	<i>Geranium macrorrhizum</i> .....	60
5.2.4	<i>Hedera helix</i> .....	61
5.2.5	<i>Heuchera sanguinea</i> .....	62
5.2.6	Zusammenfassung relativer Chlorophyllgehalt.....	63
5.3	Stomatäre Leitfähigkeit.....	64
5.3.1	<i>Acer pseudoplatanus</i> .....	64
5.3.2	<i>Tilia cordata</i> .....	65
5.3.3	<i>Geranium macrorrhizum</i> .....	66

5.3.4	<i>Hedera helix</i> .....	67
5.3.5	<i>Heuchera sanguinea</i> .....	68
5.3.6	Zusammenfassung stomatäre Leitfähigkeit .....	69
5.4	Zuwachs Blattanzahl .....	70
5.4.1	<i>Acer pseudoplatanus</i> .....	70
5.4.2	<i>Tilia cordata</i> .....	70
5.4.3	<i>Geranium macrorrhizum</i> .....	71
5.4.4	<i>Hedera helix</i> .....	72
5.4.5	<i>Heuchera sanguinea</i> .....	73
5.4.6	Zusammenfassung Blattanzahl .....	73
5.5	Frischgewicht Spross und Wurzel .....	74
5.5.1	<i>Geranium macrorrhizum</i> .....	74
5.5.2	<i>Hedera helix</i> .....	75
5.5.3	<i>Heuchera sanguinea</i> .....	76
5.5.4	Zusammenfassung Frischgewicht Spross und Wurzel .....	77
5.6	Zuwachs Biomasse .....	77
5.6.1	<i>Geranium macrorrhizum</i> .....	78
5.6.2	<i>Hedera helix</i> .....	79
5.6.3	<i>Heuchera sanguinea</i> .....	80
5.6.4	Zusammenfassung Zuwachs Frischgewicht.....	81
5.7	Zuwachs Terminaltrieb.....	81
5.7.1	<i>Acer pseudoplatanus</i> .....	81
5.7.2	<i>Tilia cordata</i> .....	82
5.7.3	Zusammenfassung Zuwachs Terminaltrieb.....	82
5.8	Bodenanalytik.....	82
5.8.1	Nitrat .....	82
5.8.2	Phosphat .....	83

5.8.3	pH-Wert.....	84
5.8.4	Zusammenfassung Bodenproben .....	84
6	Diskussion .....	85
6.1	Eignung des Grauwassers zur Anwendung als Bewässerungswasser.....	85
6.2	Auswirkungen der Bewässerung mit Grauwasser auf relativen Chlorophyllgehalt, Transpiration und Pflanzenwachstum .....	87
6.2.1	Relativer Chlorophyllgehalt und Blattvitalität .....	87
6.2.2	Stomatäre Leitfähigkeit .....	90
6.2.3	Zuwachs.....	91
6.2.4	Bodenanalytik .....	92
6.3	Beurteilung der geeigneten Pflanzen für Grauwasserbewässerung .....	93
6.4	Forschungsfragen und -antworten.....	95
7	Conclusio .....	98
8	Literaturverzeichnis.....	100
9	Abbildungsverzeichnis .....	107
10	Tabellenverzeichnis .....	111
11	Anhang. Statistische Daten .....	112
11.1	Relativer Chlorophyllgehalt.....	113
11.2	Stomatäre Leitfähigkeit.....	115
11.3	Zuwachs Blattanzahl.....	118
11.4	Frischgewicht Spross und Wurzel .....	120
11.5	Zuwachs Biomasse .....	122
11.6	Zuwachs Terminaltrieb.....	125
11.7	Bodenanalytik.....	126



# 1 | Einleitung

## 1.1 | Problemstellung und Motivation

Der fortlaufende Prozess der Urbanisierung spiegelt sich in den Zahlen der UN wider: Bis 2050 werden zwei Drittel der globalen Bevölkerung in urbanen Gebieten leben. Das bedeutet, dass 86% des weltweiten Bevölkerungswachstums in Städten stattfindet (Montgomery 2008). Diese Entwicklung bedingt u.a. eine große Nachfrage nach Energie, Wasser und Wohnfläche. Die stetige Zunahme an versiegelten Flächen, die sich durch einen hohen Anteil an Beton-, Asphalt- und anderen Flächen aus harten Materialien kennzeichnet, zählt zu den zentralen Gründen, die den sogenannten Urban Heat Island Effect (UHIE) bewirken (Pradhan et al. 2019). Dieser umfasst den Prozess der Entstehung städtischer Hitzeinseln, den bereits Oke (1982) beschrieben hat. Stark versiegelte Flächen erhitzen sich untermals, indem sie den Großteil der Energie der Sonnenstrahlung absorbieren und im Laufe des Tages als Wärmeenergie wieder abgeben. Zusätzlich dazu entsteht anthropogen verursachte Hitze aus Wärmequellen wie Verkehr, Fabriken, Kühlanlagen etc., welche die Erwärmung städtischer Flächen begünstigt (Menberg et al. 2013; Oke 1982).

Grüne Infrastruktur, in Form von Bäumen, grünen Freiflächen, begrünten Dächern und vertikalen Wandbegrünungen (Koc et al. 2017), etablierte sich als notwendige Klimawandelanpassungsmaßnahme, um die Lebensraumqualität in ökologischer als auch sozialer Hinsicht zu gewährleisten (Balany et al. 2020). Die Minimierung des UHIE ist einer der zentralen Punkte, wenn es um Mikroklima verbessernde Maßnahmen geht. Größe, räumliche Verteilung und Art der Grünflächen spielen eine wesentliche Rolle, um das volle Potenzial ihrer Ökosystemleistungen entfalten zu können. Neben der Senkung der Umgebungstemperatur sind Luftschadstofffilterung, Lärmreduktion und ästhetische Aspekte als positive Effekte grüner Infrastrukturen zu nennen, die das menschliche Wohlbefinden begünstigen (Stangl et al. 2019). Die Effektivität von Bauwerksbegrünungen zur Minderung des UHIE wurde in den letzten Jahren vielfach untersucht und bestätigt: Die natürliche Kühlleistung, die aufgrund von Evapotranspiration<sup>1</sup> und Beschattung durch die Vegetation entsteht, ist eines der Hauptinstrumente, um der Erhitzung städtischer Flächen entgegenzuwirken (Lehmann 2014; Alexandri et Jones 2008; Balany et al. 2020; Stangl et al. 2019).

---

<sup>1</sup> Evapotranspiration: Summe aus der Verdunstung durch Blattoberfläche (Transpiration) und der Verdunstung der Bodenoberfläche (Evaporation) (Kadereit 2014)

Eine zukünftige Herausforderung in urbanen als auch ruralen Gebieten wird zudem die Bewässerung der grünen Infrastrukturen und deren Wasserbereitstellung sein. Eine bedarfsorientierte Bewässerung unterstützt die Vegetation darin, ihre klimawirksamen Eigenschaften besonders in den heißen und trockenen Sommermonaten zu gewährleisten (Winker et al. 2019). Im Hinblick auf die Zunahme grüner Infrastrukturen, wie z.B. Vertikalbegrünungen, stellt die notwendige Bewässerung und damit nachhaltige Nutzung der Ressource Wasser einen zentralen Punkt innovativer Begrünungstechnologien dar. Die herkömmliche Verwendung von Frischwasser ist langfristig zu überdenken.

Die Entwicklung von Bewässerungssystemen, die Grauwasser (siehe Kapitel 2.1) verwenden, ermöglicht die Wiederverwendung einer Ressource, die bis dato in Österreich in den Abfluss geleitet wurde. Grauwasser stellt eine im Jahresverlauf stabile Wassermenge dar, die dazu genutzt werden könnte, die erforderliche Bewässerung der Grünflächen in Hitzeperioden zu garantieren. Schätzungen zufolge können durch Grauwasserrecycling 9-46% an Frischwasser gespart werden (Fowdar et al. 2017). Laut einer Erhebung des BMLRT (2017) liegt der durchschnittliche Pro-Kopf-Wasserverbrauch in Österreich bei 130 l täglich. Davon fallen 51% an Grauwasser aus Wasserhähnen, Dusche, Badewanne, Wasch- und Spülmaschine an, was eine Menge an 80 l/Kopf/Tag umfasst.<sup>2</sup> Die Nutzung des Grauwassers als Bewässerung grüner Infrastrukturen könnte einen wesentlichen Beitrag zum Thema nachhaltige Stadtentwicklung leisten.

Diese Masterarbeit entstand im Rahmen des FFG-Forschungsprojekts „greenWATERrecycling“. Der Langtitel des Projekts lautet *Thermische und stoffliche Grauwassernutzung zur klimatisch wirksamen Gebäudebegrünung und erneuerbaren Warmwassernutzung*. Zentral in diesem Projekt sind die Erforschung der Kombination der Themenfelder Grauwasserrecycling, Abwasserwärmerückgewinnung und Vertikalbegrünung. Die Masterarbeit setzte sich konkret mit der Erforschung der Eignung von Grauwasser zu Bewässerungszwecken gebäudenaher Begrünung auseinander.

## 1.2 | Ziele und Erwartungshaltung

Ziel dieser Masterarbeit war die Analyse des anfallenden, behandelten Grauwassers (bGW) einer Referenzanlage auf dessen Inhaltsstoffe, um weiterführend zu untersuchen, ob es zur

---

<sup>2</sup> Pro Kopf Wasserverbrauch in Österreich: von 130 l/Kopf/Tag stammen 35 l (27%) aus Wasserhähnen (Bad, WC, Küche), 25 l (19%) aus Dusche, 13 l (10%) aus Waschmaschine, 4 l (3%) aus Badewanne sowie 3 l (2%) aus Geschirrspüler (BMLRT; ÖVGW 2017).

Bewässerung gebäudenaher Begrünung geeignet ist. Hierbei richtete sich der Fokus auf chemische und mikrobiologische Inhaltsstoffe, die für eine Zulassung als Bewässerungswasser in Österreich relevant sind. Ein Schwerpunkt der Arbeit war es herauszufinden, ob ausgewählte Pflanzen gebäudenaher Begrünungen eine Bewässerung mit behandeltem Grauwasser (bGW) bzw. unbehandeltem Grauwasser (uGW) schadlos überstehen. Für diesen Zweck wurden drei unterschiedliche Bewässerungsvarianten getestet: behandeltes Grauwasser aus einer Referenzanlage (bGW), unbehandeltes Grauwasser (sGW), das synthetisch im Labor hergestellt wurde, und Frischwasser (FW).

Die Pflanzen wurden im Rahmen eines Topfversuches im Gewächshaus der Universität für Bodenkultur (Peter Jordan Straße 62, 1190 Wien) beobachtet und anhand der Parameter relativer Chlorophyllgehalt, stomatäre Leitfähigkeit und Zuwachs beurteilt. Die daraus resultierenden Ergebnisse bieten einen Überblick über die Eignung von Grauwasser zu Bewässerungszwecken gebäudenaher Begrünung.

Eine genaue Aufschlüsselung des Versuchs wird in Kapitel 4 näher erörtert.

## 1.3 | Forschungsfragen und Hypothesen

Die vorliegende Arbeit behandelte folgende Forschungsfragen und Hypothesen:

**F1:** Welche chemischen und mikrobiologischen Inhaltsstoffe sind im Grauwasser (bGW) vorzufinden, und entsprechen diese den Mindestanforderungen an Bewässerungswasser?

**F2:** Welche Auswirkungen hat Grauwasser (bGW + sGW) auf den relativen Chlorophyllgehalt, auf die stomatäre Leitfähigkeit und auf das Wachstum der untersuchten Pflanzen?

**F3:** Welche der untersuchten Pflanzen, die in gebäudenahen Begrünungen (Vertikalbegrünungen und Stadtbäume) eingesetzt werden, überleben schadlos eine Bewässerung mit Grauwasser (bGW + sGW)?

**H1:** Die chemischen und mikrobiologischen Inhaltsstoffe der Grauwasserproben (bGW) entsprechen den Mindestanforderungen an Bewässerungswasser.

**H2:** Die Bewässerung mit Grauwasser (bGW + sGW) zeigt keine negativen Einflüsse hinsichtlich des relativen Chlorophyllgehalts, der stomatären Leitfähigkeit und des Zuwachses der untersuchten Pflanzen.

**H3:** Grauwasser (bGW + sGW) eignet sich zur Bewässerung der untersuchten Pflanzen in Form von Vertikalbegrünung und Stadtbäumen

Das in Tabelle 1 ersichtliche Forschungsdesign der Masterarbeit veranschaulicht die den Forschungsfragen zugrundeliegenden Thesen, Methoden und Ergebnisse.

Tabelle 1. Forschungsdesign der Masterarbeit (eigene Abbildung)

## Untersuchung der Eignung von Grauwasser zur Bewässerung gebäudenaher Begrünung

	F1	F2	F3
FORSCHUNGSFRAGEN	Welche chemischen und mikrobiologischen Inhaltsstoffe sind im Grauwasser (bGW) vorzufinden und entsprechen diese den Mindestanforderungen an Bewässerungswasser?	Welche Auswirkungen hat Grauwasser (bGW + sGW) auf den relativen Chlorophyllgehalt, die stomatare Leitfähigkeit und das Wachstum der untersuchten Pflanzen?	Welche der untersuchten Pflanzen, die in gebäudenahen Begrünungen (Vertikalbegrünungen und Straßenbegleitgrün) eingesetzt werden, überleben die Bewässerung mit Grauwasser (bGW + sGW) schadlos?
THESEN	Die chemischen Inhaltsstoffe der Grauwasserproben (bGW) entsprechen den Mindestanforderungen an Bewässerungswasser.	Die Bewässerung mit Grauwasser (bGW + sGW) zeigt keine negativen Einflüsse hinsichtlich der untersuchten Parameter.	Grauwasser (bGW + sGW) eignet sich zur Bewässerung der untersuchten Pflanzen in Form von Vertikalbegrünung und Straßenbegleitgrün.
METHODEN	<ul style="list-style-type: none"> <li>  Literaturrecherche zu theoretischen Grundlagen</li> <li>  Beprobung des Grauwassers aus der Referenzanlage (bGW)</li> <li>  Analyse des Grauwasser (bGW) durch das Institut für Siedlungswasserbau, BOKU, auf chemische und mikrobiologische Inhaltsstoffe</li> <li>  Vergleich der Analyseergebnisse mit Mindestanforderungen an Bewässerungswasser in Österreich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>  Durchführung eines Pflanzenversuches im Gewächshaus der Universität für Bodenkultur Wien im Zeitraum von April 2020 bis Oktober 2020 inkl. statistischer Auswertung</li> <li>  Testpflanzen: <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Acer pseudoplatanus</i></li> <li><i>Tilia cordata</i></li> <li><i>Geranium macrorrhizum</i></li> <li><i>Hedera helix</i></li> <li><i>Heuchera sanguinea</i></li> </ul> </li> <li>  Erhebungsparameter <ul style="list-style-type: none"> <li>relativer Chlorophyllgehalt</li> <li>stomatäre Leitfähigkeit</li> <li>Zuwachs</li> <li>Bodenproben</li> </ul> </li> <li>  Drei Bewässerungsgruppen bestehend aus <ul style="list-style-type: none"> <li>FW (Frischwasser), bGW (behandeltes Grauwasser aus Referenzanlage), sGW (unbehandeltes Grauwasser hergestellt im Labor des Instituts f. Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, BOKU)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>  Diskussion der Ergebnisse der Analyse des Grauwassers (bGW + sGW) und des Pflanzenversuches</li> <li>  Vergleichsmatrix: Beurteilung der Ergebnisse inkl. Ausarbeitung einer Eignungsliste</li> </ul>
ERGEBNISSE	Auflistung der chemischen und mikrobiologischen Inhaltsstoffe des Grauwassers (bGW) und Prüfung, ob diese den österreichischen Mindestanforderungen entsprechen	Untersuchung des Einflusses der Grauwasserbewässerung auf die erhobenen Parameter	Liste der Pflanzen, die eine Bewässerung mit Grauwasser (bGW+ sGW) schadlos überleben

### 2.1 | Definition und Inhaltsstoffe

Grauwasser stellt den fäkalienfreien Teilstrom des gesamten häuslichen Abwassers dar, ohne Abwasser aus Toiletten (ÖNORM EN 12056-1; ÖNORM EN 16941:2). Demnach wird Grauwasser als gesammeltes Abwasser aus Waschmaschine, Badewanne, Dusche und Handwaschbecken definiert. Als gering verschmutzt gilt es, sofern es keine Küchen- und Maschinenabwässer enthält (ÖNORM EN 16941:2) (Abbildung 1).



Abbildung 1. Definition Grauwasser und Schwarzwasser (eigene Abbildung)

Die Inhaltsstoffe des Grauwassers variieren und sind von demographischen Aspekten wie Bevölkerungsdichte (Wohndichte pro Wohneinheit) und der geographischen Lage abhängig (Al-Jayyousi 2003). Grauwasser beinhaltet seifenhaltige Produkte (Tenside), Salze, Fäkalcoliformen<sup>3</sup>, pathogene Keime und Feststoffe verschiedenster Art (Alfiya et al. 2012).

Tabelle 2 zeigt, welche Inhaltsstoffe in haushaltsüblichen Grauwässern in europäischen Ländern zu finden sind und stellt sie in direkten Vergleich miteinander. Hierbei handelt es sich um Grauwasser inklusive Maschinenabwässern (Spül- und Waschmaschine). Die für die Grauwasseranalysen relevanten Parameter sind: pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, biologischer (BSB<sub>5</sub>) und chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Trübung, Nitrat, Phosphor und *E. coli*. Bei sämtlichen Parametern sind große Schwankungsbreiten zu beobachten,

<sup>3</sup> Coliforme Bakterien, u. a. *Escherichia coli*, die aus dem Darm von Menschen und Tieren stammen (Drča 2007).

ausgenommen ist der pH-Wert, der bei allen untersuchten Grauwässern in einem Bereich zwischen 7,1 und 7,8 liegt. Die unterschiedlichen Ergebnisse hängen mit

- | der Art der verwendeten Hygieneprodukte bzw. Reinigungsmittel
- | der Menge des Grauwassers
- | dem Ort des entstehenden Grauwassers

zusammen (Ghaitidak und Yadav 2013; Walker et Schenk 2016; Hourlier et al. 2010; Boano et al. 2020; Merz et al. 2007).

*Tabelle 2. Zusammensetzung verschiedener Grauwasser aus europäischen Ländern (eigene Bearbeitung), <sup>1</sup> (Merz et al. 2007); <sup>2</sup> (Hourlier et al. 2010); <sup>3</sup> (Ghaitidak et Yadav 2013; (Jefferson et al. 2004); <sup>4</sup> (Boano et al. 2020); <sup>5</sup> (Ghaitidak et Yadav 2013); <sup>6</sup> (Ghaitidak et Yadav 2013)*

PARAMETER	GER <sup>1</sup>	FRA <sup>2</sup>	GB <sup>3</sup>	NOR <sup>4</sup>	SWE <sup>5</sup>	ESP <sup>6</sup>
Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	645	382	32,7	-	196	-
Trübung [NTU]	29	31	26,5-164	-	-	20
pH- Wert	7,6	7,2	7,1	7,1	7,8	7,6
P gesamt [mg/l]	1,6	-	0,4-0,9	-	4,2	-
Nitrat gelöst [mg/l]	0	-	3,9	-	-	-
BSB <sub>5</sub> [mg/l O <sub>2</sub> ]	59	115	39-155	129	425,0	130,3
CSB [mg/l O <sub>2</sub> ]	109	258	33-587	241	890	409,1
<i>E. coli</i>	1,4*10 <sup>5</sup>	3,6*10 <sup>6</sup>	10-3.9 <sup>5</sup>	4,9E+06	-	-

Bezogen auf die Art des Grauwassers (exkl. oder inkl. Maschinenabwasser) haben Walker et Schenk (2016) in ihrer Studie zur „*Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser*“ zahlreiche Grauwasseranalysen in Deutschland durchgeführt und diese weiterführend auf pflanzentoxische Inhaltsstoffe untersucht. Es wurde Grauwasser inklusive (Wasch- und Spülmaschine, Badewanne, Dusche, Handwaschbecken) und exklusive Maschinenabwässern (Badewanne, Dusche, Handwaschbecken) berücksichtigt (Walker et Schenk 2016). So liegt der pH-Wert des Grauwassers exkl. Waschmaschine zwischen 7,7 und 8,1, im Gegensatz dazu bei Grauwasser inkl. Waschmaschine bei 9,1. Die elektrische Leitfähigkeit ist bei letzterer mit 1906  $\mu\text{S}/\text{cm}$  deutlich höher als bei Grauwasser, das nur aus Abwasser aus Badewanne, Dusche und Handwaschbecken besteht (755  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Bei dem Vergleich von Grauwasser (exkl. Maschinenabwässer) und Frischwasser ist der pH- Wert des Grauwassers mit 7,1- 8,1 nahezu gleich dem pH-Wert des Frischwassers mit 7,8 - 8,0. Salzgehalt (350 mg/l) sowie Nitratwerte (7,1 mg/l) sind im Grauwasser erhöht. Als Fazit

beschreiben Walker et Schenk (2016), dass die erhobenen Parameter keine signifikanten Unterschiede zwischen Grau- und Frischwasser aufweisen und die untersuchten Gruppen nur geringfügig variieren. Erst wenn Waschmaschinenabwasser integriert ist, unterscheidet sich Grauwasser maßgeblich von Frischwasser (Walker et Schenk 2016).

Im Zusammenhang mit dem Ort der Entstehung des Grauwassers, differenzierte Al-Jayyousi (2003) in einer Fallstudie in Jordanien u. a., aus welcher Art von Haushalt das untersuchte Grauwasser stammt und inwiefern die Untersuchungsparameter je nach Wohndichte des Haushaltes schwanken. So weisen Single-Haushalte zwar einen höheren BSB<sub>5</sub> (110 mg/l) und CSB (256 mg/l) als Mehrgeschosswohnungsbau (33 mg/l) bzw. Colleges (80-96 mg/l) auf, jedoch auch einen geringeren Wert an Trübung (14 NTU). Diese ist in Einfamilienhäusern am höchsten (76,5 NTU). Coliformen konnten im Grauwasser aus Colleges mit  $5,2 \cdot 10^6$  nachgewiesen werden, hingegen liegt der Wert in Mehrgeschosswohnungsbauten deutlich niedriger bei  $1 \cdot 10^6$  (Al-Jayyousi 2003).

## 2.2 | Reinigung für Grauwassernutzung

Bevor Grauwasser in verschiedenen Bereichen (z.B. Gartenbewässerung, Reinigung von Wäsche, WC-Spülung) eingesetzt wird, ist zu prüfen, ob das Grauwasser unbehandelt genutzt werden kann, oder ob bei starker Verschmutzung eine Reinigung dessen notwendig ist, um den Mindestanforderungen für eine Wiederverwendung zu entsprechen. Folgende vier Kriterien müssen laut ÖNORM EN 16941:2 für eine weitere Nutzung erfüllt sein: hygienische Sicherheit (Einhaltung gesetzlicher Standards), Ästhetik (bezüglich Farbe und Geruch), Umweltverträglichkeit (kein Schadeintrag in Böden und Grundwasser) und technische bzw. ökonomische Durchführbarkeit.

Die Grauwasserreinigung stellt einige Herausforderungen dar, da die Zusammensetzung des Grauwassers, wie bereits in Kapitel 2.1. erwähnt, stark variieren kann. Grundsätzlich sind folgende Reinigungsschritte des Grauwassers möglich:

- | Mechanische Reinigung (für Feststoffe, Fette, Öle)
- | Biologische Reinigung (für Mikroorganismen, organische Stoffe (CSB, BSB<sub>5</sub>), Stickstoff)
- | Chemische Reinigung (Desinfektion)
- | Sedimentation/Flotation
- | Siebung
- | Hygienisierung (ÖNORM EN 16941:2)

Hierbei ist noch zu erwähnen, dass eine Grauwasserreinigung auch durch Living-Wall-Systeme (wandgebundene Vertikalbegrünungen, siehe Kapitel 3.1.1) möglich ist, wie Studien ergaben (Fowdar et al 2017; Pucher et al. 2020). Das unbehandelte Grauwasser dient

hier nicht nur der Bewässerung, sondern wird zusätzlich durch im Substrat befindliche, physikalische Filter (z.B. Sand, Bimsstein, Zeolith, Perlit, Blähton etc.) gereinigt. Ausgewählte Pflanzen und im Substrat befindliche Mikroorganismen (z.B. *Carex appressa*, *Canna lillies*) erfüllen zusätzlich eine biologische Reinigung (Fowdar et al. 2017; Pucher et al. 2020)

Die Behandlung von Grauwasser kann in verschiedene Stufen eingeteilt werden (Abbildung 2). Eine der Nutzung und der dafür erforderlichen Wasserqualität angepasste Behandlung ist laut ÖNORM EN 16941:2 adäquat zu planen. Grauwasser, das sich für Bewässerungszwecke eignen soll, durchläuft Stufe 1 und/oder Stufe 2. Stufe 1 umfasst eine primäre Reinigung mithilfe physikalischer und chemischer Filter, während in Stufe 2 biologische Reinigungsprozesse zentral sind. Stufe 3 entspricht der Vorbereitung des Abwassers für Trinkwasserqualität (Gupta et al. 2012).

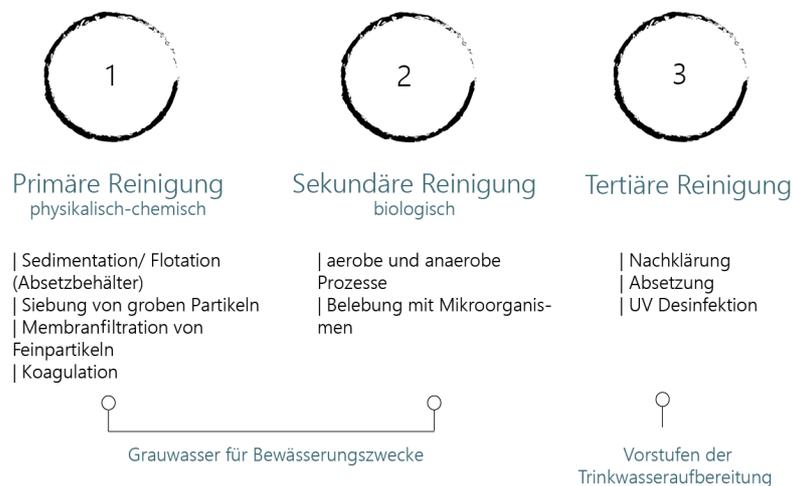


Abbildung 2. Reinigungsstufen für Grauwasserbehandlung (Gupta et al. 2012; Boyjoo et al. 2013; ÖNORM EN 16941:2; eigene Abbildung)

Die sogenannten *Basic two-stages systems* (Stufe 1) nach Gupta et al. (2012) arbeiten mit einer physikalischen Filtration (Grobfilter, Membranfilter) inklusive anschließender Desinfektion (z.B. durch UV oder chemisch mittels Chlor, Brom, Alaun, Aluminiumsalzen etc.) (Gupta et al. 2012; Boyjoo et al. 2013). Dieser Prozess ist gekennzeichnet durch (1) eine kurze Verweildauer des Grauwassers bis zur Wiederverwertung, (2) einen hohen Anteil an organischen Stoffen und Schwebstoffen, welche den chemischen Reinigungsprozess limitieren. Je größer die flockenartigen Partikel sind, desto geringer ist die Leistung der Desinfektion. Aus diesem Grund ist eine mechanische Vorfiltration notwendig (Al-Jayyousi 2003; Boyjoo et al. 2013). Eine Alternative zu Grobfiltern sind Membranfilter, welche eine wesentlich höhere Klärung des Wassers ermöglichen. Diese bieten eine bessere Barriere für freischwebende Partikel: Die Maschenweite des Membranfilters beträgt 0,5 mm bis hin zu

molekularer Filtrierung (Hyperfiltrierung) durch Umkehrosmose (Al-Jayyousi 2003; Gupta et al. 2012). Unabhängig vom Filter muss die Verweilzeit des Grauwassers bis hin zur Nutzung beachtet werden, da diese zu anaeroben Zuständen führen und wesentlichen Einfluss auf die Wasserqualität haben kann (siehe Kapitel 2.3.2). Eine regelmäßige Reinigung der Membrane gewährleistet die gewünschte Filterleistung (Al-Jayyousi 2003). Anzumerken ist, dass der Einsatz von Chlor den Chlorid-Gehalt im Bewässerungswasser erhöhen kann. Chlorid zählt zwar zu den lebensnotwendigen Pflanzennährstoffen, hohe Chlorid-Gehalte im Bewässerungswasser können aber zu Akkumulationen in den Blättern und infolgedessen zu deren Schädigung führen (ÖWAV 2001).

Biologische Filtersysteme (Stufe 2) dienen der Zersetzung biologisch abbaubarer Materialien. Hierbei kommt es zu einer Kombination aus physikalischen und biologischen Filtern: sogenannte *Membrane Bioreactors* (MBR) und biologisch durchlüftete Filter (BAF=*Biological aerated filter*) (Boyjoo et al. 2013). BAF bestehen aus einem Tiefenfilter mit einem darauf fixierten Biofilm. Die darauf enthaltenen Mikroorganismen reinigen das Wasser und bauen organische Stoffe ab, was einen desinfizierenden Effekt auf das Grauwasser hat. MBR enthält eine Membran, die für die physikalische Reinigung zuständig ist (beispielsweise einen Reaktor aus aktivem Klärschlamm). Die Membran kann im Reaktor oder extern installiert werden (Al-Jayyousi 2003); (Gupta et al. 2012; Boyjoo et al. 2013).

## 2.3 | Verwendung und Potenziale der Grauwassernutzung zu Bewässerungszwecken

### 2.3.1 | Erfahrungen aus internationalen Studien

Die Einsatzmöglichkeiten von Grauwasser zur Wiederverwendung als Nutzwasser sind vielfältig und reichen von Toilettenspülung, Waschmaschine, Autowäsche, Feuerwehreinsatz, Klimaanlage bis hin zur Garten- und Landschaftsbewässerung. Pinto et al. (2009) untersuchten in ihrer Studie „*Effects of greywater irrigation on plant growth, water use and soil properties*“ das Recycling von Grauwasser zur Bewässerung grüner Infrastrukturen wie gebäudenaher Grünflächen, Golfplätze, Parks sowie die Wiedernutzung für Toilettenspülung und die Aufbereitung für die Grundwasserspeisung. Die in Australien durchgeführte Studie bezieht sich auf die Wiederverwendung von Grauwasser in ariden Gebieten. Der Fokus der Arbeit lag auf der Untersuchung der Auswirkungen von Grauwasserbewässerung auf Pflanzenwachstum, Wasserbedarf und den weiterführenden Einfluss auf pH-Wert des Bodens, elektrische Leitfähigkeit sowie Nährstoffverfügbarkeit von

Stickstoff und Phosphor. Die Ergebnisse zeigten, dass diese Form der Bewässerung zwar keinen signifikanten Effekt auf den Stickstoff- und Phosphor-Gehalt des Bodens hat, jedoch wurde eine eindeutige Wirkung auf den pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit ersichtlich. Weder auf die Trockenbiomasse noch auf auch den Zuwachs (Blattanzahl) und Wasserverbrauch der Pflanzen hatte Grauwasser einen Einfluss, der signifikant ist (Pinto et al. 2009).

Alfiya et al. (2012) kamen zu ähnlichen Ergebnissen. In Israel wurde anhand der Testpflanze *Lolium perenne* eine Studie zur Auswirkung der Bewässerung mit Frischwasser, behandeltem Grauwasser und unbehandeltem Grauwasser auf Boden, Pflanzen und die menschliche Gesundheit untersucht. Getestet wurde hierbei nicht nur das Bewässerungs-, sondern auch das überbleibende Wasser, nachdem es durch das Substrat durchgesickert war. Sowohl unbehandeltes als auch behandeltes Grauwasser führten in ihrem Versuch bezüglich der spezifischen Absorptionsrate, der elektrischen Leitfähigkeit, des pH- Werts und der Alkalität zu keinen signifikanten Unterschieden zwischen den Bewässerungsgruppen. Die Pflanzen zeigten in keiner Gruppe außergewöhnliche Anzeichen für Stress oder phytotoxische Zustände. Des Weiteren konnten die Autor\*innen beobachten, dass die Konzentration an anionischen und kationischen Tensiden in Frischwasser und behandeltem Grauwasser annähernd gleich hoch ist. Hiervon unterscheidet sich jedoch das Grauwasser ohne Behandlung signifikant: Die Konzentration der Tenside war erhöht, wurde aber im durch das Substrat gesickerten Wasser in keiner der Bewässerungsgruppen mehr nachgewiesen. Der CSB des unbehandelten Grauwassers war erhöht. Da dieses Milieu Einfluss auf vermehrtes Wachstum pathogener Keime ausübt, kann dies zu einer Kontamination von Oberflächen- als auch Grundwasser führen (Alfiya et al. 2012). Die Ergebnisse zeigten, dass sich behandeltes Grauwasser wesentlich besser für Bewässerungszwecke eignet, da die resultierende Qualität konstanter ist und sich von der des Frischwassers nicht deutlich unterscheidet. Somit kann die Gesundheit von Boden, Pflanze und weiterführend Mensch gewährleistet werden (Alfiya et al. 2012), wie auch später von Walker et Schenk (2016) bestätigt werden konnte.

### 2.3.2 | Anforderungen an Bewässerungswasser in Österreich

Mit dem Aktionsplan „*Closing the loop - An EU action plan for the circular economy*“ (COM (2015) 614 Europäische Kommission) wurde in der Europäischen Kommission die EU-rechtliche Grundlage für die Wiederverwendung von behandeltem Grauwasser in der EU geschaffen. Unter anderem sollten regulative Instrumente für die Mindestanforderungen an recyceltes Grauwasser in der EU festgelegt werden (Alcade-Sanz et Gawlik 2017). Der Bericht

“Minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge” (Alcade-Sanz et Gawlik 2017) stellt die technische Grundlage für ein EU-weites Regelwerk dar. Bestehende Gesetze und Regelwerke aller EU-Mitgliedsstaaten wurden hierbei mitberücksichtigt. Entscheidende Parameter sind *E. coli* (<10 KBE/100ml), BSB<sub>5</sub> (<10 mg/l), suspendierende Schwebstoffe (<10 mg/l) und Trübung (<5 BTU). Grenzwerte sind der EU-Kommunalabwasserrichtlinie 91/271/EWG zu entnehmen (Helmecke 2018).

Das ehemalige Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sah in dem BGBl. II Nr. 98/2010 den Schutz des Grundwassers in Österreich vor und untersagte den Eintritt von Schadstoffen in das Grundwasser. Das betrifft sämtliche Bewässerungswasser, die folglich Wasser in den Boden eintragen. Schwellenwerte für Schadstoffe sind festgelegt und dürfen nicht überschritten werden. Bei der Wiederverwendung von Grauwasser ist dies unbedingt zu beachten (BGBl II 98:2010).

*Tabelle 3. Schwellenwerte für im Grundwasser nachgewiesene Stoffe. nach BGBl. II 98/2010 (eigene Bearbeitung)*

SCHADSTOFFE	SCHWELLENWERT
Arsen [µg/l]	9
Benzol [µg/l]	0,9
Blei [µg/l]	9
Bor [mg/l]	0,9
Cadmium [µg/l]	4,5
Chrom (gesamt) [µg/l]	45
1,2-Dichlorethan [µg/l]	2,7
Kupfer [µg/l]	1800
Nickel [µg/l]	18
Nitrat [mg/l]	45
Nitrit [mg/l]	0,09
Quecksilber [µg/l]	0,9
Pestizide (gesamt) [µg/l]	0,5
Ammonium [mg/l]	0,45
Chlorid [mg/l]	180
Leitfähigkeit [µS/cm]	2250

Tabelle 3 listet sämtliche Stoffe auf, deren Schwellenwerte im Grundwasser nicht überschritten werden dürfen. Zusätzlich gibt es eine Reihe verbotener Stoffe, die aufgrund ihrer Toxizität und Langlebigkeit unter keinen Umständen in das Grundwasser gelangen und nicht bioakkumulieren dürfen. Hierzu zählen u. a. Stoffe, die karzinogene oder mutagene Eigenschaften aufweisen, organische Phosphor- und Zinnverbindungen, Mineralöle, Zyanide, Quecksilber etc. Zudem sind Stoffe festgelegt, die zwar eine schädliche Wirkung auf das Grundwasser haben können, aber nicht per se verboten sind. Es bedarf jedoch einer Bewilligung. Dies sind Metalle wie Zink, Kupfer, Nickel, Brom, Blei usw.; Biozide und Pflanzenschutzmittel; Stoffe, die Einfluss auf Geschmack und Geruch des Grundwassers haben; anorganische Phosphorverbindungen, Dünger (Stickstoff- und Phosphorverbindungen) sowie Stoffe, die die Sauerstoffbilanz (BSB<sub>5</sub>, CSB) beeinflussen (BGBl II 98:2010).

Empfehlungen für Bewässerungswasser erteilen u. a. der Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV). Maßgeblich ist die Untersuchung des Bewässerungswassers im Vorfeld: In diesem Falle werden die physikalischen Parameter Schwebstoffe und elektrische Leitfähigkeit sowie die chemischen Parameter pH, Na, Ca, Mg, Cl, B, Fe, Mn und Zn zur Analyse empfohlen. Neben qualitativen Anforderungen an das Bewässerungswasser werden auch Richtlinien für die quantitative Beschaffenheit beschrieben (ÖWAV 2001).

Wird Grauwasser als Bewässerungswasser verwendet, so umfasst die ÖNORM EN16941-2:2017 „*Vor-Ort-Anlagen für Nicht-Trinkwasser - Teil 2: Anlagen für die Verwendung von behandeltem Grauwasser*“, wie die Planung und Umsetzung von Grauwasserrecycling-Anlagen sowie die Formen der Nutzung (WC-Spülung, Gartenbewässerung, Reinigung von Wäsche und Gegenständen) im Rahmen der österreichischen Rechtslage realisiert werden können. Die Grenzwerte der ÖNORM EN16941-2:2017 für die Qualitätsanforderungen an Grauwasser werden für die Beurteilung des im Versuch untersuchten Grauwassers herangezogen (siehe Kapitel 5.1)

Im Folgenden wird auf die qualitativen Anforderungen an das Bewässerungswasser eingegangen, die auf den Empfehlungen des ÖWAV (2001) und der ÖNORM EN 16941-2 (2017) beruhen.

### ***2.3.2.1 Physikalische Beschaffenheit des Bewässerungswassers***

Schwebstoffe und Temperatur sind zentrale Parameter für die physikalische Beschaffenheit von Bewässerungswasser (ÖWAV 2001).

Schwebstoffe sind organische als auch anorganische Festkörper, die die Trübung des Wassers beeinflussen. Eine hohe Klarheit des Wassers ist zu empfehlen. Sollte das Bewässerungswasser Schwebstoffe enthalten, muss geprüft werden, ob es sich hierbei um Schadstoffe handelt. Festkörper können besonders bei Tröpfchenbewässerung zum Ausfall der Bewässerungsanlage führen und durch eingebaute Filtersysteme vermieden werden (ÖWAV 2001). Die Eignung nach dem Schwebstoffgehalt laut ÖWAV ist in Tabelle 4 ersichtlich. In der ÖNORM EN 16941-2 werden hingegen mit Schwebstoffen <30 mg/l wesentlich geringere Werte für die Eignung toleriert (ÖNORM EN 16941-2 2017).

*Tabelle 4. Einteilung des Schwebstoffgehalts und gelöster Stoffe für die Eignung für Tröpfchenbewässerung (ÖWAV 2001; eigene Bearbeitung)*

PARAMETER	GUT GEEIGNET	MÄSSIG GEEIGNET	NICHT GEEIGNET
Schwebstoffe [mg/l]	<50	50-100	>100
Gelöste Stoffe [mg/l]	<500	500-2000	>2000

Gießwasser sollte eine Temperatur zwischen 20 und 25 °C haben, Werte über 35 °C sollten nicht über- und Werte unter 10 °C nicht unterschritten werden (ÖWAV 2001).

### ***2.3.2.2 Chemische Beschaffenheit des Bewässerungswassers***

Chemische Inhaltsstoffe sind in Bezug auf die Eignung von Wasser zu Bewässerungszwecken zentral. Das Bewässerungswasser kann nach Güteklassen differenziert werden und dementsprechend in Wasserklassen eingeteilt werden. Je nach untersuchtem Bestandteil ergeben sich jeweils unterschiedliche Güteklassen. Als Hauptbestandteile werden Kationen wie Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium bzw. Anionen wie Hydrogencarbonat, Sulfat, Chlorid und Nitrat genannt. Nebenbestandteile sind meist nur in Spuren nachweisbar, hierzu zählen u. a. Aluminium, Arsen, Barium, Blei, Bor, Eisen, Fluor, Cobalt, Nickel, Quecksilber etc. Zudem wird das Wasser auf dessen Salzgehalt aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit untersucht und dementsprechend klassifiziert (ÖWAV 2001).

Der Salzgehalt ist ein zentraler Faktor für die Verwendung als Bewässerungswasser. Die Werte in Tabelle 6 beziehen sich auf den Einsatz im landwirtschaftlichen Bereich. Straßenbegleitgrün in urbanen Gebieten muss beispielsweise wesentlich höhere Salzeinträge (z.B. Ausbringen von Streusalzen durch Winterdienst) tolerieren als Gemüsepflanzen auf landwirtschaftlich genutzten Feldern (Kos 2017). Jedoch sind die Werte ein wichtiger Anhaltspunkt für die Empfehlung von Bewässerungswasser. Des Weiteren

spielen Bodenbeschaffenheit, klimatische Aspekte und die Art der Be- und Entwässerung eine wichtige Rolle im Zusammenhang von Salzgehalt und der Entwicklung der Pflanzen (ÖWAV 2001). Tabelle 5 listet die chemischen Hauptbestandteile und deren Richtwerte auf:

*Tabelle 6. Richtwerte für elektrische Leitfähigkeit und Salzgehalt (ÖWAV 2001; eigene Bearbeitung)*

GEEIGNETE PFLANZEN	ELEKT. LEITFÄHIGKEIT [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	SALZGEHALT [ $\text{mg}/\text{l}$ ]
Geringe Wahrscheinlichkeit einer Versalzung; für die meisten Pflanzen tolerierbar	0-250	0-160
Pflanzen mit mäßiger Salztoleranz: ausreichende Bodenauswaschung muss gewährleistet sein	250-750	160-480
Pflanzen mit guter Salztoleranz: gute Bodendrainage, zusätzliche Bodenauswaschung u.U. erforderlich	750- 2250	480-1440
Pflanzen mit hoher Salztoleranz: sehr gute Bodendrainage und zusätzliche Bodenauswaschung erforderlich	2250-5000	1440-3200

*Tabelle 5. Kennwerte der chemischen Bestandteile für die Eignung von Grauwasser zu Bewässerungszwecken (ÖNORM EN 16941-2; ÖWAV 2001; Pflieger 2009; eigene Bearbeitung)*

PARAMETER	GRENZWERTE	BEMERKUNG
Magnesium [ $\text{mval}/\text{l}$ ]	50	geeignet für alle Pflanzen
Chlorid [ $\text{mg}/\text{l}$ ]	<70	geeignet für nahezu alle Pflanzen
	140	für chloridverträgl. Pflanzen geeignet; leichte Schäden bei chloridempfindl. Pflanzen
	140-280	Für chloridverträgl. Pflanzen geeignet; mittlere Schäden bei chloridempfindl. Pflanzen
	>280	mittlere Schäden bei chloridverträgl. Pflanzen
Kalium [ $\text{mg}/\text{l}$ ]	200	geeignet für alle Pflanzen
Natrium [ $\text{mg}/\text{l}$ ]	100	geeignet für alle Pflanzen
Rest- Brom [ $\text{mg}/\text{l}$ ]	<2	geeignet für alle Pflanzen
Rest-Chlor [ $\text{mg}/\text{l}$ ]	<0,5	geeignet für alle Pflanzen
Sulfat [ $\text{mg}/\text{l}$ ]	1200	geeignet für alle Pflanzen
Nitrat [ $\text{mg}/\text{l}$ ]	399	geeignet für alle Pflanzen
Bor [ $\text{mg}/\text{l}$ ]	0,3-1,0	geeignet für nahezu alle Pflanzen
gelöstes $\text{O}_2$ [ $\text{mg}/\text{l}$ ]	>1	geeignet für alle Pflanzen
pH-Wert	5,0-9,5	geeignet für alle Pflanzen
Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	2000-3000	salzempfindl. Pflanzen/ salztolerante Pflanzen

### 2.3.2.3 Mikrobiologische Beschaffenheit

Eine negative Beeinflussung der menschlichen und tierischen Gesundheit ist hinsichtlich der hygienischen Beschaffenheit des Bewässerungswassers zu prüfen. Diesbezüglich wird die mikrobiologische Zusammensetzung des Wassers untersucht. Sofern keine bzw. nur in geringen Konzentrationen vorkommende Krankheitserreger und andere gesundheitsschädliche Stoffe nachzuweisen sind, kann das Bewässerungswasser als unbedenklich eingestuft werden (ÖWAV 2001).

Enterokokken und *E. coli* Bakterien stellen Indikatorbakterien dar. Deren Vorkommen kann ein Indiz auf eine Verschmutzung in mikrobiologischer Hinsicht sein (Pfleger 2009). Zusätzlich müssen der Ammoniumgehalt, der CSB und BSB<sub>5</sub> beobachtet werden: Das Überschreiten der Grenzwerte schafft ein Milieu, das die Vermehrung pathogener Keime begünstigt. Ammonium darf diesbezüglich 1 mg/l [NH<sub>4</sub>], BSB<sub>5</sub> 10 mg/l [O<sub>2</sub>] und CSB 60 mg/l [O<sub>2</sub>] nicht überschreiten (ÖWAV 2001).

In der ÖNORM EN 16941-2 werden zur bakteriologischen Überwachung strengere Werte vorgeschrieben. Hier wird unterschieden, ob das Grauwasser versprüht wird (z.B. Rasensprenger) oder Anwendungen zum Einsatz kommen, bei denen die Verbreitung in Form von Aerosolen vermieden wird (z.B. Tröpfchenbewässerung). Da es grundsätzlich empfohlen wird, in der Gartenbewässerung auf das Versprühen von Grauwasser (behandelt und unbehandelt) zu verzichten, sind folglich nur die Werte in Tabelle 7 angegeben, die die Sprühanwendung nicht implizieren (ÖNORM EN 16941-2:2017).

*Tabelle 7. Grenzwerte für hygienische Anforderungen an Bewässerungswasser. Ein Überschreiten muss verhindert werden. (EU 2020/ 741; ÖNORM EN 16941-2:2017; ÖWAV 2001; eigene Bearbeitung)*

PARAMETER	EN 2020/741	EN 16941-2	ÖWAV
<i>E. coli</i> [KBE/ 100ml]	100	250	200 je 100 ml
<i>Legionella pneumophila</i> [KBE/ 100ml]	<1000	100	-
<i>Intest. Enterokokken</i> [KBE/ 100ml]	-	100	-
Coliforme gesamt [KBE/ 100ml]	-	1000	-
NH <sub>4</sub> [mg/l]	-	-	1
BSB <sub>5</sub> [mg/l]	10	-	10
CSB [mg/l]	-	-	60

### 2.3.3 | Risiken der Grauwasserbewässerung

Bei der Verwendung von Grauwasser zu Bewässerungszwecken müssen mögliche Kontaminationen immer mitberücksichtigt und vermieden werden:

*„Schadstoffe und Krankheitserreger, die bei der Abwasseraufbereitung nicht oder unvollständig entfernt werden, werden bei der Bewässerung und Grundwasseranreicherung flächenhaft in die Umwelt ausgebracht [...] Durch den Kontakt mit dem Wasser, dem bewässerten Boden oder den bewässerten Produkten sowie durch eine mögliche Beeinträchtigung des Trinkwassers sind potenziell das Betriebspersonal, Landwirte, Anwohner, die Öffentlichkeit, Verbraucherinnen und Verbraucher sowie Nutztiere betroffen.“* (Helmecke 2018: 39f.)

Der Schutz menschlicher, tierischer und pflanzlicher Gesundheit hat oberste Priorität, der mit entsprechenden Reinigungsmaßnahmen des Grauwassers begegnet werden muss. (Helmecke 2018; Umweltbundesamt 2016). Die *EU Reuse Directive* (EU 2020/ 741) gibt an, zu welchen Wiederverwendungszwecken welche Parameter einzuhalten sind. Grundlegende Fragen der Art der Wiederverwendung, der im Grauwasser enthaltenen Stoffe, des Reinigungsdesigns für diese Stoffe (inkl. Desinfektion) sowie eine regelmäßige Kontrolle mittels Analytik können eine sichere Wiedernutzung gewährleisten (EU 2020/ 741).

Auf pathogene Keime, Arzneimittelrückstände im Wasser (inkl. deren Anreicherung in Pflanzen als auch Böden) und andere toxische Stoffe, die persistent sind, muss in der Wiederverwendung von Grauwasser ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Diese Priorisierung zeigt, wie wichtig eine adäquate Reinigung des Grauwassers ist, um schädliche Stoffe auf ein Minimum zu reduzieren (Oron et al. 2014). In Deutschland ist es beispielsweise nicht üblich, dass Abwasser desinfiziert wird. Dies bedeutet, dass der Ablauf eine hohe Keimbelastung aufweist (Umweltbundesamt 2016). Helmecke (2018) empfiehlt, besonders auf den Bodenschutz zu achten, da dieser *„[...] eine bedeutende Funktion für den Rückhalt und Abbau von Schadstoffen und somit für den Grundwasserschutz [...]“* (Helmecke 2018: 43) hat. Insofern wird ein umfassendes Management zur Risikominimierung durch Schadstoffeinträge benötigt, um Umweltrisiken gering halten zu können. Dies umfasst die Identifikation möglicher Gefahren durch die Wiederverwertung von Abwasser, Festlegung von Maßnahmen zur Gefahrenbeseitigung und dessen regelmäßiges Monitoring (Helmecke 2018).

### 3 | Gebäudenahe Begrünung

Folgendes Kapitel dient der kurzen Einführung in das Thema der gebäudenahen Begrünung in Form von Vertikalbegrünungen und Stadtbäumen.

#### 3.1 | Vertikalbegrünung

Vertikalbegrünungen bieten in stark verdichteten städtischen Gebieten eine platzsparende Möglichkeit der Begrünung (Pradhan et al. 2019). Diese Form der grünen Infrastruktur zeichnet sich aus durch ihre „[...] *multiple benefits, including microclimate, aesthetics and amenity benefits, increase in urban biodiversity and reduction in the adjacent building energy consumption* [...]“ (Fowdar et al. 2017).

Der in Kapitel 1.1 bereits erwähnte UHIE steht in engem Zusammenhang mit dem sogenannten Albedo-Wert. Dieser charakterisiert das Vermögen von Oberflächen, solare, kurzweilige Strahlung zurück in die Atmosphäre zu reflektieren bzw. zu absorbieren (Lucht et al. 2000). Der Albedo-Wert beschreibt, wieviel Prozent an Strahlung reflektiert wird: Liegt dieser bei 0 (=0% Reflexion), so wird sämtliche Strahlung absorbiert und die betreffende Oberfläche erhitzt sich. Je stärker sich der Wert 1 (=100% Reflexion) nähert, desto mehr wird an solarer Strahlung reflektiert und es kommt zu einer verminderten Erhitzung. Die Exposition der einfallenden Strahlung, das Oberflächenmaterial sowie dessen Farbe sind maßgebend für das Reflexionsvermögen. Dies bedingt, dass sich dunkle Oberflächen erhitzen, hingegen helle Oberflächen ein höheres Reflexionsvermögen aufweisen. Im urbanen Kontext bedeutet dies, dass das Reflexionsvermögen von dunklen Asphaltflächen wesentlich geringer ist als beispielsweise jenes heller und begrünter Oberflächen (Glaser et al. 2010; Hupfer et Kuttler W. 2005; Fezer F. 1995). Der Albedo-Wert ausgewählter Oberflächen ist in Tabelle 8 ersichtlich.

*Tabelle 8. Albedo (in%) verschiedener Oberflächen (Fezer 1995; eigene Bearbeitung)*

OBERFLÄCHE	ALBEDO (%)
Frischer Schnee	85
Beton	10-35
Asphalt	10-20
Dachziegel	25-30
Wiese	20

Begrünte Fassaden weisen einen wesentlich geringeren Albedo-Wert als Beton- oder Ziegelflächen auf. Die Blattmasse bewirkt zusätzlich eine Beschattung der Fassade und kann die Temperatur im Sommer senken und im Winter dämmende Eigenschaften entfalten (Stangl et al. 2019). Pan et al. (2018) untersuchten in Hongkong den Einfluss begrünter Fassaden auf nächtliche Temperaturen. Dabei kamen sie zu dem Ergebnis, dass nordseitig exponierte Vertikalbegrünungen eine Temperatursenkung des Innenraumes um 10,1°C bewirkten sowie eine westseitig begrünte Fassade eine Minimierung der Temperatur an der Außenwand um 6,1°C erzielte (Pan et al. 2018).

### 3.1.1 | Vertikalbegrünungssysteme

Vertikalbegrünungen können grundsätzlich flächig, linear oder punktuell erfolgen und werden in zwei große Gruppen unterteilt: bodengebundene (*green facades*) und wandgebundene Vertikalbegrünungen (*green walls*) (GREEN4CITIES et al. 2019; Medl et al. 2017; Fowdar et al. 2017). Eine Vertikalbegrünung kann nicht nur entlang von Fassaden installiert werden, sondern auch die Begrünung von vertikalen Oberflächen, wie Mauern, Zäunen, Pergolen etc. miteinschließen (Medl et al. 2017).

Bodengebundene Systeme, in Medl et al. (2017) auch *green facades* genannt, zeichnen sich durch den Wurzelanschluss der Pflanzen in gewachsenem Boden aus. Je nach Klettermethode der verwendeten Pflanzen werden Kletterhilfen entlang der Fassade installiert. *Direct green facades* (Medl et al. 2017) klassifizieren bodengebundene Vertikalbegrünungen, in denen sich selbstkletternde Pflanzen mit Haftwurzeln (z.B. *Hedera helix*) bzw. Haftscheiben (z.B. Gattung *Parthenocissus*) an vertikalen Strukturen befestigen. Diese kommen gänzlich ohne Gerüst aus, befinden sich aber in direktem Kontakt mit der Fassade bzw. Mauer. Baulich-technische Voraussetzungen der Fassade (Schutz der Dämmung, intakter Zustand der Außenfassade) müssen gewährleistet sein (GREEN4CITIES et al. 2019; Medl et al. 2017). Bei *double-skin green facades* (Medl et al. 2017) benötigen gerüstkletternde Pflanzen (Abbildung 3), die in schlingend, rankend oder spreizklimmend eingeteilt werden, hingegen Kletterhilfen (GREEN4CITIES et al. 2019; Köhler et al. 2012; Zimmermann 2015; Pfoser 2016; Medl et al. 2017).



*Abbildung 3. Bodengebundene Vertikalbegrünung mit Klettergerüst. St. Anna Kinderspital, Wien (eigene Aufnahme 2019)*

Wandgebundene Vertikalbegrünungen (*green walls*) (Medl et al. 2017) sind in ihrem Aufbau wesentlich komplexer. Die Pflanzen befinden sich nicht im Kontakt mit dem Boden, sondern sind durch Vegetationsträger in Form von Trögen, Wannen, Rinnen sowie als Modulsysteme mit Vliesen oder in Taschen an der Fassade befestigt. Diese inkludieren das Substrat, die Drainage und Bewässerung (Pfoser 2016; Medl et al. 2017). Die Vielzahl an Möglichkeiten für die Konstruktion sowie die Artenauswahl ist größer als bei bodengebundenen Systemen. In der Regel wird zwischen teilflächigen (lineare oder punktuelle), vollflächigen und modularen Vegetationsträgern unterschieden. Erstere sind Konstruktionen, die mithilfe von Trögen eine vertikale Begrünung ermöglichen, die linear oder punktuell angebracht wird (Abbildung 4; Bild 1+2). Vollflächige Vegetationsträger charakterisiert ein durchlaufender Substratkörper, der durch eine kontinuierliche Konstruktion unterstützt wird. Hingegen führen in modularen Systemen einzelne Module zu einer flächigen Begrünung (Abbildung 4; Bild 3+4) (Medl et al. 2017; GREEN4CITIES et al. 2019; Pfoser 2016; Scharf et al. 2012).



*Abbildung 4. Wandgebundene Vertikalbegrünung (von links nach rechts): Bild 1: punktueller, teilflächiger Vegetationskörper, SOHO Innsbruck (eigene Aufnahme 2020), Bild 2: linearer teilflächiger Vegetationskörper, Kempelenpark Wien (eigene Aufnahme 2020), Bild 3 + 4: vollflächiger, modularer Vegetationsträger, Kempelenpark Wien (eigene Aufnahme 2020)*

### 3.1.2 | Pflanzen für Vertikalbegrünungen. Übersicht

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Pflanzen, die in boden- und wandgebundenen Vertikalbegrünungen in Österreich eingesetzt werden.

*Tabelle 9. Übersicht über Pflanzen, die in Vertikalbegrünungen in Österreich eingesetzt werden (Enzi 2010; GREEN4CITIES et al. 2019; eigene Bearbeitung)*

Bodengebunden Living Facades	ohne Kletterhilfe	<i>Campsis grandiflora</i> , <i>C. radicans</i> , <i>x tagliabuana</i>   <i>Euyonumus fortunei</i>   <i>Hedera helix</i>   <i>Hydrangea anomala ssp.petiolaris</i>   <i>Parthenocissus quinquefolia</i> , <i>P. tricuspidata</i>
	mit Kletterhilfe	rankend: <i>Clematis vitalba</i>   <i>Vitis sp.</i>
		schlingend: <i>Akebia quinata</i>   <i>Aristolochia macrophylla</i>   <i>Celastrus orbiculatus</i> , <i>C. scandens</i>   <i>Fallopia aubertii</i>   <i>Humulus lupulus</i> , <i>H. scandens</i>   <i>Ipomoea tricolor</i>   <i>Lonicera</i>   <i>Wisteria</i>  spreizklimmend: <i>Jasminum nudiflorum</i>   <i>Rosa sp.</i>   <i>Rubus fruticosus</i> , <i>R. henryi</i>   <i>Solanum dulcamara</i>
Wandgebunden Living Walls	Gräser	<i>Sesleria caerulea</i>   <i>Festuca guestfalica</i>   <i>Pennisetum alopecuroides</i>   <i>Luzula nivea</i>   <i>Carex morrowii</i>
	Sedum	<i>Sedum acre</i> , <i>S. album</i> , <i>S. floriferum</i> , <i>S. hybridum</i> , <i>S. pluricaule</i>
	Stauden	<i>Geranium sp.</i>   <i>Heuchera sp.</i>   <i>Nepeta sp.</i>   <i>Iberis sp.</i>   <i>Bergenia sp.</i>   <i>Alchemilla sp.</i>   <i>Achillea sp.</i>   <i>Dianthus plumarius</i>
	Gehölze	<i>Taxus sp.</i>   <i>Cotoneaster sp.</i>   <i>Lonicera sp.</i>   <i>Euonymus sp.</i>

### 3.1.3 | Bewässerungssysteme

Um eine optimale Entwicklung der Pflanzen und die damit verbundenen Ökosystemleistungen (Kühlung durch Evapotranspiration und Beschattung, Luftfilterung, Bereitstellung von Habitaten für Flora und Fauna) zu gewährleisten, müssen vertikale Bauwerksbegrünungen ausreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden (Köhler et al. 2012).

Grundsätzlich benötigen bodengebundene Vertikalbegrünungen keine externe Bewässerung, da durch den Kontakt mit natürlich gewachsenem Boden genügend Wasser und Nährstoffe aufgenommen werden können. Die Wasserversorgung kann über den natürlichen Niederschlag sowie die Nährstoffversorgung über natürliche, mikrobiologische bzw. chemische Bodenaktivität erfolgen. Ist diese Versorgung nicht ausreichend, muss zusätzlich bewässert und gedüngt werden (Pfoser 2016). Dies erfolgt in der Regel durch Tröpfchenbewässerung mithilfe von Schläuchen oder Bewässerungsmatten, die manuell oder digital mithilfe eines Bewässerungscomputers und Bodensensoren gesteuert werden können. Die Tröpfchenbewässerung ist zudem druckkompensiert. Das hat zur Folge, dass unabhängig der Positionierung der Pflanze entlang der Bewässerung das Wasser mit

demselben Druck und derselben Menge ausgebracht wird (Köhler et al. 2012; GREEN4CITIES et al. 2019).



*Abbildung 5. Tröpfchenbewässerung in wandgebundener Vertikalbegrünung. BeRTA Tröge Wien (eigene Aufnahme 2021)*

Bei wandgebundenen Vertikalbegrünungen ist eine Bewässerung inkl. Nährstoffversorgung unumgänglich, da dieses System aufgrund der vertikalen Ausrichtung nur in geringen Mengen Niederschlag aufnehmen kann (Abbildung 5). Die Bewässerung wird bereits in der Planung der Vegetationsträgerkonstruktion miteinbezogen und verläuft zwischen Fassade und Vegetationstragschicht oder innerhalb der Tröge. Neben einer Tröpfchenbewässerung kann auch eine Anstaubewässerung zum Einsatz kommen, die zusätzlich Regenwasser in dafür vorgesehene Anstaubehälter speichern kann. Das verwendete Substrat soll zudem wasserspeichernde Eigenschaften aufweisen, um eine optimale Wasserversorgung gewährleisten zu können (Pfoser 2016).

Der Wasserbedarf vertikaler Bauwerksbegrünungen variiert stark je nach Standortcharakteristika, wie Exposition, Sonneneinstrahlung, Wind, Beschattung sowie Pflanzauswahl (GREEN4CITIES et al. 2019). Der in Tabelle 10 angeführte Wasserbedarf unterschiedlicher Formen der Vertikalbegrünung ist als Mittelwert zu verstehen.

*Tabelle 10. Wasserbedarf vertikaler Bauwerksbegrünungen (eigene Bearbeitung)*

System	Wasserbedarf [l/m <sup>2</sup> /Tag]	Anbieter
Bodengebunden	0,5-0,8	Kuras 2017
Teilflächiger Vegetationsträger	2	techmetall
	2,8	Optigrün
Vollflächiger Vegetationsträger	10	Simlat 2017
	3	Eppel 2015
Modularer Vegetationsträger	2,7	90deGreen

## 3.2 | Stadtbäume

„Stadtbäume“ ist ein breitgefächertes Begriff. Im Folgenden bezieht sich der Terminus allerdings nur auf Stadtbäume, die sich in Gebäudenähe befinden.

Trotz des Extremstandorts Stadt erbringen Bäume maßgebliche Ökosystemleistungen, wie etwa Kühlung der Lufttemperatur durch Transpiration und Beschattung. Kong et al. 2017 konnten in ihrer Studie feststellen, dass die Kühlleistung der Stadtbäume zunimmt, wenn die Kronen groß bzw. dicht ausgebildet sind und der Stamm kurz ist. Zusätzlich kann die Senkung der Umgebungstemperatur durch die Dichte der Baumanzahl positiv beeinflusst werden. Die Ergebnisse zeigen, dass solitär stehende Bäume wesentlich weniger mithilfe von Transpiration und Beschattung kühlen als im Verband stehende Bäume (Kong et al. 2017). Große Stadtbäume sind somit eine wesentliche Klimawandelanpassungsmaßnahme, um die negativen Auswirkungen des UHIE und den für Menschen unangenehmen Hitzestress in den Sommermonaten zu minimieren (Sanusi et al. 2017). McPherson et Simpson (2003) kamen in ihrer Untersuchung zu dem Ergebnis, dass die Beschattung einer westseitig exponierten Gebäudefassade je nach Klimazone und bautechnischen Gegebenheiten (z.B. Dämmung) zu einer Energiereduktion von bis zu 50% führt. Stadtbäume, die in unmittelbarer Nähe von Gebäuden stehen, blocken direkte Sonneneinstrahlung und reduzieren somit den Energieaufwand, der für die Kühlung eines Gebäudes benötigt wird. Folglich sinkt der jährliche Energieverbrauch, der für Klimaanlage benötigt wird, durch gebäudenähe Straßenbäume um 2,5% (McPherson et Simpson 2003).

### 3.2.1 | Problematiken von Stadtbäumen

Stadtbäume sind zahlreichen schädlichen Faktoren in der Stadt ausgesetzt. Neben klimatischen Extrembedingungen (Hitze, Starkregen und Trockenheit), Schadstoffeinträgen (Abgase, Streusalze, Urin etc.) sowie mechanischen Verletzungen, müssen sich Stadtbäume verdichteten Böden (u. a. behinderter Gasaustausch) und engen Wurzelräumen anpassen. Diese Faktoren führen zu pflanzenphysiologischem Stress und machen Bäume in der Stadt anfälliger für Krankheiten und Schädlinge (Roloff 2013). Beispielsweise liegt laut Balder (1997) die Lebenserwartung von *Crataegus laevigata* in urbanen Gebieten bei 40-80 Jahren, hingegen in natürlicher Umgebung bei 150 Jahren (Balder 1997 zit. nach Zeiler 2015).

Dies bedeutet, dass einerseits ausreichend Platz für den Wurzelraum und eine stabile Wasser- und Nährstoffversorgung wichtig sind, damit Stadtbäume ihre Ökosystemleistungen erfüllen können (Abbildung 6). Andererseits ist die Auswahl klimaverträglicher Baumarten (*Zukunftsbäume*) maßgeblich, um diesem multiplen

Belastungsdruck standhalten zu können. Die standortgerechte Pflanzung und Pflege sogenannter Zukunftsbäume steht hierbei im Mittelpunkt sowie eine der Baumgröße gerechte Gestaltung von Baumscheiben im urbanen Raum (GALK 2009; Roloff 2013).



*Abbildung 6. Von links nach rechts: Bild links: Zu klein dimensionierte Baumscheibe, die keine adäquate Wasser- und Nährstoffversorgung des Baumes zulässt: Unter dem Gehsteig sind die ersten Wurzelhebungen zu sehen. Bisamberg (eigene Aufnahme 2019) Bild Mitte: Offene Gestaltung einer Baumscheibe: Regenwasser kann versickern, Gasaustausch ist möglich. Haus des Meeres, Wien (eigene Aufnahme 2021), Bild rechts: Baumneupflanzung in einem Staudenbeet mit integrierter Tropfbewässerung, Neubaugasse Wien (eigene Aufnahme 2021)*

### 3.2.2 | Bewässerung von Stadtbäumen

Die Notwendigkeit der Bewässerung von Stadtbäumen hat in den letzten Jahren an Relevanz zugenommen. Aufgrund der starken Bodenverdichtung und des damit verbundenen Abflusses an Oberflächenwasser, dem trockenen Stadtklima und dem Einsatz von Streusalzen im Winter erfahren Stadtbäume vermehrt Trockenstress. Dies führt u.a. dazu, dass Stadtbäume kurzfristig ihre Stomata schließen (Senkung der stomatären Leitfähigkeit), was zu einer verminderten Transpiration sowie Photosynthese führt. Des Weiteren kann es zu einem Einrollen bzw. Falten der Blätter kommen, um zusätzliche Sonneneinstrahlung und die Temperatur des Blattes zu reduzieren. Dieser Mechanismus hat wiederum Einfluss auf die Transpiration. Mittelfristig führt andauernder Trockenstress zu Blattabwurf, Abnahme des Stammumfangs, Embolien, vermehrter Bildung von Kurztrieben bis hin zum Absterben der Krone. Erst längerfristig können sich Bäume mit genetischen Mechanismen den neuen Standorten und Gegebenheiten anpassen (Roloff 2013).

Dementsprechend ist eine artgerechte Wasser- und Nährstoffversorgung essenziell für vitale Stadtbäume. Der Wasserbedarf ist grundsätzlich abhängig von der Art. Laut ÖNORM L1112 benötigen Bäume die ersten 15 Jahre in der Regel 400 l/m<sup>2</sup> im Monat, um sich vital entwickeln zu können. Ab einem Alter von 15 Jahren sollen Bäume dann bewässert werden,

wenn es zu längeren Trockenphasen kommt. Weitere Faktoren, die die Bewässerungsmenge beeinflussen, sind Bodenbeschaffenheit (Wasserspeicherfähigkeit), Wind sowie Sonneneinstrahlung. Der Wasserverlust, der durch die Evapotranspiration bedingt ist, muss dem Boden und weiterführend dem Baum rückgeführt werden (FLL 2015; ÖNORM L1112).

Eine ressourcenschonende Verwendung von Bewässerungswasser kann durch eine bedarfsgerechte Bewässerungsmethode gewährleistet werden. Neben der Nutzung von Frischwasser kann durch ein nachhaltiges Regenwassermanagement natürlicher Niederschlag vor Ort z.B. mithilfe von geeigneten Substraten sowie Auffang- und Versickerungsflächen zurückgehalten werden (Wagner et al. 2013). Zusätzlich wird bei länger anhaltender Trockenheit manuell bewässert (Abbildung 7).



*Abbildung 7. Bewässerung von Baumneupflanzungen: Bewässerungssack, der Wasser langsam an den Boden abgibt, Bild links: Feistmantelstraße Wien (eigene Aufnahme 2021), rechtes Bild: Schottenfeldgasse Wien (eigene Aufnahme 2021)*

## 4 | Methode. Pflanzenversuch

Ziel des Versuchs war die Untersuchung der Eignung von behandeltem (bGW) und unbehandeltem Grauwasser (sGW) zu Bewässerungszwecken gebäudenaher Begrünung. Folgendes Kapitel dient der Übersicht der dem Versuch zugrundeliegenden Methoden (Kapitel 4.6) sowie des örtlichen und zeitlichen Ablaufs (Kapitel 4.1- 4.5).

### 4.1 | Aufbau des Pflanzenversuchs

Der Versuch fand an der Universität für Bodenkultur Wien (Peter Jordanstraße 63, 1190 Wien) in einem geschlossenen Gewächshaus unter Laborbedingungen statt. Die untersuchten Pflanzenarten (Kapitel 4.2) wurden in drei Bewässerungsgruppen aufgeteilt:

- | Frischwasser (FW)
- | Behandeltes Grauwasser (bGW) aus der Referenzanlage in Wiener Neustadt
- | synthetisches Grauwasser (sGW), hergestellt im Labor des Instituts für Siedlungswasserbau, BOKU.

Bei fünf ausgewählten Pflanzenarten (Kapitel 4.2) zu je sieben Individuen in drei Bewässerungsgruppen ergab dies eine Gesamtanzahl an 105 Individuen, deren Anordnung im Gewächshaus in Abbildung 8 ersichtlich ist.

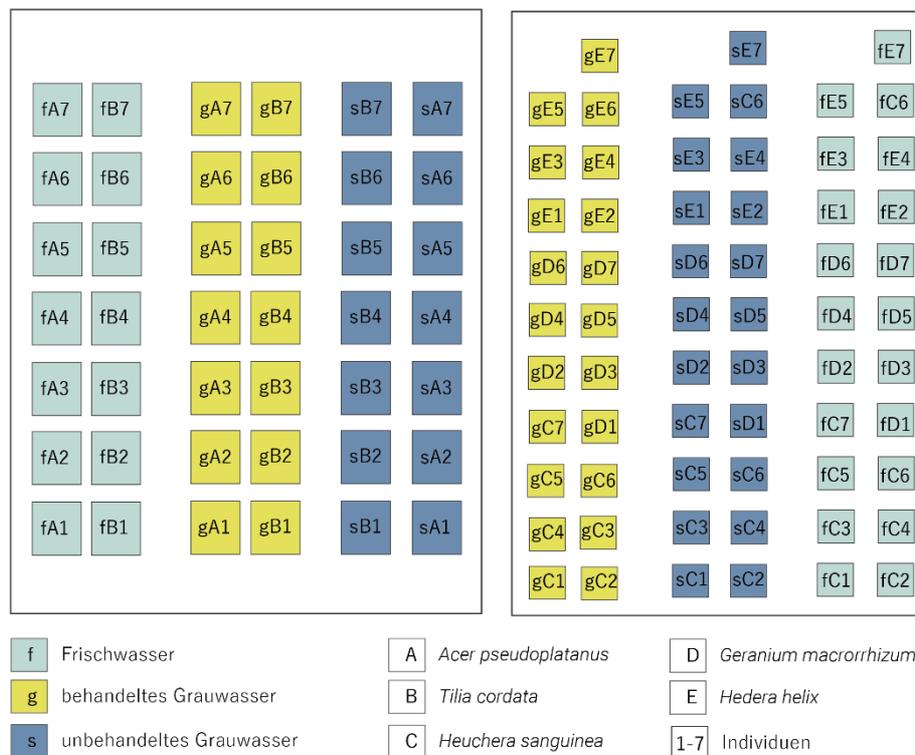


Abbildung 8. Versuchsplan: Anordnung der Pflanzen im Gewächshaus (eigene Abbildung)

## 4.2 | Auswahl der Pflanzenarten

Der Versuch umfasste fünf Pflanzenarten, die verschiedenen grünen Infrastrukturen im gebäudenahen Bereich zugeordnet werden können. Dies erfolgte aus dem Grund, eine größere Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten testen zu können. Mit *Acer pseudoplatanus* und *Tilia cordata* wurden zwei häufig vorkommende Straßenbäume der Stadt Wien getestet. *Heuchera sanguinea* und *Geranium macrorrhizum* werden vielfach in wandgebundenen sowie *Hedera helix* in bodengebundenen Vertikalbegrünungen eingesetzt (Tabelle 11).

Tabelle 11. Übersicht und Charakteristika der untersuchten Pflanzenarten (PRUNS 2015; Sommer 2007; eigene Bearbeitung; eigene Aufnahmen 2021)

ARTNAME	ANWENDUNG	ARTMERKMALE
<p><i>Acer pseudoplatanus</i></p> 	<p>Stadtbaum (Park-, Gartenflächen) Wind-, Lärmschutz Hang- und Böschungsschutz Habitat für Fauna Bienenweide</p>	<p>Heimisches Großgehölz mit tief angesetzter, eiförmiger Krone sommergrün Höhe 25-30 m / Breite 15-25 m Boden: keine besonderen Bodenansprüche: frisch bis feucht, tiefgründige, kalkhaltige Böden, verträgt keine Staunässe Standort: sonnig bis halbschattig Charakteristika: sehr frosthart, windresistent, wenig salzverträglich, hitze- und luftschadstoffempfindlich</p>
<p><i>Tilia cordata</i></p> 	<p>Stadtbaum (Park-, Garten-, Straßenflächen) Windschutz Hang- und Böschungsschutz Habitat für Fauna Bienenweide</p>	<p>Heimisches Großgehölz mit breiter, kegelförmiger Krone sommergrün Höhe 18-30 m / Breite 10-15 m Boden: anspruchslos, mäßig trocken bis frische, nährstoffreiche Böden, schwach sauer bis alkalisch, Standort: sonnig bis halbschattig Charakteristika: sehr anpassungsfähig (Boden), frosthart, hitzetolerant, stadtklimaverträglich, hohes Ausschlagsvermögen, verträgt temporär starke Trockenheit</p>
<p><i>Geranium macrorrhizum</i> 'Ingwersen'</p> 	<p>Wandgebundene Vertikalbegrünung Staudenpflanzungen (Bodendecker) Bienenweide</p>	<p>heimische Staude (Bodendecker) wintergrün Höhe 20-30 m / Hemikryptophyt Boden: anspruchslos, keine Staunässe Standort: trocken bis sonnig Charakteristika: konkurrenzstark auf schwierigen Standorten, verdrängender Wuchs, starkwüchsig</p>

*Hedera helix*



*Heuchera sanguinea*  
,Leuchtkäfer'



Bodengebundene Vertikalbegrünung Bodendecker Kletterpflanze Hang- und Böschungsschutz Habitat für Fauna Bienenweide	Kriechender oder kletternder (Haftwurzeln) Strauch immergrün Höhe bis 20 m Boden: keine besonderen Ansprüche, mäßig trocken bis feucht, bevorzugt nährstoffreiche, frische, humose, kalkhaltige Böden Standort: absonnig bis sehr schattig Charakteristika: frostempfindlich, hitzetolerant, stadtklimafest, sehr langlebig, verträgt Wurzeldruck, hohes Ausschlagsvermögen
Wandgebundene Vertikalbegrünung Staudenpflanzungen (Schmuckstaude) Bienenweide	Nicht-heimische Staude wintergrün Höhe 10-30 cm (Laub), 30-90 cm (Blüten) / Hemikryptophyt Boden: frische, humose Böden Standort: halbschattig bis sonnig, je nach Sorte unterschiedliche Sonnenverträglichkeit Charakteristika: Blattschmuckstaude, kahlfrostopfindlich, empfindlich gegenüber längeren Trockenperioden

## 4.3 | Töpfe und Substrat

*A. pseudoplatanus* und *T. cordata* wurden in 11-Liter-Töpfe (25x25x25,5 cm), *G. macrorrhizum*, *H. helix* und *H. sanguinea* wurden in 1,5-Liter-Töpfe (13x13x13 cm) gepflanzt. Als Substrat wurde eine Dachgartenerde für intensive Pflanzungen der Firma Sonnenerde, bestehend aus Ziegelsplitt (frostbeständig, Körnung 2/12 mm), Kompost und Erde verwendet. In Tabelle 12 ist die chemische Zusammensetzung des Substrats angeführt.

*Tabelle 12. Chemische Zusammensetzung des Dachgartensubstrats der Firma Sonnenerde (eigene Bearbeitung)*

PARAMETER	WERT
Organische Substanz [Massen-%]	15
Frostbeständigkeit [%]	91
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	1,4*10 <sup>-5</sup>
Wasserkapazität [ml/l]	559
N [mg/l]	372
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [mg/l]	2800
pH Wert	7,3
Salzgehalt [g/l]	5,7

## 4.4 | Bewässerung

Das bGW sowie das sGW befanden sich in jeweils 500-L-Tanks, welche jeweils an eine Wasserpumpe FQ-GP 3.200 (for\_q, Bornheim, Deutschland) samt Zeitschaltuhren OBI Eigenmarke (OBI, Wermelskirchen, Deutschland) angeschlossen waren.

Die FW-Gruppe wurde über den Wasserhahn des Glashauses gespeist, welcher über einen Bewässerungscomputer Solem BL-NR (Rainpro, Deutsch Evern, Deutschland) gesteuert war.

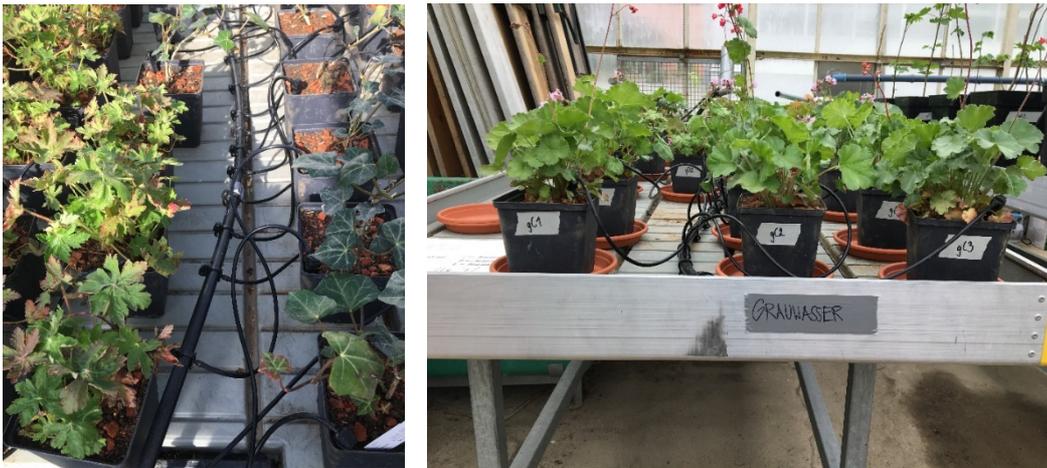


Abbildung 9. Bild links: Platzierung der Bewässerungsrohre und Mikroschläuche inkl. der Tropfspieße Bild rechts: Anordnung der Grauwassergruppe auf dem Pflanztisch (eigene Aufnahmen 2020)

Die Wasserversorgung der Pflanzen erfolgte über 16-mm-Rohre mit 3,5-mm-Mikroschläuchen (Abbildung 9), an denen pro Topf ein druckkompensierter Tropfspieß (DeltaTM Drop Spike PC, Trani, Italien) platziert war.

- | Tropfspieß mit 4 l/h Durchlaufmenge für *G. macrorrhizum*, *H. helix* und *H. sanguinea*
- | Tropfspieß mit 8 l/h Durchlaufmenge für *A. pseudoplatanus* und *T. cordata* (Abbildung 10)

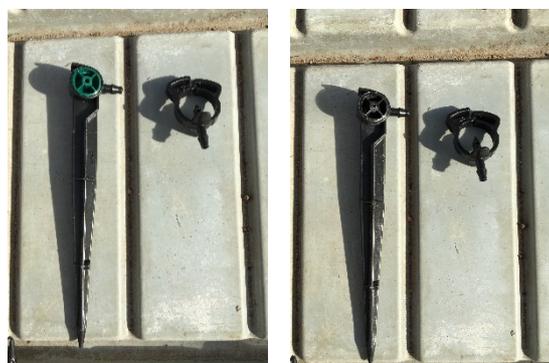


Abbildung 10. Bild links: Tropfspieß mit 8 l/h Durchlauf; Bild rechts: Tropfspieß mit 4 l/h Durchlauf (eigene Aufnahme 2020)

Bewässert wurde jede Woche am Montag, Mittwoch, Freitag und Sonntag für zwei Minuten um jeweils 08:00 in der Früh. Dies ergab folgenden wöchentlichen Wasserverbrauch:

- | 4 l/h = 0,53 l pro Woche/Topf (*G. macrorrhizum*, *H. helix*, *H. sanguinea*)
- | 8 l/h = 1,06 l pro Woche/Topf (*A. pseudoplatanus*, *T. cordata*)

#### 4.4.1 | Behandeltes Grauwasser (bGW)

Die im folgenden Kapitel beschriebene Grauwasseranlage der Firma STREBEL GmbH befindet sich in einer Wohnanlage in der Anni Stern-Braunberggasse 2 in Wiener Neustadt. Aus dieser Anlage stammte das im Versuch verwendete behandelte Grauwasser (bGW).

Das der Anlage zugrundeliegende Nutzungsprinzip sieht eine thermische und stoffliche Verwertung des Grauwassers vor. Das aus den Wohneinheiten im Keller zentral gesammelte Grauwasser weist bei Eintritt in die Verwertungsanlage (=Zulauf) eine Temperatur von 25°C bis 40°C auf, eine Durchschnittstemperatur von 30°C kann angenommen werden.

Der Verwertungsprozess des Grauwassers lässt sich grob in drei Verfahrensschritte gliedern: 1. Aufbereitung durch biologische und mechanische Reinigung, 2. Wärmeübertragung und 3. Speicherung von Wärme, Kälte und Nutzwasser. Der Reinheitsgrad des behandelten Grauwassers ermöglicht einerseits, dass der Wärmetauscher keinen Schaden nimmt, andererseits steigert dies eine effiziente Wärmeübertragung. Die Reinigung beginnt mit einem grobmaschigen (etwa 1mm<sup>2</sup>) Vorfilter, durch den das Grauwasser bei Eintritt in die Anlage in Tank 1 durchfließt. In Tank 1 findet

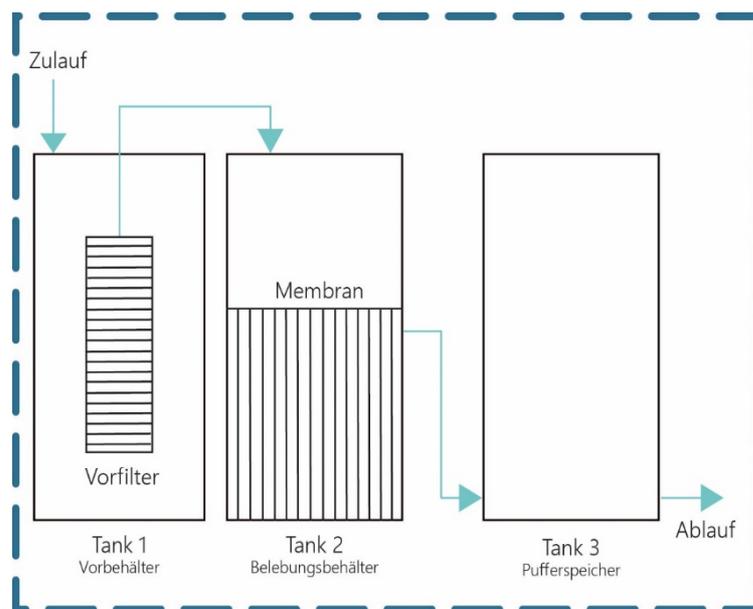


Abbildung 11. Schema der stofflichen Grauwasseranlage in Wiener Neustadt mit Zu- und Ablauf (STREBEL GmbH 2017; eigene Bearbeitung)

bereits eine Vorbelebung statt. Die biologische Reinigung findet jedoch hauptsächlich in Tank 2 statt. Dieser sogenannte Belebungsbehälter wird mit Sauerstoff versorgt, um das Überleben der Mikroorganismen zu gewährleisten. Anschließend wird das aufbereitete Grauwasser durch einen Mikroporenfilter in den Grauwasser-Filtrat-Speicher (Tank 3) gepumpt (Abbildung 11). Hierbei werden Festkörper herausgefiltert, die kleiner als  $0,1\mu\text{m}$  sind. Der entstehende Klärschlamm setzt sich am Boden des Tanks ab, die Entfernung erfolgt im Zuge einer jährlich einmaligen Wartungsarbeit (STREBEL GmbH 2017).

Durch die Kombination von einem Wärmetauscher und einer Wärmepumpe kann nahezu der gesamte Wärmeinhalt des behandelten Grauwassers auf neues Frischwasser übertragen werden und so der Warmwasser-Energiebedarf vollständig gedeckt werden. Außerdem steht das gereinigte, auf bis zu  $3^{\circ}\text{C}$  gekühlte Grauwasser für eine weitere Nutzung zu Kühlzwecken und als Gießwasser bzw. auch als Nutzwasser etwa als WC-Spülwasser zur Verfügung (STREBEL GmbH 2017).

#### 4.4.2 | Unbehandeltes Grauwasser (sGW)

Das unbehandelte Grauwasser (sGW) wurde im Labor des Instituts für Siedlungswasserbau, Industrierewasserwirtschaft und Gewässerschutz, an der Universität für Bodenkultur Wien synthetisch hergestellt. Die Zusammensetzung des sGW orientierte sich an Werten, die aus der Literatur bekannt sind und stellte ein durchschnittliches Grauwasser dar, das in einem Haushalt anfällt. Es wurde jedoch auf Speisereste und -öle verzichtet (Pucher et al. 2020; Ribeiro 2021).

Das dem sGW zugrundeliegende Rezept ist in der Masterarbeit „*Grauwasserreinigung in fassadengebundenen Begrünungssystemen*“ (Ribeiro 2021) detailliert aufgeführt.

### 4.5 | Zeitlicher Ablauf der Datenerhebung

Der Pflanzenversuch gliederte sich in drei Phasen und lief im Jahr 2020 über eine Vegetationsperiode hinweg (Abbildung 12). Am 15.4.2020 startete die Vorbereitungsphase mit dem Aufbau des Versuches im Gewächshaus. Die Anlieferung der Töpfe, Substrate, Pflanzen und das anschließende Umtopfen der Pflanzen in die jeweiligen Töpfe mit dem entsprechenden Substrat geschah noch am selben Tag. Die Installation der Bewässerung wurde am Folgetag vorgenommen. Am 16.04.2020 startete die sogenannte Akklimatisierungsphase, die Teil der Vorbereitungsphase war. Das bedeutete, dass zunächst alle Individuen bis zum 20.05.2020 mit FW bewässert wurden, um sich an die

Bedingungen im Gewächshaus zu gewöhnen und dieselben Startbedingungen für den eigentlichen Versuch zu haben. Diese Phase wurde mit dem 20.05.2020 beendet, indem die Einteilung in die drei Bewässerungsgruppen (FW, bGW und sGW) erfolgte. Hiermit startete die zweite Phase, die Versuchsphase, die bis zum 16.09.2020 andauerte. In der Versuchsphase wurden alle relevanten Erhebungen getätigt, was in Abbildung 12 ersichtlich ist. In der Nachbereitungsphase wurden die Rohdaten der Erhebungen verarbeitet und die Bodenanalysen durchgeführt. Das offizielle Versuchsende fand am 10.11.2020 statt.

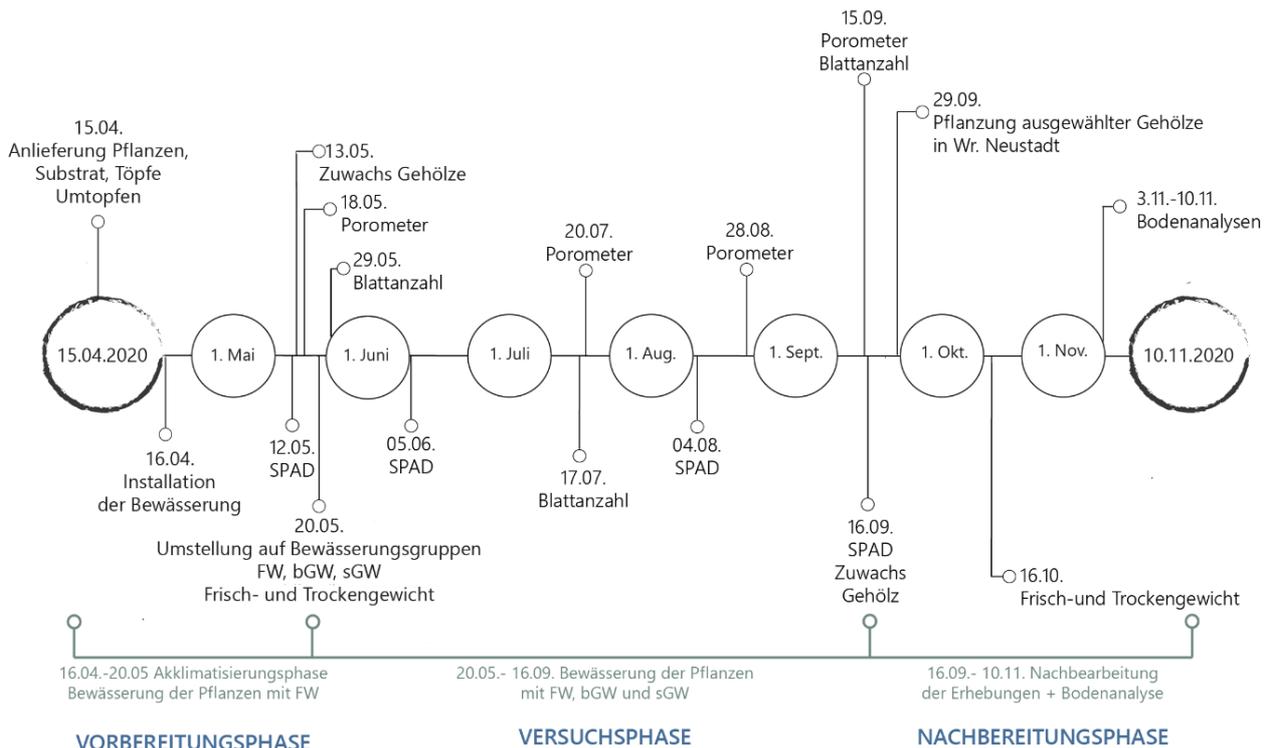


Abbildung 12. Zeitlicher Ablauf der drei Phasen des Versuches mit Chronologie der Erhebungen (eigene Abbildung)

## 4.6 | Datenerhebung

### 4.6.1 | Stofflich-chemische und mikrobiologische Analyse der Grauwasserproben

Es erfolgten insgesamt fünf Probenentnahmen des Zu- und Ablaufs der Referenzanlage in Wiener Neustadt und vier Probenentnahmen des sGW im Tank des Gewächshauses. Abbildung 13 liefert eine genaue chronologische Übersicht über alle Beprobungen des bGW und des sGW. Untersucht wurden die Grauwasserproben auf chemische und mikrobiologische Bestandteile durch das Labor des Instituts für Siedlungswasserbau, BOKU Wien.

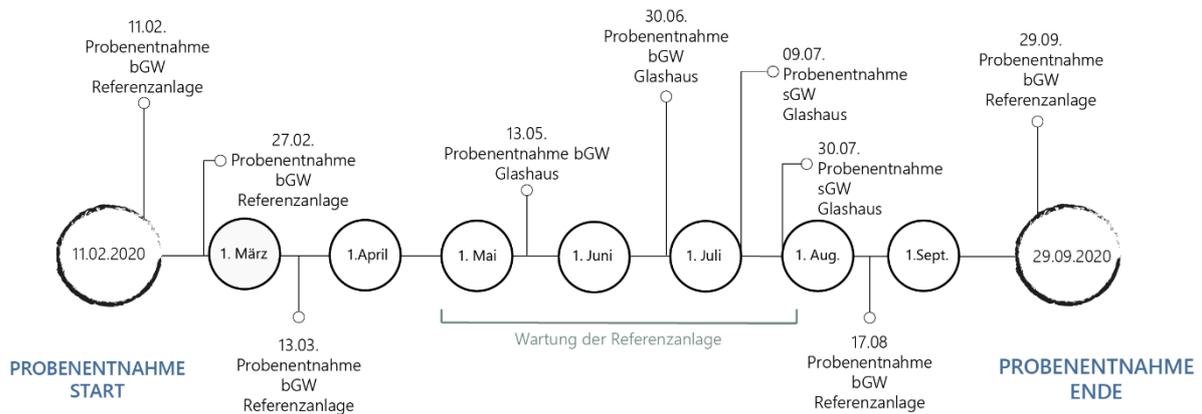


Abbildung 13. Probenentnahme der Grauwasseranalyse (eigene Abbildung)

Es wurden drei Beprobungen der Referenzanlage in einem Zeitraum von einem Monat (11.02 | 27.02. | 13.03.2020) durchgeführt. Anschließend wurde die Anlage gewartet und danach im August (17.08.2020) und September (29.05.2020) weitere zweimal beprobt. Die Erhebung der Analysedaten des Zu- und Ablaufs der Referenzanlage diente einerseits dazu, die Inhaltsstoffe des bGWs zu ermitteln, andererseits die Reinigungsleistung der Anlage zu untersuchen, da Zulauf (entspricht unbehandeltem Grauwasser) und Ablauf (entspricht behandeltem Grauwasser) miteinander verglichen werden konnten. Zusätzlich wurde das bGW (13.05. | 30.06.2020) und das sGW (09.07. | 30.07.2020) kurz nach dem Befüllen der Tanks im Glashaus an vier Terminen beprobt.

Folgende Parameter wurden analysiert: BSB<sub>5</sub>, CSB, Wasserhärte, elektrische Leitfähigkeit, Tenside, pH- Wert, organischer Kohlenstoff, Makroelemente (N, P, K, Mg, S, Ca) und die mikrobiologische Zusammensetzung. In Tabelle 13 wird aufgelistet, welche Analyseparameter bei welcher Probenentnahme untersucht worden sind.

Tabelle 13. Untersuchungsparameter der Grauwasseranalysen im Labor des Instituts für Siedlungswasserbau, Industriebewirtschaftung und Gewässerschutz BOKU Wien und chronologische Verortung der Beprobungen (eigene Bearbeitung)

ANALYSEPARAMETER	11.02.	27.02.	13.03.	17.08.	29.09.	13.05.	30.06.	09.07.	30.07.
	ZU- UND ABLAUF WIENER NEUSTADT					GEWÄCHSHAUS bGW		GEWÄCHSHAUS sGW	
AFS [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
O <sub>2</sub> gelöst [mg/l]	X	X	X	X	X				
BSB <sub>5</sub> [mg/l O <sub>2</sub> ]	X	X	X	X	X	X	X		
CSB [mg/l O <sub>2</sub> ]	X	X	X	X	X	X	X		
Leitfähigkeit [µS/cm]	X	X	X	X	X	X	X	X	X
pH-Wert	X	X	X	X	X	X	X	X	X
GH [° dH]	X	X	X	X	X	X	X		
TOC [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CSB:TOC (berechnet)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Trübung [NTU]	X	X	X	X	X	X	X		
TNb [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
Tenside anionisch [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
Tenside kationisch [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
Tenside nichtionisch [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
NH <sub>4</sub> -N [mg/l]	X	X	X	X	X			X	X
Sulfat [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
P gesamt [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
Calcium [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
Kalium [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
Magnesium [mg/l]	X	X	X	X	X	X	X		
Nitrat gelöst [mg/l]	X	X	X	X	X				
NO <sub>3</sub> -N gelöst [mg/l]						X	X	X	X
xNO <sub>3</sub> -N+NH <sub>4</sub> -N [mg/l]						X	X	X	X
<i>Escherichia coli</i> [KBE/100 ml]				X	X				
Enterokokken [KBE/100 ml]				X	X				
<i>Legionella pneumophila</i> [KBE/100 ml]				X	X				

Die chemische Beprobung erfolgte in zwei 1-Liter-Kunststoffgefäßen: Eine der beiden Flaschen wurde mit 1 ml  $H_2SO_4$  versehen, um den pH- Wert auf  $< 2$  abzusenken. Der zweite Behälter war leer und die Probe wurde direkt hineingefüllt. Beide Gefäße wurden anschließend bei  $3-5^\circ C$  konserviert. Die Beprobung am Zulauf (Abbildung 14; linkes Bild) wurde in der Mitte des Tanks mit Hilfe eines Kunststoffschöpfers durchgeführt. Die Probenentnahme am Ablauf konnte direkt von einem Wasserhahn entnommen werden (Abbildung 14; rechtes Bild)



*Abbildung 14. Bild links: Probenentnahme für chemische Analysen am Zulauf; Bild Mitte: Probenentnahme für chemische Analysen am Ablauf; Bild rechts: Probenentnahme für mikrobiologische Analyse am Ablauf (eigene Aufnahmen 2020)*

Die mikrobiologische Probenentnahme musste mit sterilen Instrumenten durchgeführt werden. Die 1-Liter-Gefäße wurden im Vorhinein mit Heißluft bei  $170^\circ C$  für 3 Stunden sterilisiert. Die mikrobiologische Beprobung erfolgte nach demselben Prozedere wie die chemische. Allerdings wurde ein Metallbehälter zum Schöpfen verwendet, der mit einem Bunsenbrenner vor der Wasserentnahme gebläut wurde, um eine Kontaminierung mit unerwünschten Stoffen zu verhindern (Abbildung 15). Zudem wurde der Wasserhahn des Ablaufs gebläut, um eine möglichst sterile Entnahme zu gewährleisten.



*Abbildung 15. Sterilisation der Instrumente und des Ablaufs für mikrobiologische Analysen (eigene Aufnahmen 2020)*

Mit dem Multiparameter Taschenmessgerät MultiLine® Multi 3630 IDS (Xylem Analytics/Weilheim, Deutschland) wurde sowohl im Zu- als auch Ablauf die Temperatur, der gelöste Sauerstoff und pH-Wert gemessen (Abbildung 16; linkes Bild). Im Zulauf erfolgte dies direkt im Tank, indem der Sensorkopf in der Mitte des Tanks platziert wurde. Die Messung des Ablaufs erfolgte in einem Becher, in den das Grauwasser aus dem Hahn hineinfließen konnte. Der Sensorkopf befand sich in einem Gefäß innerhalb des Bechers, damit ein permanentes Überlaufen gewährleistet werden konnte (Abbildung 16).

Bei den Probenentnahmen am 17.08.2020 und 29.09.2020 wurden zusätzliche 1-Liter-Glasbehälter für eine Legionellen-Untersuchung befüllt (Tabelle 13 + Abbildung 13). Diese Analyse wurde von der Firma Vela Labs GmbH (Wien) durchgeführt.

Zusätzlich wurden nach jeder Wiederauffüllung die Grauwassertanks (Grauwasser und synthetisches Grauwasser) im Gewächshaus beprobt (Tabelle 13 + Abbildung 13).



*Abbildung 16. Bild links: Taschenmessgerät MultiLine® Multi 3630 IDS; Bild rechts: Messung des gelösten Sauerstoffs am Ablauf (eigene Aufnahmen 2020)*

## 4.6.2 | Relativer Chlorophyllgehalt

Der Chlorophyllgehalt ist ein Indikator für das Chlorophyll in den Blättern, welches die für die Photosynthese benötigten Spektralbereiche des Lichts absorbieren kann (Kadereit et al. 2014). Dies bedeutet, dass ein hoher Chlorophyllgehalt eine effiziente Absorption zur Folge hat und somit die Photosynthese erleichtert.

Mittels des Chlorophyll Meter SPAD 502 (Konica Minolta Sensing /Osaka, Japan) erfolgte die Messung des relativen Chlorophyllgehalts des Blatts (Angaben als SPAD-Werte). Die Messungen fanden ungeachtet der Witterung statt und wurden viermal durchgeführt (12.05.2020 | 05.06.2020 | 04.08.2020 | 16.09.2020).

Es wurden pro Individuum fünf vitale, voll entwickelte Blätter (grün, keine Schädigungen sichtbar) selektiert, gemessen und darauf basierend ein Mittelwert berechnet. Abbildung 17 enthält Beispielbilder für voll entwickelte, vitale Blätter. Sämtliche Methoden, die auf der Selektion vitaler Blätter beruhen, können mit diesen Beispielbildern verglichen werden.

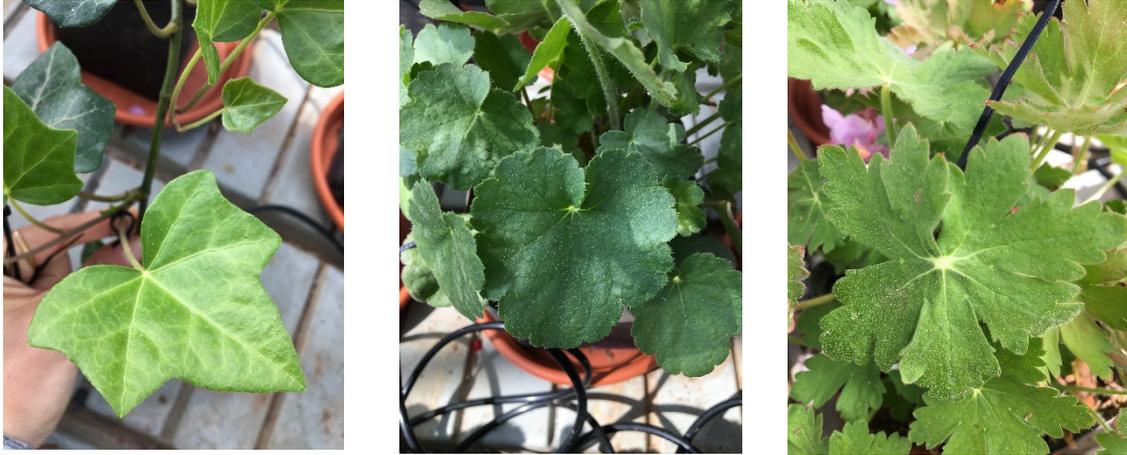


Abbildung 17. Vitale Blätter: Bild links: *Hedera helix*; Bild Mitte: *Heuchera sanguinea*; Bild rechts: *Geranium macrorrhizum* (eigene Aufnahmen 2021)

#### 4.6.3 | Stomatäre Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit gibt Auskunft über den Öffnungsgrad der Stomata (Kadereit et al. 2014).<sup>4</sup> Über diese Spaltöffnungen passiert der für die Pflanzen lebensnotwendige Gasaustausch, der u. a. für die Photosynthese zentral ist. Des Weiteren wird über die Stomata Wasser transpiriert, das heißt je weiter die Stomata geöffnet sind, desto höher kann die Transpirationsrate der Pflanze sein (Kadereit et al. 2014).

Die stomatäre Leitfähigkeit wurde mit Hilfe eines SC-1 Leaf Porometer (Metergroup, München, Deutschland) ermittelt. Die Messungen wurden jeweils an wolkenlosen Tagen durchgeführt. Pro Individuum wurde ein vitales, voll entwickeltes Blatt ausgewählt und einmal gemessen.

---

<sup>4</sup> Stomata: Spaltöffnungen auf der Blattoberfläche, über die der Gasaustausch der Pflanze stattfindet (Kadereit et al. 2014)

## 4.6.4 | Zuwachs

### 4.6.4.1 *Zuwachs Terminaltrieb*

Zu Versuchsbeginn wurden alle Terminaltriebe auf die gleiche Höhe eingekürzt und anschließend markiert bzw. wenn kein eindeutiger Terminaltrieb vorhanden war, wurde der erste – von der Gehölzspitze abwärts – gezählte Trieb ausgewählt, der voll entwickelte Blätter vorwies. Dieser markierte Trieb wurde vom Triebansatz bis zur Triebspitze vermessen (Abbildung 18). Die Messung erfolgte an zwei Terminen (13.05.2020 | 16.09.2020).



Abbildung 18. Messung des Terminaltriebs (eigene Aufnahme 2020)

### 4.6.4.2 *Zuwachs Blattanzahl*

Zu Beginn des Versuches (29.05.2020) wurden an allen Individuen die Blätter quantifiziert, um die Blattgesamtanzahl zu ermitteln. Zudem wurden diese in folgende Kategorien unterteilt: Blattgesamtanzahl pro Individuum, vitale Blätter pro Individuum, Blätter mit Fraßspuren, Blätter mit Nekrose, Sonstige (nicht zuordenbare Veränderungen der Blätter). Dies diente dazu, um eventuelle Auffälligkeiten in der Datenauswertung erklären zu können. Diese Form der Zählung wurde zu Versuchsende wiederholt (15.09.2020)

## 4.6.5 | Frischgewicht

Nach der Akklimatisierungsphase am 12.05.2020 wurden pro Bewässerungsgruppe sieben (für den Versuch überschüssige) Pflanzen der Arten *G. macrorrhizum*, *H. helix* und *H. sanguinea* randomisiert selektiert, und das Frischgewicht destruktiv ermittelt. Dies war nötig, um ein durchschnittliches Ausgangsgewicht der untersuchten Pflanzen zu erlangen. Dafür wurden die Pflanzen am Sprossansatz von den Wurzeln getrennt, um diese weitestgehend vom Substrat zu befreien (Abbildung 19). Anschließend wurden Spross und

Wurzeln separat mit einer Analyse- und Präzisionswaage Entris (Sartorius/ Göttingen, Deutschland) gewogen.



Abbildung 19. Ermittlung des Frischgewichts des Sprosses am Versuchsanfang (eigene Aufnahme 2020)

Am Ende des Versuchs (16.10.2020) wurde das Frischgewicht des Sprosses und der Wurzel der verbleibenden Pflanzen ausgewertet. Mit der Differenz zwischen Versuchsstart und -ende konnte der Zuwachs innerhalb einer Vegetationsperiode ermittelt werden.

#### 4.6.6 | Bodenanalysen: pH-Wert, Nitrat und Phosphat

Nach Beendigung des Versuchs im Gewächshaus am 16.09.2020 erfolgte für die Bodenanalysen eine zufällige Auswahl nach folgendem Schema:

- | *A. pseudoplatanus* und *T. cordata* pro Bewässerungsgruppe vier Individuen (24 Proben)
- | *Geranium*, *Heuchera* und *Hedera* pro Bewässerungsgruppe drei Individuen (27 Proben)
- | im Versuch verwendetes Ausgangssubstrat (7 Proben)

Im Labor des Instituts für Bodenforschung, BOKU Wien wurden die Proben auf Nitrat ( $\text{NO}_3$ ), Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) und pH-Wert analysiert. Zudem wurde das Feucht- und Trockengewicht ermittelt.

##### 4.6.6.1 Feucht- und Trockengewicht

Mit der Analyse- und Präzisionswaage Entris (Sartorius/ Göttingen, Deutschland) wurden pro Probe 10 g Bodensubstrat in kleinen Metallschälchen abgewogen. Das Wiegen des Feuchtgewichts erfolgte in drei Schritten: 1. Wiegen der Schale, 2. Abwiegen der 10 g Bodenprobe, 3. Ermittlung des Gesamtgewichts. Anschließend wurden die Bodenproben für drei Tage bei 105 °C in einen Trockenschrank gegeben. Nach der Trocknung wurde das Trockengewicht abzüglich des Gewichts der Schale gemessen.

#### 4.6.6.2 pH-Wert

Für die Ermittlung des pH-Wertes wurden 5 g Boden mit 12,5 ml destilliertem Wasser und 0,01 ml  $\text{CaCO}_3$  in einem Plastikbehältnis vermengt und 15 Minuten mithilfe eines Shakers vermischt (IAEA 2001). Die Messung des pH-Wertes erfolgte mit dem Digital-Labor-Multimeter ProLab 4000 (Schott Instruments/ Mainz, Deutschland). Der Sensorkopf BioTrode (Hamilton Bonaduz/ Bonaduz, Schweiz) befand sich jeweils 30 Sekunden in der Bodenlösung. Die Lagerung der Bodenlösung erfolgt in einem Kühlraum mit 4 °C Raumtemperatur.

#### 4.6.6.3 Nitratgehalt

2 g Bodensubstrat wurden mit 15 ml Kaliumsulfat ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) in einem Plastikbehältnis vermengt und im Shaker für 15 Minuten gemischt. Infolgedessen wurde die Bodenlösung mithilfe feinporigen Papiers gefiltert. Die Feststellung des Nitrats erfolgte durch die „Vanadium Chloride“ Methode (IAEA 2001). Hierbei wird Nitrat in einem Vanadium (III)-chlorid ( $\text{VnCl}_3$ ) Medium zu Nitrit umgewandelt, um anschließend die Nitrit-Konzentration einem Griess-Test zu unterziehen. Dieser Test weist Nitritonen in der Bodenlösung nach. Die Absorption wird photometrisch bei 540 nm gemessen (ebd).

Für den Griess-Test (IAEA 2001) wurden in 96-Well- Mikrotiterplatten (Abbildung 20) folgende Mengen pipettiert: 100  $\mu\text{l}$  Bodenlösung + 100  $\mu\text{l}$   $\text{VnCl}_3$  + jeweils 50  $\mu\text{l}$  der Griess 1 (50 mg N-(1-Naphtyl)etyhlendiamin ( $\text{C}_{12}\text{H}_{14}\text{N}_2$ ) gelöst in 250 ml deionisiertem, destilliertem Wasser) und Griess 2 (5 g Sulfanilsäure ( $\text{C}_6\text{H}_7\text{NO}_3\text{S}$ ) gelöst in 500 ml von 3 Mol Salzsäure (HCL)) Reagenzstoffe. Die Platten wurden für 30 Minuten bei 37 °C im Trockenschrank inkubiert. Die Ermittlung der Nitrat-Werte erfolgte mit einem Mikrotiterplatten-Lesegerät EnSpire 2300 Multilabel Reader (PerkinElmer/Waltham, Massachusetts, USA) bei 540 nm (IAEA 2001).

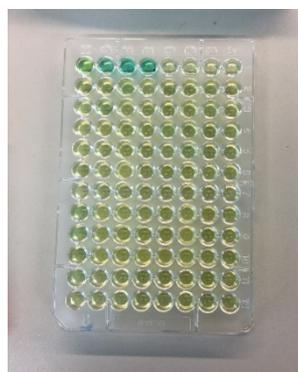


Abbildung 20. Nitratanalyse in 96-Well-Mikrotiterplatten. (eigene Aufnahme 2020)

#### 4.6.6.4 Phosphatgehalt

Für die Analyse des Phosphatgehalts im Bodensubstrat wurde die Molybdat-Vanadat Methode angewendet, die auf der APHA Standard Methode 4500- PC beruht (American Public Health Association 1992).

1 ml der Bodenlösung und 0,25 ml der Molybdat-Vanadat Reagenzlösung wurden in 96-Well-Mikrotiterplatten in jedes Nöpfchen pipettiert, außer in die der Standardlinie. Diese enthielt den Phosphatstandard. Anschließend wurde die Titerplatte bei 470 nm photometrisch mit dem Mikrotiterplatten-Lesegerät EnSpire 2300 Multilabel Reader (PerkinElmer/Waltham, Massachusetts, USA) gemessen.

#### 4.6.7 | Eignungstabelle

Die Eignungstabelle stellt einen Vergleich aller erhobenen Parameter (stomatäre Leitfähigkeit, relativer Chlorophyllgehalt, Zuwachs Blattanzahl, Zuwachs Frischgewicht, Zuwachs Terminaltrieb) pro Art dar, um die Gesamtwirkung der Bewässerungsart (bGW und sGW) auf die untersuchten Pflanzen zu beurteilen. Anhand der Summe der Wirkungen konnte eine Eignung für die Bewässerung mit Grauwasser erteilt werden. Hierfür wurden die Daten des Versuchsendes hinzugezogen: Die Mittelwerte der bGW- und sGW-Gruppe wurden mit jenen der FW-Gruppe, die als Kontrollgruppe gilt, verglichen. Alle Parameter erhielten dieselbe Gewichtung.

Pro Parameter und Pflanzenart wurden mit folgendem Beurteilungsschlüssel Punkte vergeben:

-	Wenn FW bessere Ergebnisse erzielt als bGW/sGW	-1 Punkt
0	Wenn FW gleiche Ergebnisse wie bGW/sGW erzielt	0 Punkte
+	Wenn bGW/sGW bessere Ergebnisse als FW erzielt	+1 Punkt

Die Summe der Punkte (innerhalb einer Pflanzenart) wurden nach folgendem Schema ausgewertet:

<-1	nicht geeignet (negativer Einfluss)
<0	bedingt geeignet (kaum Einfluss)
0	geeignet (kein Einfluss)
>0	geeignet (positiver Einfluss)

## 4.7 | Statistische Auswertung

Die erhobenen Daten wurden für die statistische Auswertung mit Microsoft Excel aufbereitet, und anschließend mit der Open Source-Software RStudio (Version 4.0.3.) statistisch ausgewertet. Für die Auswertung wurden zwei verschiedene Berechnungen herangezogen: einfache Varianzanalyse (ANOVA) und mehrfache Varianzanalyse mit Messwiederholungen (two-way ANOVA for repeated measurements).

Für die Bestimmung der Nullhypothese aller statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von 5% ( $p=0,05$ ) festgelegt: Die Nullhypothese besagt, dass es keine Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen in Bezug auf den jeweils untersuchten Faktor gibt. Bei Unterschreitung dieses Wahrscheinlichkeitswerts wurden die Unterschiede zwischen den Gruppen als signifikant anerkannt und die Nullhypothese abgelehnt, bei Überschreitung ist die Nullhypothese anzunehmen und es bestehen keine Unterschiede (Moder 2012).

Daten, die nur einmalig (keine Messwiederholung) aufgenommen wurden (Bodenproben, Frischgewicht), wurden mit einer einfachen Varianzanalyse (one-way ANOVA) statistisch ausgewertet.

Grundlegende Voraussetzung für die ANOVA sind normalverteilte Daten, Varianzhomogenität und unabhängige Messdaten. Ob eine Normalverteilung vorliegt, wurde mit einem Shapiro-Wilk-Test ermittelt. Ist der daraus resultierende p-Wert größer als das Signifikanzniveau, so liegt eine Normalverteilung der Daten vor, bei einer Unterschreitung des Signifikanzniveaus sind die Daten nicht normalverteilt. Die Varianzhomogenität wurde mit dem Levene-Test überprüft. Die Unabhängigkeit der Daten hängt vom Versuchsaufbau ab und wurde in diesem Fall gewährleistet (Schumacher 2007).

Die Varianzanalyse vergleicht die Mittelwerte der Bewässerungsgruppen miteinander und kann feststellen, ob Unterschiede zwischen den Gruppen bestehen, d.h. ob ein Faktor einen Einfluss auf die Messgröße hat. Die Darstellung der Daten erfolgte zunächst in Form von Boxplots, die sowohl den Median und Ausreißer als auch den kleinsten bzw. größten Wert darstellen (Schumacher 2007; Schulze und Langenberg 2014). Bei vorhandener Normalverteilung der Daten konnte als Post-Hoc Verfahren ein TukeyHSD Test angewandt werden, bei dem ermittelt wurde, zwischen welchen Bewässerungsgruppen die Unterschiede bestehen (Siegel und Tukey 1960). Graphisch wurde die Normalverteilung in Form von Histogrammen dargestellt. Waren die Daten nicht normalverteilt, konnte keine ANOVA angewandt werden, anstatt dessen kam der Kruskal Wallis Test zum Einsatz. Dies ist ein nicht-parametrischer Test, der Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen

untersuchen kann. Um Aussagen tätigen zu können, wo die Unterschiede zwischen den Gruppen bestehen, wurde als Post-Hoc Test ein Dunn-Test verwendet (Dunn 1961).

Wurden Daten mit Messwiederholung erhoben (Chlorophyllgehalt, stomatäre Leitfähigkeit, Blattanzahl, Zuwachs Terminaltrieb), erfolgte die statistische Berechnung mit der mehrfachen Varianzanalyse für wiederholte Messungen (two-way repeated measurement ANOVA), sofern die Daten normalverteilt waren (siehe Voraussetzungen für die einfache Varianzanalyse). Die multiple Varianzanalyse ermöglicht die Untersuchung mehrerer Einflussgrößen auf einen Messwert. In diesem Fall sind dies die Faktoren Zeit und Bewässerungsart. Wie bereits bei der einfachen Varianzanalyse wurden zunächst Boxplots erstellt, um die Unterschiede graphisch veranschaulichen zu können. Quantil- Quantil Diagramme und Histogramme verdeutlichen die Normalverteilung der Daten. Ergab die mehrfache Varianzanalyse, dass eine statistisch signifikante Wechselwirkung zwischen Bewässerungsart und Datum – bezogen auf den untersuchten Messwert – besteht, dann erfolgte ein paarweiser t-Test. Dieser ermittelte, zu welchem Zeitpunkt zwischen welchen Bewässerungsgruppen Unterschiede bestehen. War diese Wechselwirkung nicht signifikant, so wurden die Faktoren Zeit und Bewässerungsart getrennt voneinander mit einem paarweisen t-Test untersucht. Da bei mehrfachen Varianzanalysen die Gefahr besteht, dass bei vielen paarweisen Vergleichen die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, angeblich signifikante Unterschiede zu finden, muss bei dem Post Hoc Test (paarweiser t-Test) zunächst eine Korrektur mithilfe der Bonferroni-Methode vorgenommen werden (Bland J. M. et Altman D.G. 1995; Schumacher 2007).

*Tabelle 14. Übersicht über die statistische Arbeitsweise (eigene Abbildung)*

	Einfache Varianzanalyse (one-way ANOVA)	Mehrfache Varianzanalyse (two-way ANOVA for repeated measurements)
VORAUSSETZUNGEN	Festlegung Signifikanzniveau von 5% ( $p=0,05$ )	
	<b>Voraussetzungen</b>   Normalverteilung der Daten (Shapiro Wilk Test)   Varianzhomogenität (Levene Test)   unabhängige Daten (Versuchsaufbau)	
DARSTELLUNG	<b>Boxplots</b> <b>Histogramme</b> <b>Quantil- Quantil Diagramme</b>	
POST HOC TESTS	Voraussetzungen nicht erfüllt: <b>Kruskal Wallis Test</b>	Voraussetzungen nicht erfüllt: <b>Kruskal Wallis Test</b>
	Voraussetzungen erfüllt <b>ANOVA</b> <b>Dunn Test</b>	Voraussetzungen erfüllt <b>two way ANOVA</b> <b>paarweiser t-Test</b>

## 5 | Ergebnisse

### 5.1 | Grauwasseranalyse

Die Analysen des Instituts für Siedlungswasserbau wurden einerseits für den Zu- und Ablauf (bGW) (Tabelle 15) der Grauwasseranlage in Wiener Neustadt durchgeführt, andererseits wurden zusätzliche Untersuchungen des bGW und sGW (Tabelle 16) in den Tanks im Gewächshaus am Versuchsstandort unternommen. Die Werte stellen Mittelwerte der erhobenen Parameter dar.

#### 5.1.1 | Analyse des Ab- und Zulaufs der Referenzanlage Wiener Neustadt

Die Analysen des Zu- und Ablaufs lassen erkennen, wie sich die Reinigungsleistung der Referenzanlage auf das bGW auswirkt (Tabelle 15). Der Zulauf entspricht unbehandeltem Grauwasser, der Ablauf behandeltem Grauwasser.

Lag der Wert für die Trübung im Zulauf noch bei 289,68 NTU, so sank dieser im Ablauf auf 1,49 NTU. Die elektrische Leitfähigkeit stieg vom Zu- in den Ablauf von 847,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf 987,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bzw. BSB<sub>5</sub> und CSB sind im Ablauf jeweils auf 3 mg/l O<sub>2</sub> bzw. 21 mg/l O<sub>2</sub> gesunken. Der gelöste Sauerstoff stieg hingegen auf 3,72 mg/l im bGW an. Der pH-Wert erhöhte sich von 7,46 auf 8,52.

Bezüglich der Makronährstoffe halbierte sich der Phosphorgehalt im bGW durch die Reinigung beinahe von 2,52 mg/l auf 1,4 mg/l. Hingegen stieg der Nitratwert von 0,73 mg/l auf 14,39 mg/l.

Aus mikrobiologischer Sicht sind alle untersuchten Parameter im Ablauf verglichen mit dem Zulauf stark gesunken: *E. coli* fiel auf 1,5 KBE/100 ml im bGW bzw. Enterokokken auf 0,5 KBE/100 ml. *Legionella pneumophila* konnte weder im Zu- noch im Ablauf nachgewiesen werden.

Tabelle 15. Gemittelte Messwerte (fünf Messungen) der untersuchten Parameter am Ab- und Zulauf der Grauwasseranlage in Wiener Neustadt (Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, BOKU Wien, eigene Bearbeitung)

PARAMETER	ZULAUF WrN.	ABLAUF WrN. (bGW)
AFS [mg/l]	326,4	2,4
NH <sub>4</sub> -N [mg/l]	5,74	3,24
BSB <sub>5</sub> [mg/l O <sub>2</sub> ]	210	3
CSB [mg/l O <sub>2</sub> ]	746	21
Leitfähigkeit [µS/cm]	847,4	987,4
GH [° dH]	6,69	7,35
pH-Wert	7,5	8,5
P gesamt [mg/l]	2,52	1,4
O <sub>2</sub> gelöst [mg/l]	2,06	3,72
Tenside anionisch [mg/l]	37,1	0,32
Tenside kationisch [mg/l]	0,7	0,2
Tenside nichtionisch [mg/l]	3,64	1,31
TNb [mg/l]	36,8	6,82
TOC [mg/l]	259,92	6,62
Trübung (NTU)	289,68	1,49
Calcium [mg/l]	33,52	34,36
Kalium [mg/l]	6,20	7,42
Magnesium [mg/l]	8,73	14,22
Nitrat gelöst [mg/l]	0,72	14,39
Sulfat [mg/l]	60	81
CSB:TOC (berechnet)	2,92	3,14
<i>E. coli</i> [KBE/100ml]	2590909	1,5
Enterokokken [KBE/100ml]	109091	0,5
<i>Legionella pneumophila</i> [KBE/100ml]	0	0

### 5.1.2 | Analyse des bGW und sGW in den Tanks des Gewächshauses

Die Daten aus dem Glashaus zeigten, ob sich die Zusammensetzung des bGW aus der Referenzanlage (Tabelle 16) in den Tanks des Gewächshauses veränderte. Sie dienten reinen Monitoringzwecken, um bei möglichen negativen Veränderungen des Bewässerungswassers Analysedaten zur Verfügung zu haben. Es wurden hierbei keine mikrobiologischen, sondern nur physikalisch-chemische Analyseparameter erhoben.

Der Vergleich der Mittelwerte des bGW im Ablauf (Tabelle 15) mit den gemittelten Werten der Proben im Glashaus (Tabelle 16) ergaben, dass durch die Lagerung in den Kunststoffanks die meisten Werte gesunken sind. Ausgenommen sind die elektrische Leitfähigkeit (1005,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) und der pH-Wert (8,6). Des Weiteren stiegen bei den Makroelementen die Werte des Magnesiums von 14,22 mg/l im Zulauf auf 19,8 mg/l im Tank des bGW leicht an.

*Tabelle 16. Gemittelte Messwerte der untersuchten chemischen Parameter des bGW und sGW in den Tanks im Gewächshaus (Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, BOKU Wien, eigene Bearbeitung)*

PARAMETER	bGW GEWÄCHSHAUS	sGW GEWÄCHSHAUS
AFS [mg/l]	2	-
NH <sub>4</sub> -N [mg/l]	0,535	11,16
BSB <sub>5</sub> [mg/l O <sub>2</sub> ]	<3	-
CSB [mg/l O <sub>2</sub> ]	16	330
Leitfähigkeit [μS/cm]	1005,5	-
GH [° dH]	7,2	-
pH-Wert	8,6	-
P gesamt [mg/l]	1	-
O <sub>2</sub> gelöst [mg/l]	-	-
Tenside anionisch [mg/l]	0,2	-
Tenside kationisch [mg/l]	<0,2	-
Tenside nichtionisch	0,31	-
TNb [mg/l]	2,3	-
TOC [mg/l]	6,35	65,55
Trübung (NTU)	0,27	-
Calcium [mg/l]	31,45	-
Kalium [mg/l]	8,02	-
Magnesium [mg/l]	19,8	-
Nitrat gelöst [mg/l]	0,75	0,11
Sulfat [mg/l]	82	-
CSB:TOC (berechnet)	2,52	5,05

## 5.2 | Relativer Chlorophyllgehalt

### 5.2.1 | *Acer pseudoplatanus*

Bei *A. pseudoplatanus* konnte keine statistisch signifikante Wechselwirkung zwischen Bewässerungsart und Zeit auf den relativen Chlorophyllgehalt festgestellt werden ( $p=0,825$ ) (Abbildung 21). Zudem wurde kein Einfluss der Bewässerung beobachtet ( $p=0,688$ ). Jedoch reduzierte sich der SPAD-Wert in allen Gruppen signifikant über den Faktor Zeit ( $p=1,79 \cdot 10^{-4}$ ). Das bedeutet, dass sich die einzelnen Bewässerungsgruppen (FW, bGW, sGW) an den Erhebungstagen nicht relevant voneinander unterschieden, sich jedoch über die Zeit hinweg veränderten. Die Bewässerung mit bGW und sGW hatte somit keinen Einfluss auf den relativen Chlorophyllgehalt bei *A. pseudoplatanus*.

Aufgrund der Blattentwicklung von hellgrün auf dunkelgrün stieg der Chlorophyllgehalt von 12.05.2020 auf 05.06.2020 in allen Bewässerungsgruppen an ( $p=6,79 \cdot 10^{-4}$ ) und fiel zum 16.09.2020 ( $p=0,001$ ) hin wieder ab, wie in Abbildung 21 ersichtlich ist.

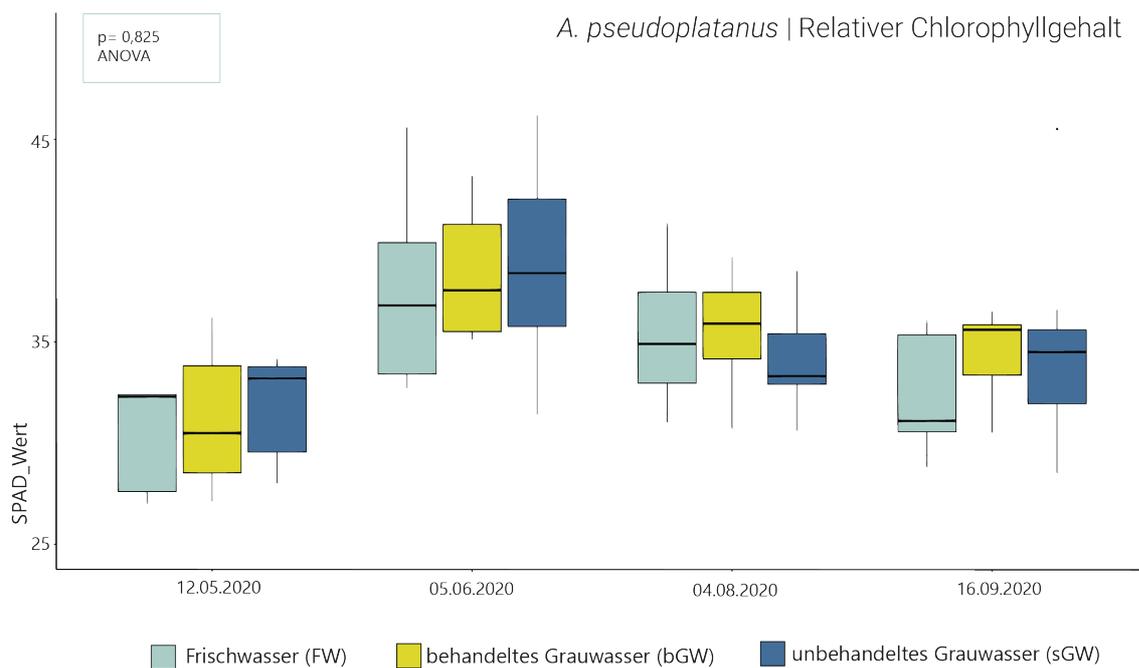


Abbildung 21. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von *A. pseudoplatanus* an vier Tagen (eigene Abbildung)

## 5.2.2 | *Tilia cordata*

Die Auswertung ergab, dass zwischen der Art der Bewässerung und den Erhebungstagen eine signifikante Wechselwirkung den relativen Chlorophyllgehalt betreffend bestand ( $p=0,026$ ).

An den Erhebungstagen 04.08.2020 ( $p=0,032$ ) und 16.09.2020 ( $p=0,002$ ) sind statistisch relevante Einflüsse der Bewässerungsart auf den relativen Chlorophyllgehalt feststellbar (Abbildung 22). Die Bewässerung mit sGW konnte am 04.08.2020 mit 37,97 SPAD im Vergleich zur FW- (33,57 SPAD) und bGW-Gruppe (35,79 SPAD) den höchsten relativen Chlorophyllgehalt vorweisen. Die Pflanzen, die mit bGW bewässert wurden, verhielten sich mit 35,78 SPAD ähnlich wie sGW. Der Trend konnte auch am 16.09.2020 weiter beobachtet werden: die sGW-Bewässerung (36,97 SPAD) unterschied sich signifikant von der Gruppe mit FW (28, 53 SPAD).

An den anderen Erhebungstagen 12.05.2020 ( $p=0,116$ ) und 05.06.2020 ( $p=0,712$ ) hatte die Bewässerungsart keine Wirkung auf die erzielten Messwerte.

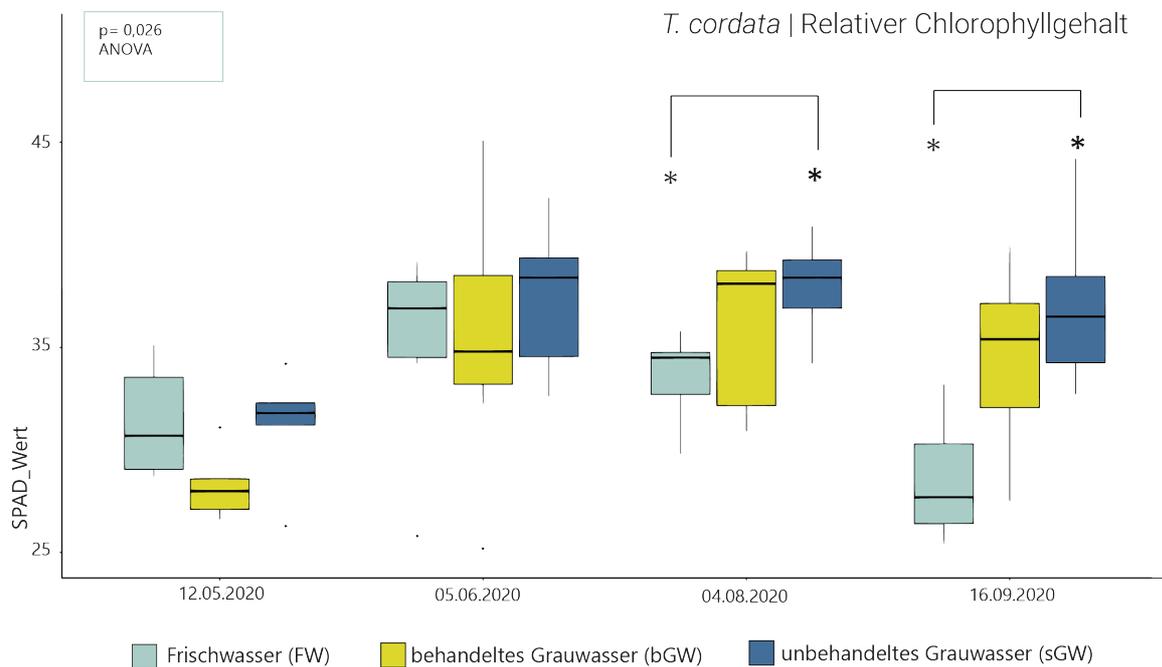


Abbildung 22. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von *T. cordata* an vier Tagen (eigene Abbildung)

## 5.2.3 | *Geranium macrorrhizum*

Der relative Chlorophyllgehalt bei *G. macrorrhizum* wurde durch eine wechselseitige Beziehung von Bewässerungsart und Erhebungsdatum statistisch signifikant beeinflusst

( $p=0,009$ ). Dies bedeutet, dass der relative Chlorophyllgehalt von *G. macrorrhizum* zu allen Messzeitpunkten zwischen den Bewässerungsgruppen gleich hoch war. Lediglich am 04.08.2020 ( $p=0,004$ ) war jener von FW mit 26,85 SPAD signifikant höher als jener der Testpflanzen, die mit sGW (21,4 SPAD) bewässert wurden. Die bGW-Bewässerung bewirkte auch an diesem Erhebungstag einen ähnlichen relativen Chlorophyllgehalt (29,54 SPAD) wie FW (26,85 SPAD).

Zusätzlich konnte bei *G. macrorrhizum* in allen Bewässerungsgruppen ein abnehmender relativer Chlorophyllgehalt beobachtet werden, wie auch in Abbildung 23 ersichtlich ist. Beispielsweise erzielte die bGW-Gruppe zu Versuchsbeginn durchschnittlich 38,39 SPAD, welcher bis zum Versuchsende hin auf 25,97 SPAD sank. Dieser Trend setzte sich in allen Bewässerungsgruppen fort.

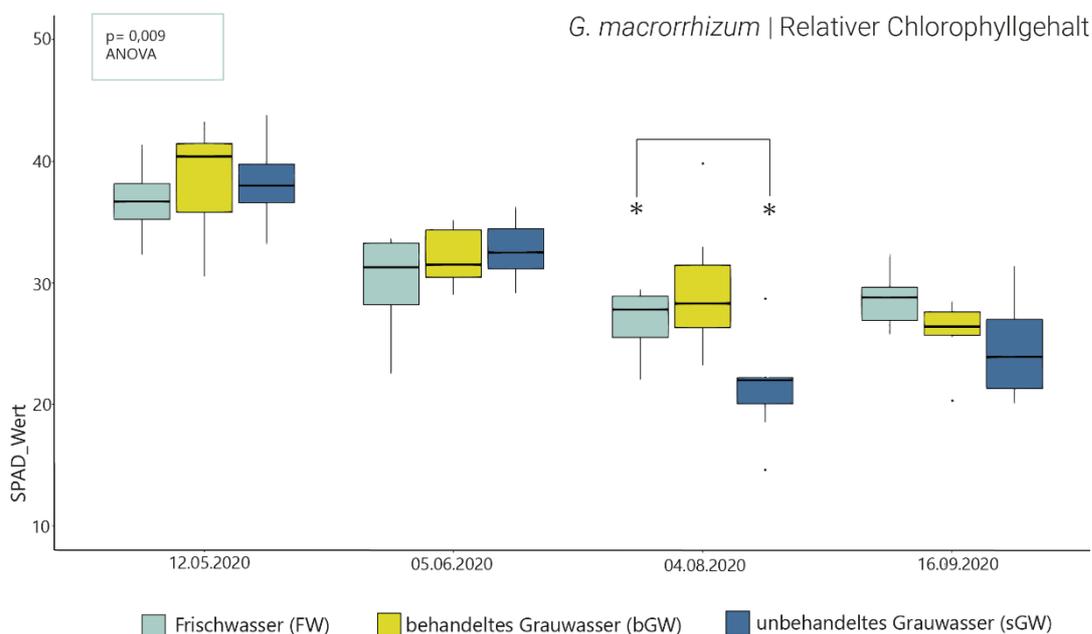


Abbildung 23. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von *G. macrorrhizum* an vier Tagen (eigene Abbildung)

## 5.2.4 | *Hedera helix*

Allgemein wurde keine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Messzeitpunkt festgestellt ( $p=0,15$ ).

Die Wirkung der Bewässerungsart auf den Chlorophyllgehalt konnte zu Versuchsende am 16.09.2020 eine statistische Signifikanz aufweisen ( $p=2,85 \cdot 10^{-4}$ ) (Abbildung 24). Die wesentlichen Unterschiede lagen zwischen der FW und sGW-Gruppe ( $p=0,002$ ). Die Bewässerung mit sGW konnte signifikant höhere Chlorophyllwerte (52,9 SPAD) vorweisen als

jene Testpflanzen, die mit FW (42 SPAD) bewässert wurden. Die bGW-Gruppe unterschied sich zu Versuchsende bei *H. helix* nicht signifikant von FW und sGW.

Auf den gesamten Versuchszeitraum gesehen, stieg der relative Chlorophyllgehalt aller Bewässerungsgruppen bei *H. helix* an und konnte zu Versuchsende die höchsten Werte erzielen. Dieser zunehmende Trend konnte im Vergleich zu den anderen untersuchten Arten (*A. pseudoplatanus*, *T. cordata*, *G. macrorrhizum* und *H. sanguinea*) nur bei *H. helix* beobachtet werden. Lag der relative Chlorophyllgehalt in der bGW-Gruppe bei anfänglichen 34,53 SPAD (04.08.2020), so stieg dieser im Verlauf des Versuches auf 48,9 SPAD (16.09.2020). Dieser Trend bestand unabhängig von der Bewässerungsart bei allen Testpflanzen von *H. helix*.

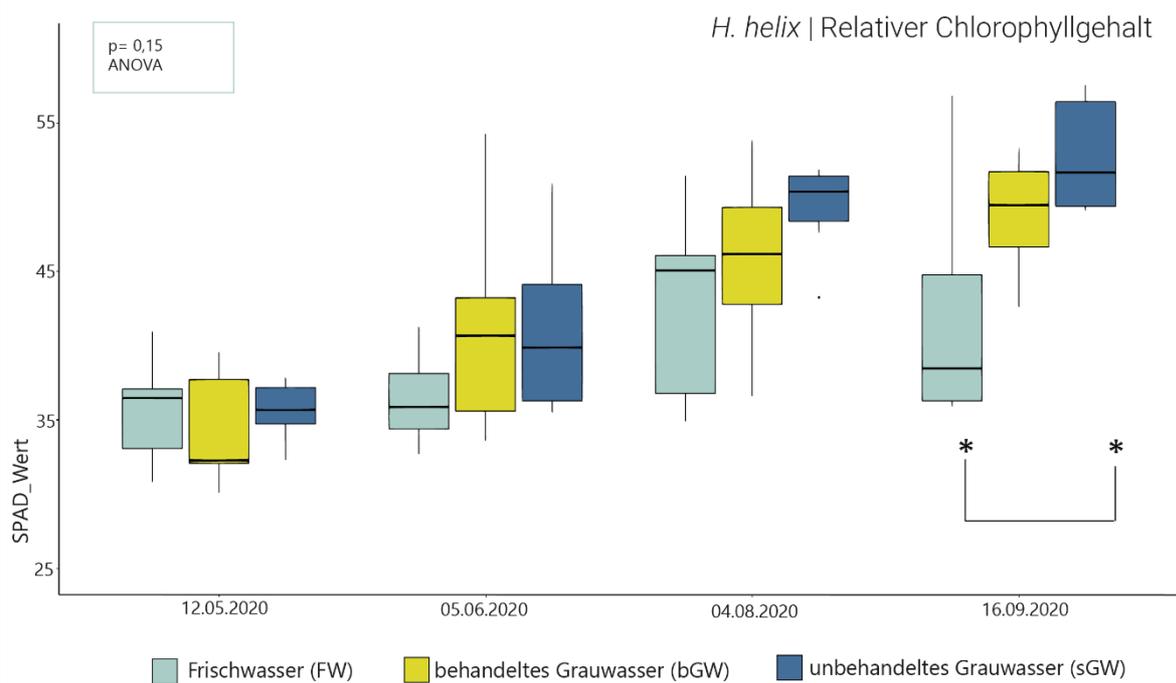


Abbildung 24. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von *H. helix* an vier Tagen (eigene Abbildung)

### 5.2.5 | *Heuchera sanguinea*

Die Interaktion zwischen der Bewässerungsart und den Erhebungstagen bzgl. des relativen Chlorophyllgehalts war statistisch nicht signifikant ( $p=0,466$ ) (Abbildung 25), jedoch konnte ein statistischer Einfluss der Zeit und der Bewässerungsart auf den SPAD-Wert festgestellt werden. Bei getrennter Betrachtung der Bewässerungs- ( $p=0,008$ ) als auch der Zeitvariable ( $p=1,04 \cdot 10^{-12}$ ) wurden signifikante Unterschiede ersichtlich. Ein abnehmender relativer Chlorophyllgehalt konnte unabhängig von der Bewässerungsart in allen Gruppen an drei von vier Erhebungstagen (12.05.2020, 05.06.2020 und 04.08.2020) hinweg beobachtet werden.

Lagen die gemittelten SPAD-Werte zu Versuchsbeginn in der FW-Gruppe bei 36,19 SPAD, in bGW bei 38,47 SPAD bzw. in der sGW-Gruppe bei 40,49 SPAD, so wurden am Ende des Versuches wesentlich geringere Chlorophyllgehalte gemessen (FW=29,53 SPAD | bGW=26,9 SPAD | sGW=30,74). Allgemein unterschied sich der relative Chlorophyllgehalt der FW-Gruppe (ungeachtet des Erhebungstages) nicht signifikant von den Werten der bGW- ( $p=1$ ) und sGW-Gruppe ( $p=0,08$ ).

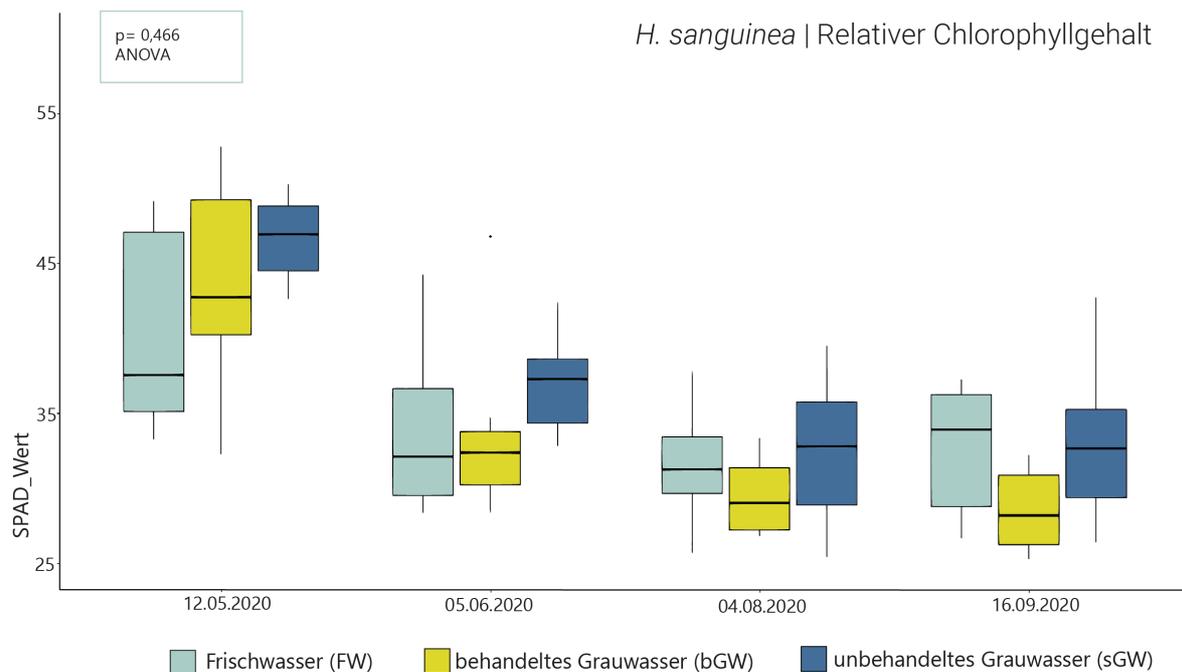


Abbildung 25. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von *H. sanguinea* an vier Tagen (eigene Abbildung)

## 5.2.6 | Zusammenfassung relativer Chlorophyllgehalt

Der relative Chlorophyllgehalt aller drei Gruppen (FW, bGW, sGW) unterschied sich bei *A. pseudoplatanus* und *H. sanguinea* nicht voneinander und entwickelte sich über den Versuchszeitraum annähernd gleich.

Die Ergebnisse von *T. cordata* zeigten, dass sich die FW- und die bGW-Gruppe an allen Erhebungstagen nicht signifikant voneinander unterschieden. Hingegen sind die relativen Chlorophyllwerte mit FW-Bewässerung am 04.08.2020 und am 16.09.2020 geringer als die der Testpflanzen, die mit sGW bewässert wurden.

*G. macrorrhizum* verhält sich bezüglich der Unterschiede zwischen FW- und sGW-Bewässerung am 04.08.2020 ähnlich wie *T. cordata*. An allen anderen Tagen hatte die Art der Bewässerung keinen Einfluss auf den relativen Chlorophyllgehalt.

Die statistische Auswertung von *H. helix* ergab, dass es lediglich zu Versuchsende in der FW-Gruppe zu einem geringeren relativen Chlorophyllgehalt kam als in der sGW- Gruppe. An allen anderen Erhebungstagen zeigte die Art der Bewässerung keine Wirkung auf den Chlorophyllgehalt.

Zudem wurde beobachtet, dass es bei den Arten *A. pseudoplatanus*, *G. macrorrhizum* und *H. sanguinea* in allen Bewässerungsgruppen zu einer Abnahme des relativen Chlorophyllgehalts im Versuchsverlauf kam. Grund hierfür könnte eine vermehrte Zunahme an geschädigten Blättern sein (siehe Diskussion 6.2.1). Einen umgekehrten Trend zeigte hingegen *H. helix*, wo eine Steigerung des SPAD-Wertes während der Vegetationsperiode gemessen wurde. Bei *T. cordata* konnte weder ein ab- noch zunehmender Trend festgestellt werden.

## 5.3 | Stomatäre Leitfähigkeit

### 5.3.1 | *Acer pseudoplatanus*

Die Messungen der stomatären Leitfähigkeit ergaben bei *A. pseudoplatanus* eine statistisch signifikante Wechselwirkung zwischen Bewässerungsart und dem Faktor Zeit ( $p=0,005$ ).

Die Bewässerungsart hatte Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit und führte dazu, dass am 20.07.2020 ( $p=1,47 \cdot 10^{-5}$ ) die Bewässerung mit bGW zu einer erhöhten stomatären Leitfähigkeit (356,01 mmol/m<sup>2</sup>/s) führte. Im Vergleich dazu lag die stomatäre Leitfähigkeit in der FW-Gruppe bei 97,03 mmol/m<sup>2</sup>/s. Die sGW-Bewässerung führte zwar mit 226,61 mmol/m<sup>2</sup>/s zu höheren Werten als die der FW-Gruppe, diese sind jedoch statistisch nicht relevant. Derselbe Trend setzte sich am 26.08.2020 ( $p=0,022$ ) fort: Die stomatäre Leitfähigkeit war mit der bGW-Bewässerung signifikant höher (253,76 mmol/m<sup>2</sup>/s) als in jener Gruppe, die mit FW (126,87 mmol/m<sup>2</sup>/s) bewässert wurde. Die Ergebnisse der sGW-Gruppe (198,07 mmol/m<sup>2</sup>/s) erzielten wiederum eine höhere stomatäre Leitfähigkeit als die FW-Gruppe, wiesen aber keine statistische Relevanz auf. Zu Versuchsende am 16.09.2020 konnten keine relevanten Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen festgestellt werden (Abbildung 26).

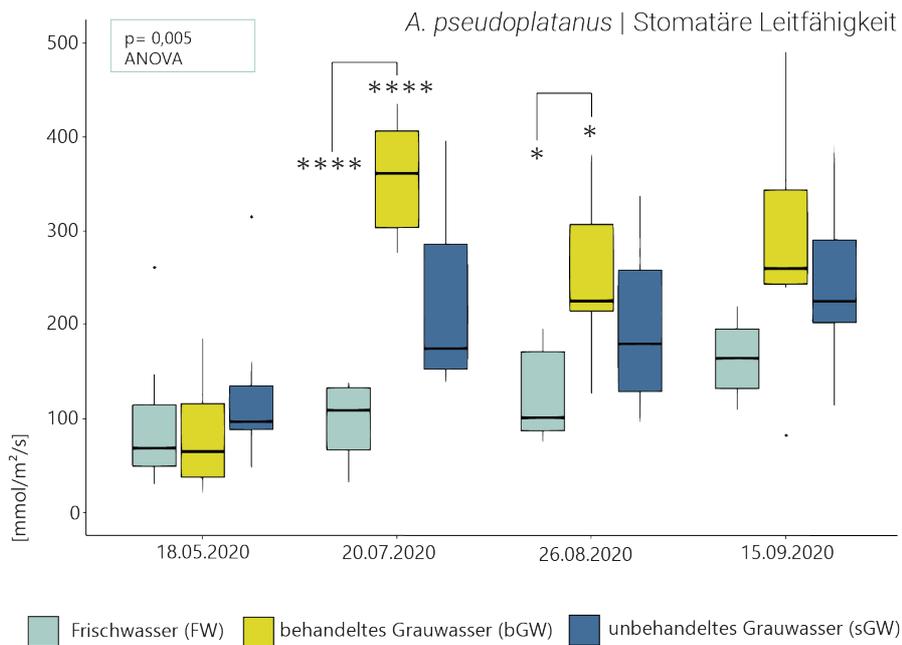


Abbildung 26. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von *A. pseudoplatanus* an vier Tagen (eigene Abbildung)

### 5.3.2 | *Tilia cordata*

Bezüglich der stomatären Leitfähigkeit bestand bei *T. cordata* eine Wechselwirkung zwischen Bewässerungsart und dem Zeitpunkt der Messungen ( $p=0,031$ ) (Abbildung 27).

An den Erhebungstagen 18.05.2020 ( $p=0,005$ ), 26.08.2020 ( $p=0,05$ ) und 15.09.2020 ( $p=0,03$ ) konnte ein signifikanter Effekt der Bewässerungsart auf die stomatäre Leitfähigkeit

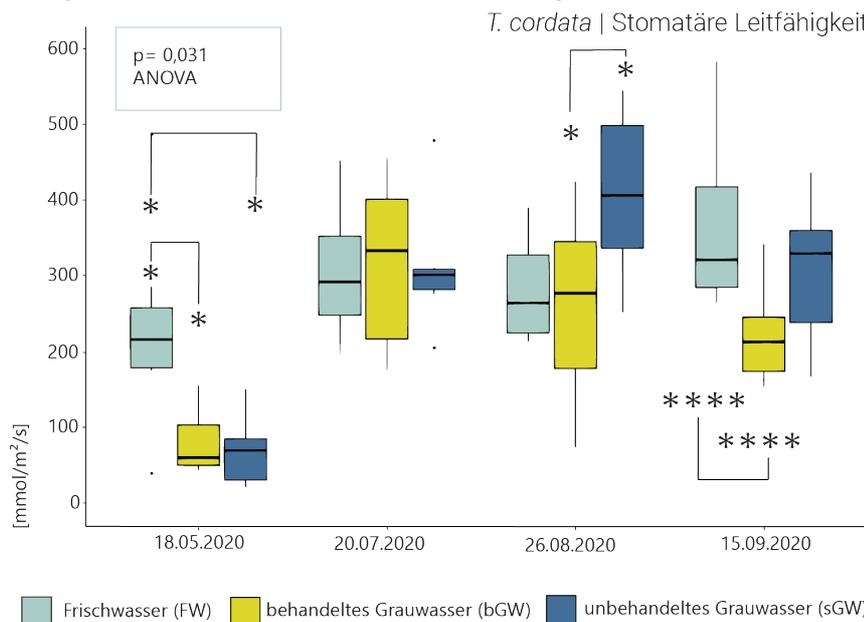


Abbildung 27. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von *T. cordata* an vier Tagen (eigene Abbildung)

festgestellt werden. Die Bewässerung mit FW (231,04 mmol/m<sup>2</sup>/s) erzielte am 18.05.2020 im Vergleich zu bGW (80,9 mmol/m<sup>2</sup>/s) und sGW (67,83 mmol/m<sup>2</sup>/s) eine höhere stomatäre Leitfähigkeit. Eine ähnliche Entwicklung konnte zu Versuchsende beobachtet werden, wobei sich hier nur die bGW-Gruppe mit 221,31 mmol/m<sup>2</sup>/s signifikant von der FW-Gruppe (367,44 mmol/m<sup>2</sup>/s) unterschied. Am 26.08.2020 erzielten die Testpflanzen, die mit sGW bewässert wurden, die höchste stomatäre Leitfähigkeit (460,85 mmol/m<sup>2</sup>/s) im gesamten Versuchsverlauf.

### 5.3.3 | *Geranium macrorrhizum*

Eine signifikante, wechselseitige Interaktion zwischen Bewässerungsart und Datum bezüglich der stomatären Leitfähigkeit konnte bei *G. macrorrhizum* nicht festgestellt werden ( $p=0,489$ ).

Die Art der Bewässerung führte statistisch gesehen jedoch zu einer Beeinflussung der stomatären Leitfähigkeit ( $p=2,79 \cdot 10^{-6}$ ). Zu Versuchsbeginn am 18.05.2020 bestanden keine relevanten Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen. Ab dem 20.07.2020 zeigte sich der bis zum Versuchsende anhaltende Trend, dass die Testpflanzen, die mit bGW bewässert wurden, eine signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeit aufwiesen als jene, die FW- ( $p=1,52 \cdot 10^{-4}$ ) oder sGW ( $p=3,45 \cdot 10^{-5}$ ) erhielten (Abbildung 28). Zu Versuchsende war beispielsweise die stomatäre Leitfähigkeit in der bGW-Gruppe mit 179,67 deutlich geringer als jene in der FW- (390,42 mmol/m<sup>2</sup>/s) bzw. in der sGW-Gruppe (387,63 mmol/m<sup>2</sup>/s).<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Hier muss angemerkt werden, dass schlussendlich nicht die Bewässerungsart den Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit ausübte, sondern der Zeitpunkt der Messung an den Erhebungstagen (20.07. | 26.08. | 16.09) selbst. Hierbei entstand der Fehler, dass die Werte der bGW-Gruppe jeweils am Ende des Erhebungstages gemessen wurden, was sich in einer deutlich geringeren Lichtintensität und folglich verminderten stomatären Leitfähigkeit äußerte.

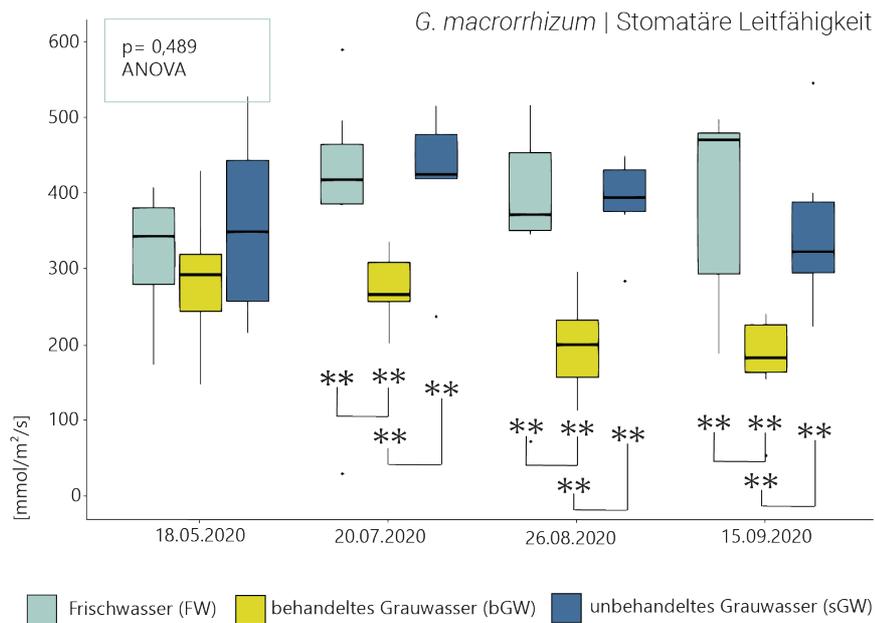


Abbildung 28. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von *G. macrorrhizum* an vier Tagen (eigene Abbildung)

### 5.3.4 | *Hedera helix*

Eine relevante Wechselwirkung zwischen der Art der Bewässerung und des Erhebungstages konnte in Bezug auf die stomatäre Leitfähigkeit festgestellt werden ( $p=0,004$ ).

Der Effekt der Bewässerung auf die untersuchte Variable ist am 20.07.2020 ( $p=0,001$ ) und am 15.09.2020 ( $p=0,05$ ) statistisch signifikant (Abbildung 29). Die Erhebungen am 20.07.2020 ergaben, dass die Bewässerung mit bGW keinen Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit ausübte und keine Unterschiede zur Bewässerung mit FW bestanden. Die stomatäre Leitfähigkeit der sGW-Gruppe (214,56 mmol/m<sup>2</sup>/s) war im Vergleich zu bGW (102,86 mmol/m<sup>2</sup>/s) und FW (145,9 mmol/m<sup>2</sup>/s) signifikant höher. Zu Versuchsende am 15.09.2020 konnten zwischen der bGW- und sGW-Bewässerung wesentliche Unterschiede bezüglich der stomatären Leitfähigkeit festgestellt werden. Diese lag bei sGW mit 154,69 mmol/m<sup>2</sup>/s deutlich höher als in der bGW- Gruppe 92,97 mmol/m<sup>2</sup>/s. Die Bewässerung mit FW verhielt sich statistisch gesehen wie die mit bGW und sGW.

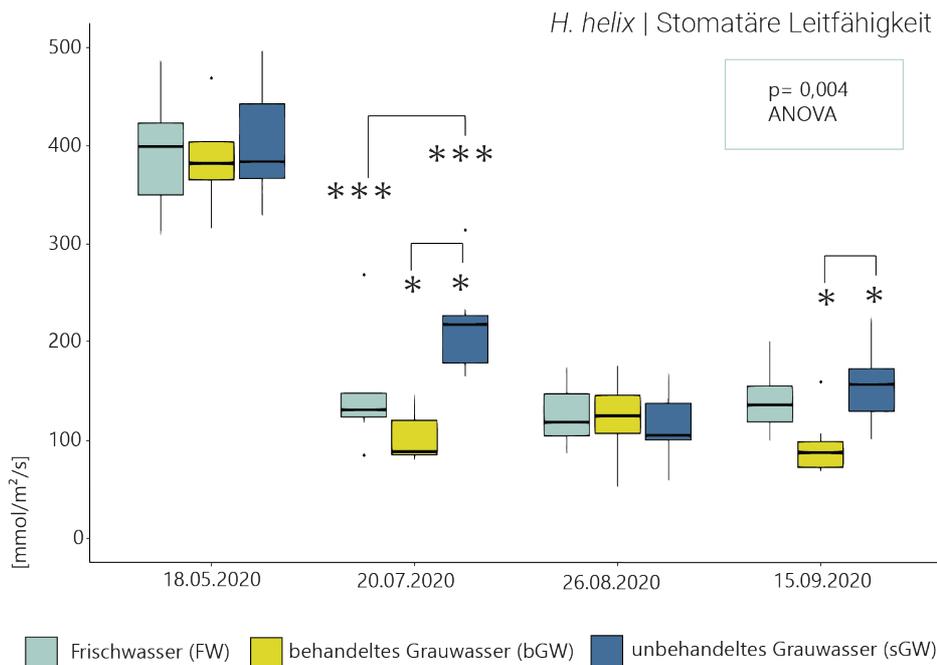


Abbildung 29. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von *H. helix* an vier Tagen (eigene Abbildung)

### 5.3.5 | *Heuchera sanguinea*

Die Untersuchung des Effekts, den die Bewässerungsart auf die stomatäre Leitfähigkeit über den Messzeitraum hinweg hatte, zeigte eine relevante Wechselwirkung ( $p=4,46 \cdot 10^{-4}$ ).

Der Haupteinfluss bestand zu Versuchsbeginn ( $p=9 \cdot 10^{-6}$ ) und Versuchsende ( $p=0,036$ ) (Abbildung 30). Am 18.05.2020 hatte die Bewässerung mit bGW eine signifikante Auswirkung

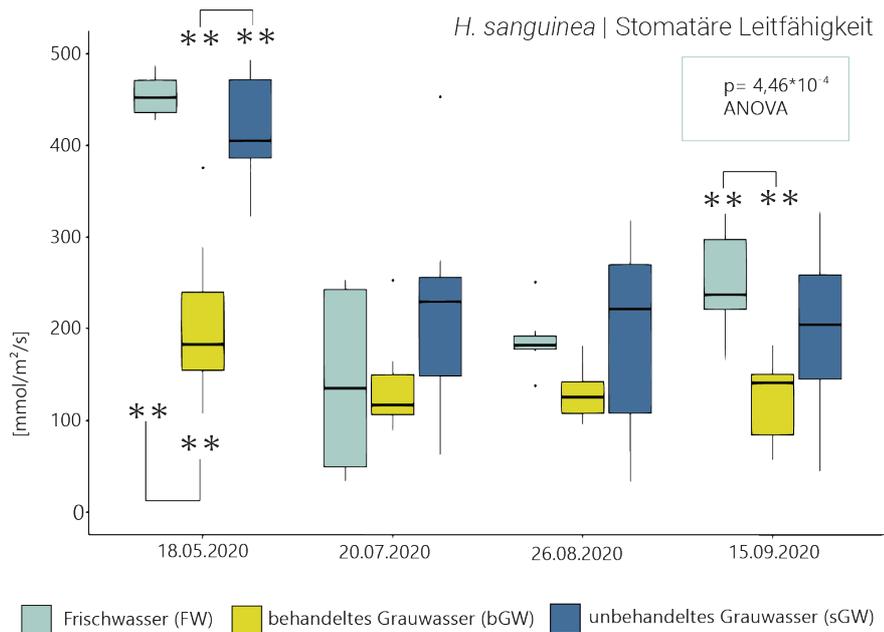


Abbildung 30. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von *H. sanguinea* an vier Tagen (eigene Abbildung)

auf die stomatäre Leitfähigkeit, was zu verringerten Werten (207, 61 mmol/m<sup>2</sup>/s) im Vergleich zu FW (496,66 mmol/m<sup>2</sup>/s) bzw. sGW (419,14 mmol/m<sup>2</sup>/s) führte. Zu Versuchsende bewirkte die bGW-Bewässerung (120,9 mmol/m<sup>2</sup>/s) wiederum eine Senkung der stomatären Leitfähigkeit im Vergleich zur FW- (251,9 mmol/m<sup>2</sup>/s) Gruppe. An den restlichen Erhebungstagen übte die Art der Bewässerung keinen signifikanten Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit der untersuchten Pflanzen aus.

### 5.3.6 | Zusammenfassung stomatäre Leitfähigkeit

Bei *A. pseudoplatanus* wiesen die Gruppen FW und bGW an zwei Erhebungstagen (20.7.2020 und 26.08.2020) signifikante Unterschiede auf, wobei die stomatäre Leitfähigkeit in der bGW höher war. Die Bewässerung mit sGW hatte keinen relevanten Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit.

Die Auswertung der Erhebungen bei *T. cordata* ergab, dass es an drei Erhebungstagen zu wesentlichen Differenzen zwischen den Bewässerungsgruppen kam: Zu Versuchsbeginn am 18.05.2020 erzielte die FW- Bewässerung eine höhere stomatäre Leitfähigkeit als die bGW- und sGW- Bewässerung. Am 26.08.2020 kam es zu signifikant höheren Werten in der sGW- Gruppe. Es konnten jedoch keine Unterschiede beider Grauwassergruppen und der FW- Gruppe festgestellt werden. Wesentlich geringere Werte im Vergleich zu FW wurden in der bGW-Gruppe zu Versuchsende beobachtet.

Die stomatäre Leitfähigkeit bei *G. macrorrhizum* unterschied sich zwischen FW- und bGW an drei Erhebungstagen, wobei zu Versuchsbeginn die Unterschiede nicht signifikant ausfielen. Die FW- und sGW-Gruppen wiesen höhere Werte auf als die Gruppe, die mit bGW gegossen wurde. Die Pflanzen, die mit FW und sGW bewässert wurden, verhielten sich über den gesamten Versuch hinweg ähnlich. Hierbei ist die Beeinflussung des Messzeitpunkts am jeweiligen Erhebungstag zu erwähnen (siehe Fußnote 5, S.66).

Die stomatäre Leitfähigkeit bei *H. helix* verhielt sich in der FW- und bGW-Gruppe über den gesamten Versuchszeitraum ähnlich. Des Weiteren wurde beobachtet, dass am 20.07.2020 die Bewässerung mit sGW signifikant höhere Werte erzielte als bei FW sowie bGW. Zu Versuchsende konnte lediglich im Vergleich zu sGW in der bGW- Gruppe eine signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeit festgestellt werden.

## 5.4 | Zuwachs Blattanzahl

### 5.4.1 | *Acer pseudoplatanus*

Die Untersuchung der Blattanzahl ergab, dass es keine statistisch relevante wechselseitige Interaktion von Bewässerungsart und Datum bezüglich der Blattanzahl bei *A. pseudoplatanus* gab ( $p=0,787$ ) (Abbildung 31). Bei getrennter Betrachtung der Zeit- und Bewässerungsvariable ist erkennbar, dass die Bewässerungsart in keiner der Gruppen einen Einfluss auf die Blattanzahl hatte ( $p=0,628$ ). In allen Bewässerungsgruppen kam es über den Versuchszeitraum zu einer Zunahme der Blattanzahl. ( $p=1,13 \cdot 10^{-14}$ ).

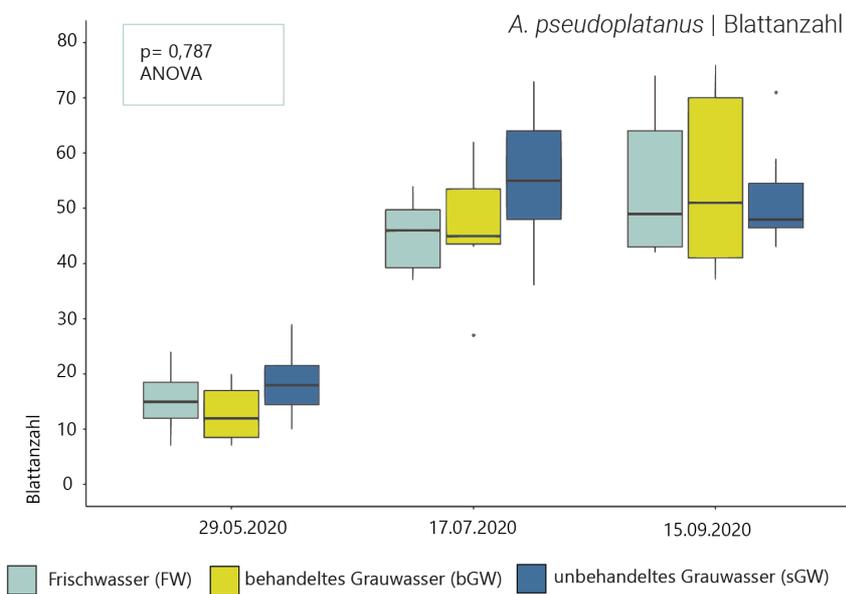


Abbildung 31. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von *A. pseudoplatanus* an drei Tagen (eigene Abbildung)

### 5.4.2 | *Tilia cordata*

Eine signifikante Wechselwirkung zwischen Bewässerungsart und Messdatum bezogen auf die Blattanzahl konnte bei *T. cordata* nicht beobachtet werden ( $p=0,970$ ). Zu Versuchsbeginn wurden bei den Testpflanzen in der FW-Gruppe mit 11,43 Blättern eine geringere Blattanzahl gezählt als in der bGW- (20,71 Blätter) und sGW-Gruppe (18,14 Blätter). Ein statistisch signifikanter Einfluss der Bewässerungsart auf die Gesamtblattanzahl konnte an den restlichen Erhebungstagen nicht mehr festgestellt werden (Abbildung 32).

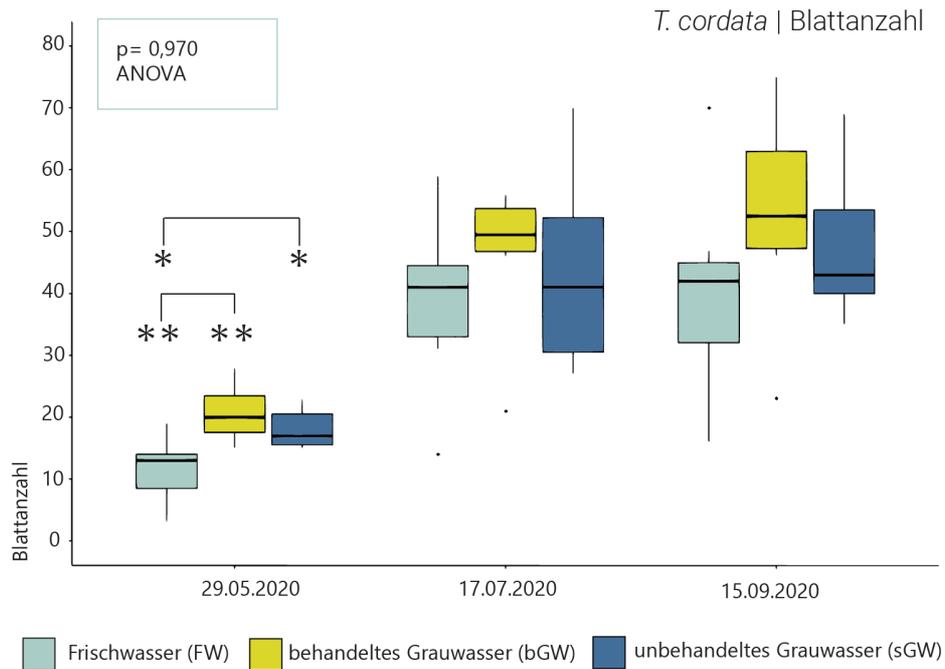


Abbildung 32. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von *T. cordata* an drei Tagen (eigene Abbildung)

### 5.4.3 | *Geranium macrorrhizum*

Bezogen auf die Blattanzahl bestand bei *G. macrorrhizum* eine statistisch signifikante wechselseitige Beziehung von Bewässerungsart und Erhebungsdatum ( $p=7,42 \cdot 10^{-4}$ ). An sämtlichen Erhebungstagen, 29.05.2020 ( $p=0,013$ ), 17.07.2020 ( $p=5,05 \cdot 10^{-4}$ ) und 15.09.2020 ( $p=0,007$ ), konnte ein signifikanter Effekt der Bewässerung auf die Blattanzahl beobachtet werden. Zu Versuchsbeginn erzielte die Gruppe mit bGW- Bewässerung (30,42 Blätter) eine signifikant höhere Blattanzahl als jene Testpflanzen, die mit sGW (21,71 Blätter) bewässert wurden. Die FW-Gruppe hatte zwar mit 23,42 weniger Blätter als bGW, hier konnte statistisch aber kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Dieser Trend setzte sich am zweiten Erhebungstag (17.07.2020) fort. Mit Versuchsende (16.09.2020) wurden in der sGW-Gruppe (48,57 Blätter) die wenigsten Blätter gezählt, ein signifikanter Unterschied zu der FW-Gruppe mit 80,5 Blättern konnte hier festgestellt werden. Die Bewässerung mit bGW (64,57 Blätter) hatte wie an den restlichen Erhebungstagen zu Versuchsende wiederum keinen negativen Einfluss auf die Blattanzahl (Abbildung 33).

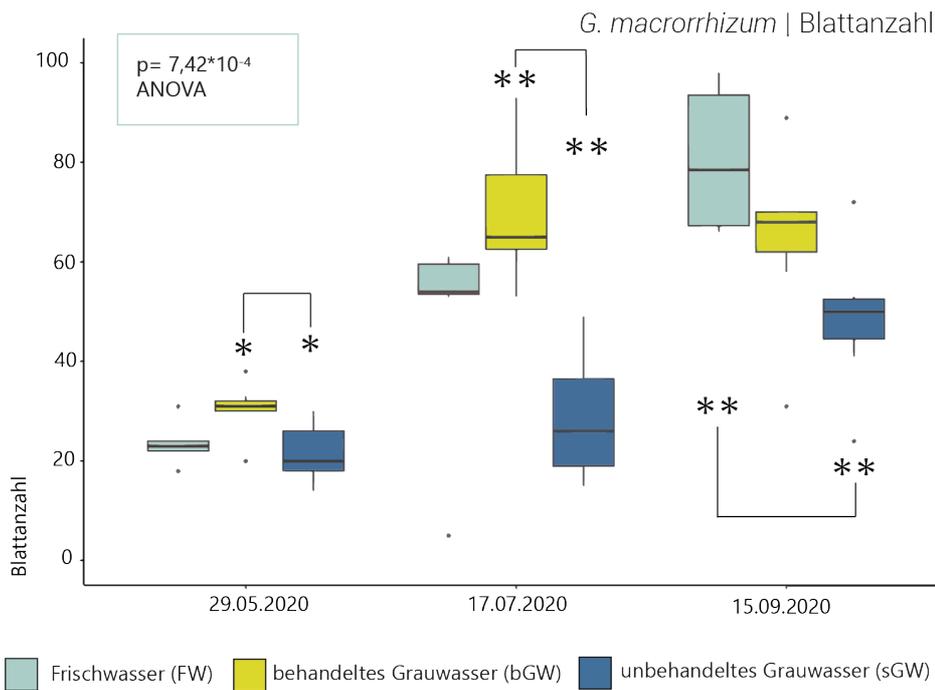


Abbildung 33. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von *G. macrorrhizum* an drei Tagen (eigene Abbildung)

#### 5.4.4 | *Hedera helix*

Bezogen auf die Blattanzahl konnte bei *H. helix* keine signifikante, wechselseitige Interaktion von Bewässerung und Datum festgestellt werden ( $p=0,853$ ). Es kam in allen Bewässerungsgruppen zu einer Zunahme der Blattanzahl (Abbildung 34) ( $p=2,74*10^{12}$ ), kein statistisch relevanter Einfluss der Bewässerungsart auf die Blattanzahl wurde beobachtet ( $p=0,656$ ).

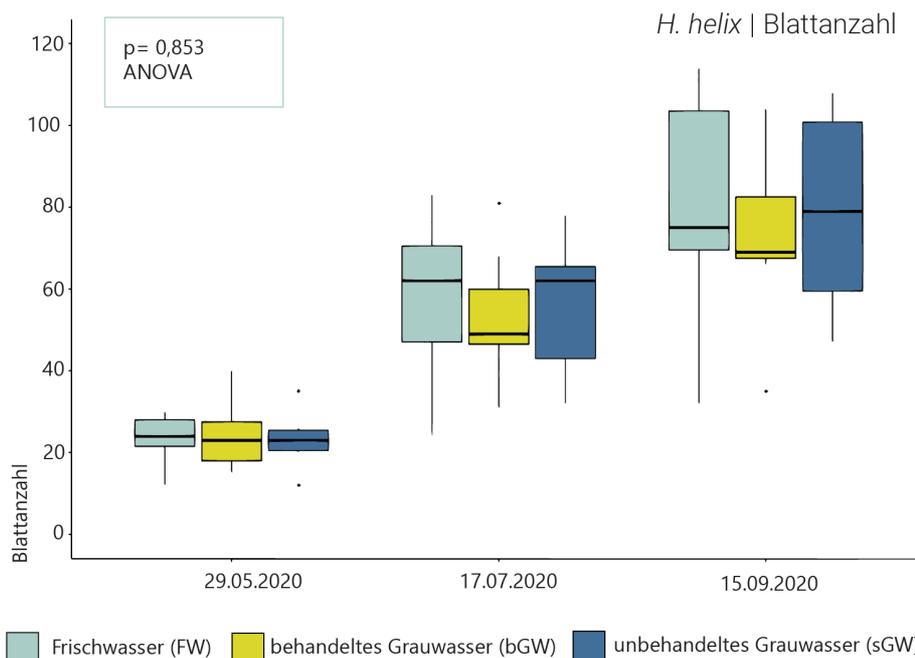


Abbildung 34. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von *H. helix* an drei Tagen (eigene Abbildung)

### 5.4.5 | *Heuchera sanguinea*

Es lag keine Interaktion zwischen der Art der Bewässerung und des Zeitpunkts der Messung vor, die einen statistisch relevanten Einfluss auf die Blattanzahl von *H. sanguinea* ausgeübt hätte ( $p=0,067$ ). Die isolierte Betrachtung der Variable „Bewässerung“ zu Versuchsbeginn (29.05) ergab, dass sich die bGW-Gruppe signifikant von der FW- und sGW- Gruppe unterschied (Abbildung 35). Dies äußerte sich in einer höheren Blattanzahl (32,57 Blätter) bei den Pflanzen, die mit bGW- bewässert wurden. An den restlichen Erhebungstagen konnten keine Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen bezüglich der Blattanzahl festgestellt werden. Es kam in allen Gruppen unabhängig dessen zu einer Zunahme der Blätter ( $p=5,91 \cdot 10^{-16}$ ).

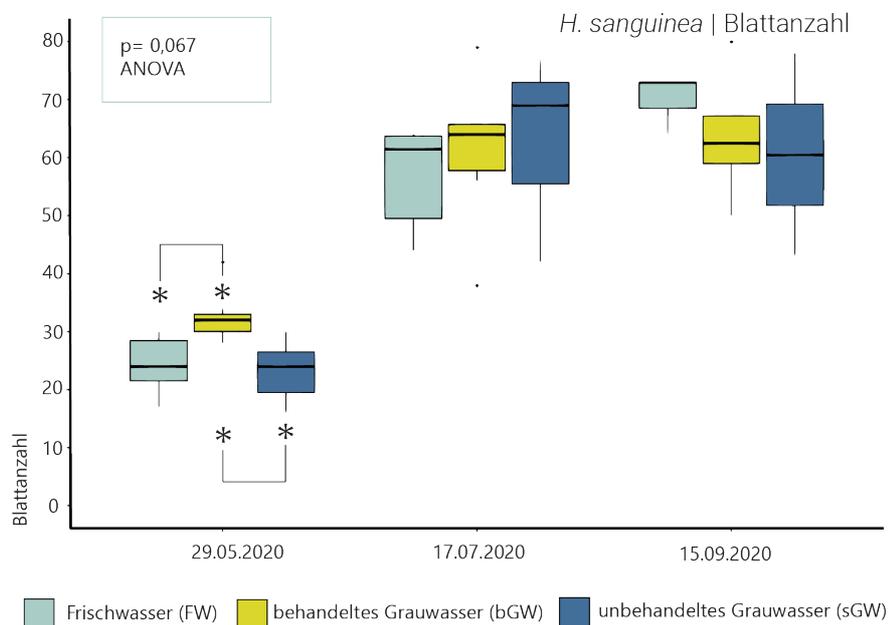


Abbildung 35. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von *H. sanguinea* an drei Tagen (eigene Abbildung)

### 5.4.6 | Zusammenfassung Blattanzahl

Bei allen untersuchten Arten kam es in sämtlichen Bewässerungsgruppen zu einer Zunahme der Blattanzahl.

*A. pseudoplatanus* und *H. helix* wiesen weder eine Wechselwirkung von Bewässerungsart und Datum noch einen Unterschied zwischen den Bewässerungsgruppen auf. Somit hatte die Bewässerung mit bGW und sGW keine Auswirkungen auf die Blattanzahl.

*T. cordata* äußerte zu Versuchsbeginn, dass die bGW- und sGW-Gruppe signifikant höhere Blattanzahlen als die FW-Gruppe vorzeigen konnte. Im restlichen Versuch wurden keine

wesentlichen Unterschiede mehr zwischen den Bewässerungsgruppen nachgewiesen. Ein Effekt der Bewässerungsart auf die Zunahme der Blätter konnte somit nicht bestätigt werden.

*G. macrorrhizum* stellte die einzige untersuchte Art dar, die eine wechselseitige Interaktion von Bewässerungsart und Datum bezüglich der Blattanzahl aufwies. Grundsätzlich unterschieden sich diejenigen Pflanzen, die mit FW und bGW bewässert wurden, nicht voneinander. Einzig die sGW-Bewässerung führte an allen Erhebungstagen zu den niedrigsten Blattanzahlen.

Signifikante Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen konnten bei *H. sanguinea* nur zu Versuchsbeginn beobachtet werden. Die Bewässerung mit bGW führte zu signifikant höheren Blattanzahlen als mit FW und sGW. An den folgenden Erhebungstagen zeigte sich kein Einfluss der Bewässerungsart auf die Anzahl der Blätter.

## 5.5 | Frischgewicht Spross und Wurzel

Folgende Werte beziehen sich auf das absolute Frischgewicht, das zu Versuchsende erhoben wurde.

### 5.5.1 | *Geranium macrorrhizum*

Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen im Hinblick auf das Frischgewicht des Sprosses ( $p=0,292$ ) (Abbildung 36) festgestellt werden, jedoch bestanden Unterschiede beim Frischgewicht der Wurzeln ( $p=0,0215$ ) (Abbildung 37 + Abbildung 36). Die sGW-Bewässerung führte beim Zuwachs der Wurzelmasse zu den

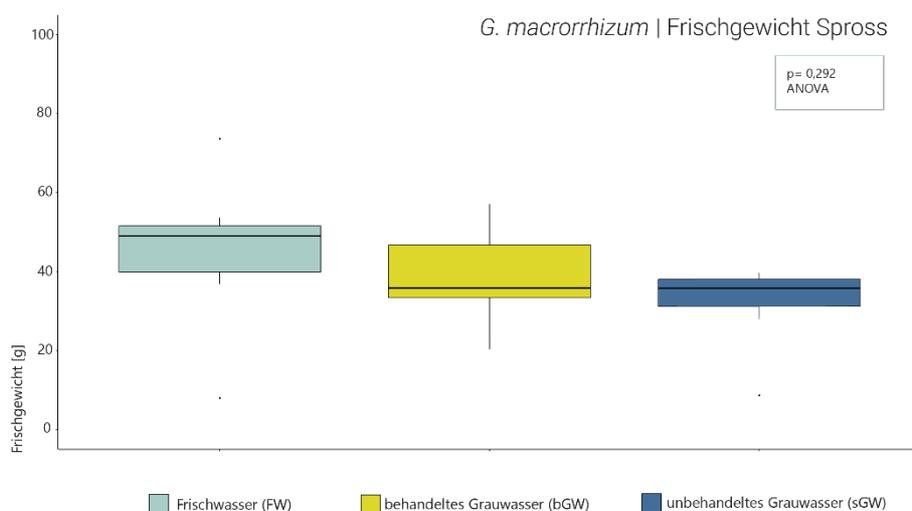


Abbildung 36. Boxplot: Messung des Frischgewichts des Sprosses bei *G. macrorrhizum* (eigene Abbildung)

geringsten Zunahmen (22,53 g) und wies signifikante Unterschiede zu der FW- (35,20 g) und bGW-Gruppe (37,53 g) auf.

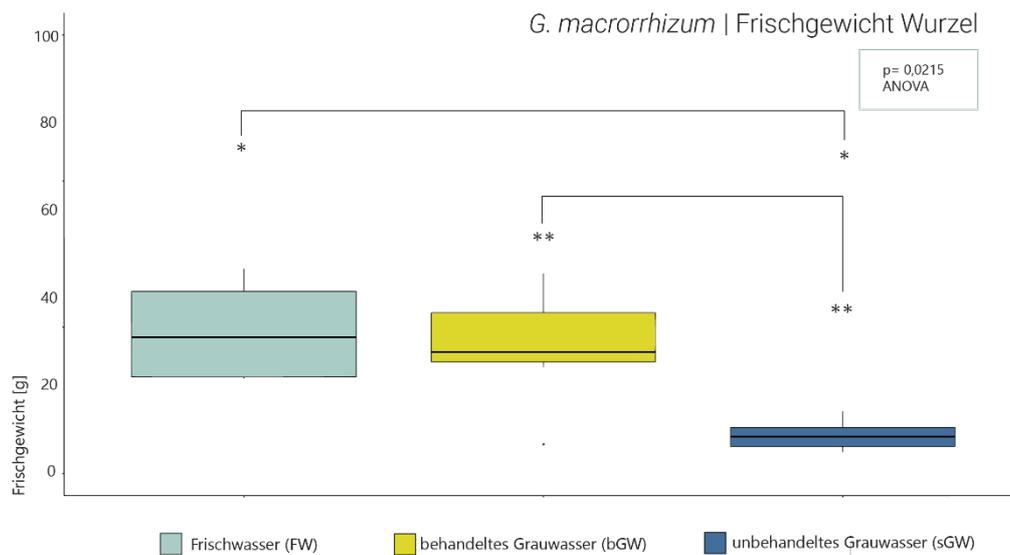


Abbildung 37. Boxplot: Messung des Frischgewichts der Wurzeln bei *G. macrorrhizum* (eigene Abbildung)

### 5.5.2 | *Hedera helix*

Die Art der Bewässerung führte bezüglich des Frischgewichts des Sprosses zu signifikanten Unterschieden zwischen den Gruppen ( $p=0,00336$ ) (Abbildung 38). Die Bewässerung mit bGW mit durchschnittlich 69,62 g Sprossfrischgewicht sowie sGW mit 67,98 g führte zu wesentlich geringeren Werten als jene Pflanzen in der FW-Gruppe mit 114,21 g. Im Hinblick auf das Frischgewicht der Wurzeln waren keine Unterschiede feststellbar ( $p=0,551$ ) (Abbildung 39).

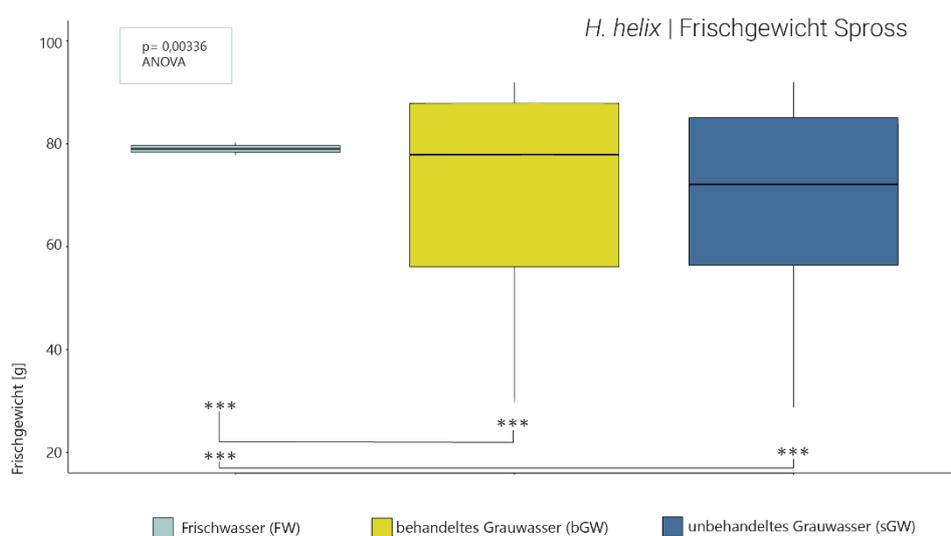


Abbildung 38. Boxplot: Messung des Frischgewichts des Sprosses bei *H. helix* (eigene Abbildung)

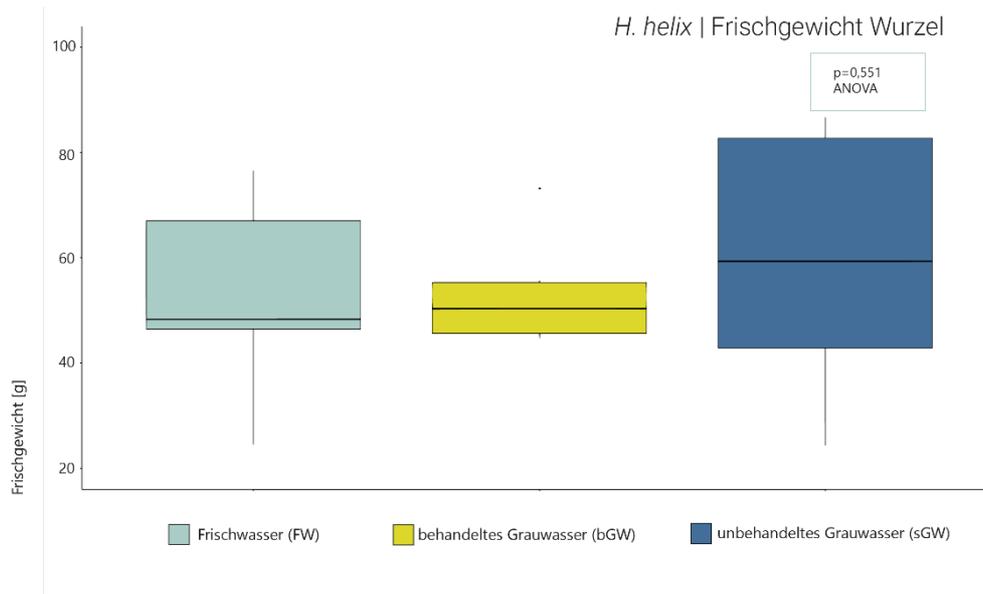


Abbildung 39. Boxplot: Messung des Frischgewichts der Wurzeln bei *H. helix* (eigene Abbildung)

### 5.5.3 | *Heuchera sanguinea*

In Bezug auf das Frischgewicht von Spross ( $p=0,0657$ ) und Wurzel ( $p=0,113$ ) wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen beobachtet (Abbildung 40+ Abbildung 41).

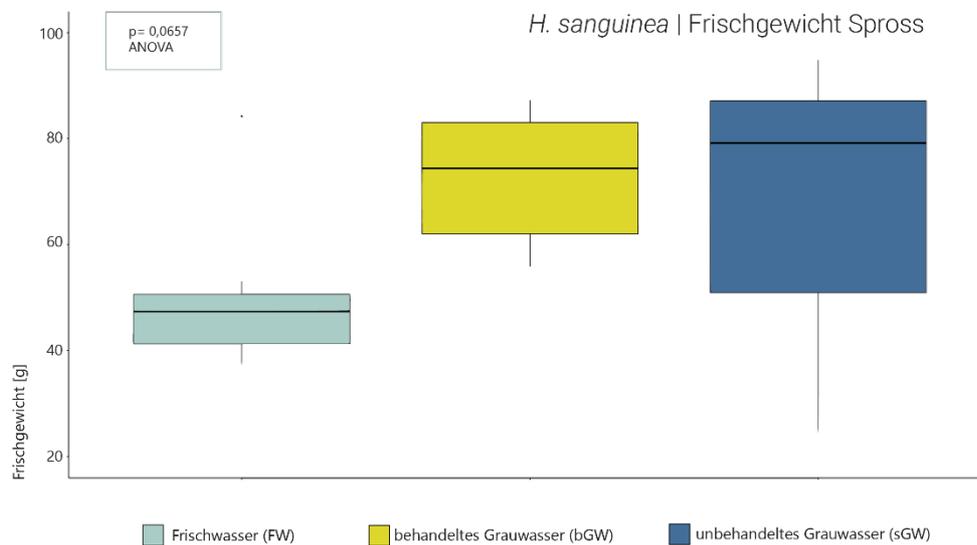


Abbildung 40. Boxplot: Messung des Frischgewichts des Sprosses bei *H. sanguinea* (eigene Abbildung)

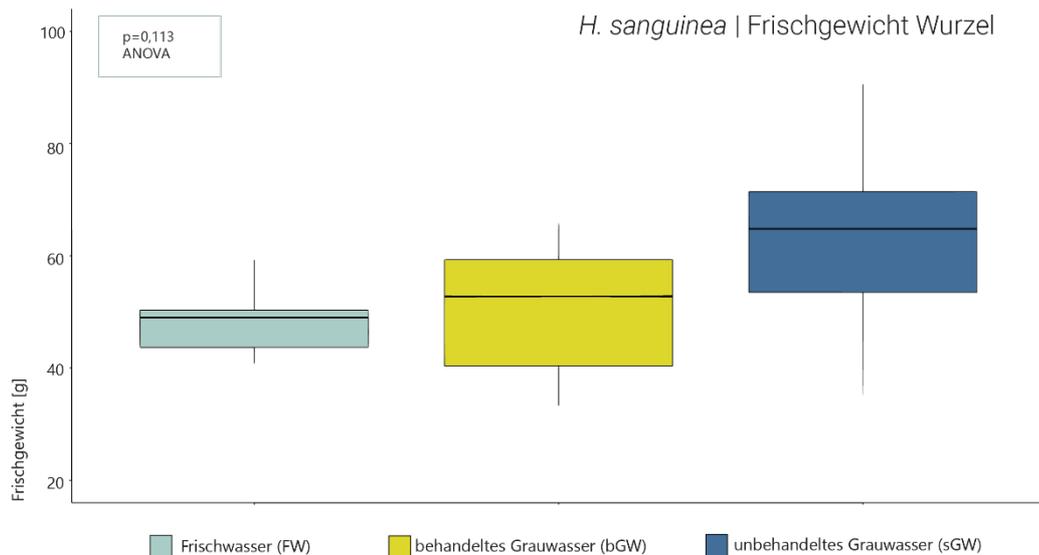


Abbildung 41. Boxplot: Messung des Frischgewichts der Wurzeln bei *H. sanguinea* (eigene Abbildung)

### 5.5.4 | Zusammenfassung Frischgewicht Spross und Wurzel

Die Ergebnisse zeigten, dass *G. macrorrhizum* zwar keine statistisch relevanten Unterschiede in allen Bewässerungsgruppen bezüglich des Frischgewichts des Sprosses aufwies, hingegen die Bewässerung mit sGW deutlich geringeres Wurzelfrischgewicht bewirkte.

Bei *H. helix* führte die Bewässerung mit bGW und sGW zu einem niedrigeren Frischgewicht des Sprosses im Vergleich zur FW-Gruppe. Bezüglich des Frischgewichts der Wurzel konnte kein Effekt der Bewässerungsart festgestellt werden.

Die Bewässerungsgruppen bei *H. sanguinea* zeigten sowohl bei Spross- als auch Wurzelfrischgewicht keine wesentlichen Unterschiede.

## 5.6 | Zuwachs Biomasse

Folgende Werte beschreiben den Zuwachs an Biomasse, der sich durch Spross- und Wurzelwachstum ergab. Die Ergebnisse beinhalten die Differenz des Spross- und Wurzelfrischgewichts zwischen Versuchsstart und -ende und beschreiben somit den Zuwachs in einer Vegetationsperiode.

## 5.6.1 | *Geranium macrorrhizum*

Bezüglich des Zuwachses an Sprossmasse konnte bei *G. macrorrhizum* kein Einfluss der Bewässerungsart beobachtet werden (Abbildung 42), es bestanden keine wesentlichen Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen ( $p=0,292$ ).

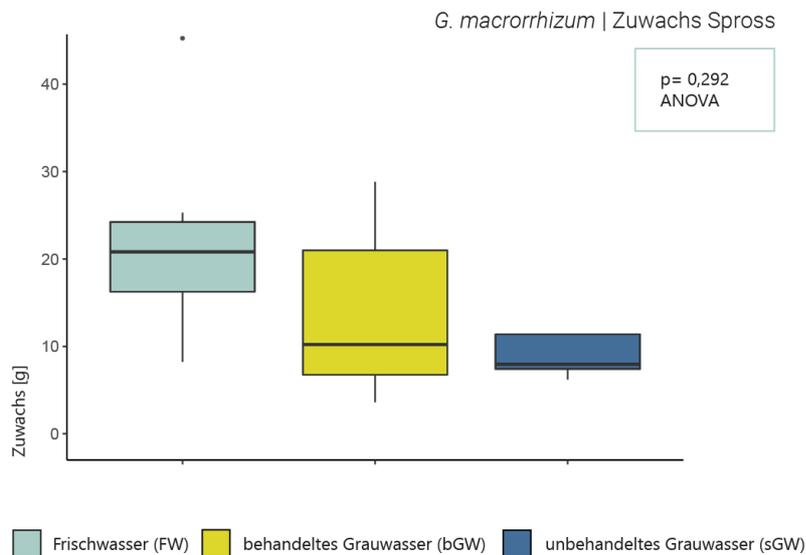


Abbildung 42. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Sprossmasse bei *G. macrorrhizum* (eigene Abbildung)

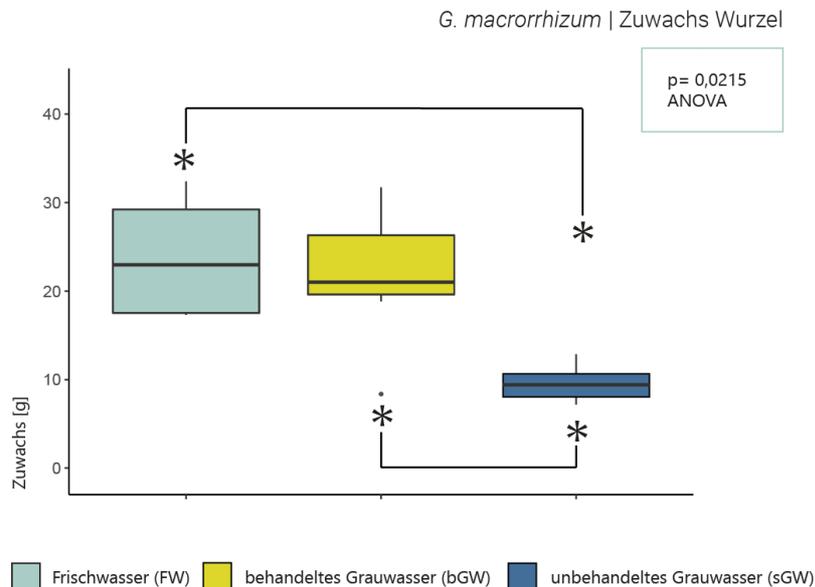


Abbildung 43. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Wurzelmasse bei *G. macrorrhizum* (eigene Abbildung)

Die Entwicklung der Wurzelmasse wurde durch die Art der Bewässerung beeinflusst ( $p=0,0215$ ) (Abbildung 43). Die sGW-Gruppe lag mit einem Zuwachs von 6,85 g signifikant

unterhalb des erhobenen Wurzelzuwachses von 19,52 g in der FW-Gruppe sowie 21,85 g in der bGW-Gruppe.

## 5.6.2 | *Hedera helix*

Ein Effekt der Bewässerung konnte bei *H. helix* nur beim Sprosszuwachs ermittelt werden ( $p=0,0033$ ). FW führte zu signifikant höheren Zuwächsen (89,62 g) an Sprossmasse als jene mit bGW (45,03 g) und sGW (43,39 g) (Abbildung 44).

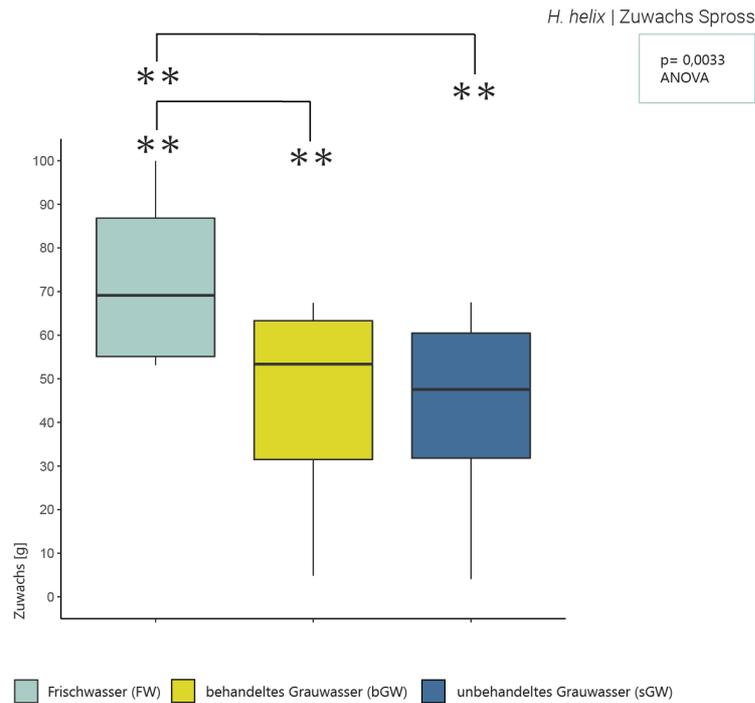


Abbildung 44. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Sprossmasse bei *H. helix* (eigene Abbildung)

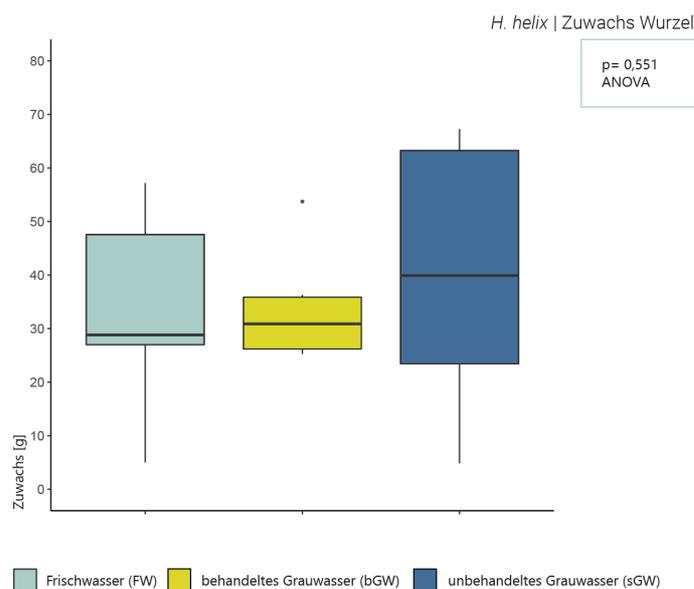


Abbildung 45. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Wurzelmasse bei *H. helix* (eigene Abbildung)

Bezüglich des Wurzelwachstum verhielten sich die Pflanzen aller Bewässerungsgruppen ähnlich ( $p=0,551$ ) (Abbildung 45).

### 5.6.3 | *Heuchera sanguinea*

Es konnte weder beim Spross- ( $p=0,065$ ) noch beim Wurzelzuwachs ( $p=0,113$ ) ein signifikanter Effekt der Bewässerung identifiziert werden, wie in Abbildung 46 + Abbildung 47 ersichtlich ist.

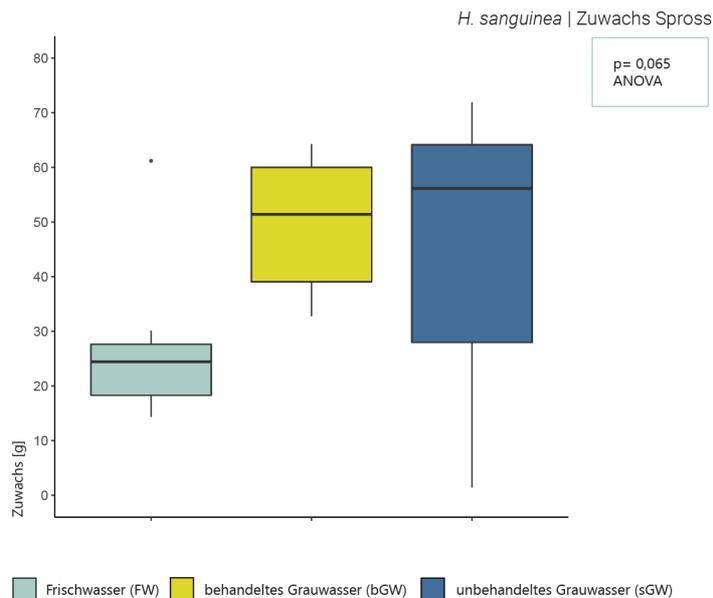


Abbildung 46. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Sprossmasse bei *H. sanguinea* (eigene Abbildung)

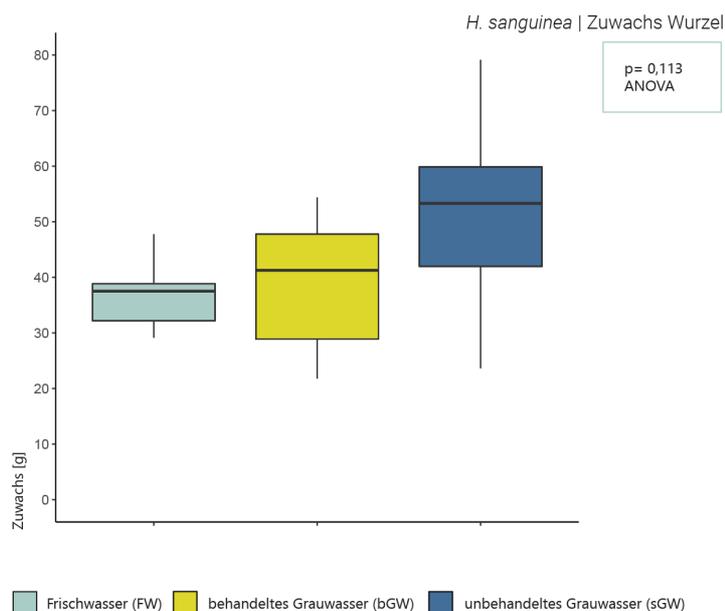


Abbildung 47. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Wurzelmasse bei *H. sanguinea* (eigene Abbildung)

## 5.6.4 | Zusammenfassung Zuwachs Frischgewicht

Der Zuwachs an Sprossmasse wurde bei *G. macrorrhizum* und *H. sanguinea* nicht durch die Art der Bewässerung beeinflusst und entwickelte sich in allen Gruppen gleich. Lediglich *H. helix* erzielte durch die Bewässerung mit FW signifikant höhere Sprosszuwächse.

Bei *H. helix* und *H. sanguinea* ging keine Wirkung der Bewässerungsart mit dem Wurzelwachstum einher. Alle Gruppen verzeichneten dieselben Zuwächse. Die Zunahme an Wurzelmasse bei *G. macrorrhizum* hingegen wurde durch die Bewässerung mit sGW stark reduziert. Die Gruppen FW und bGW zeigten keine Beeinflussung des Zuwachses.

## 5.7 | Zuwachs Terminaltrieb

### 5.7.1 | *Acer pseudoplatanus*

Ein Einfluss der Bewässerungsart auf den Zuwachs der Terminaltriebe konnte nicht nachgewiesen werden ( $p=0,712$ ), alle Individuen von *A. pseudoplatanus* aller Bewässerungsgruppen entwickelten sich ohne signifikante Unterschiede (Abbildung 48).

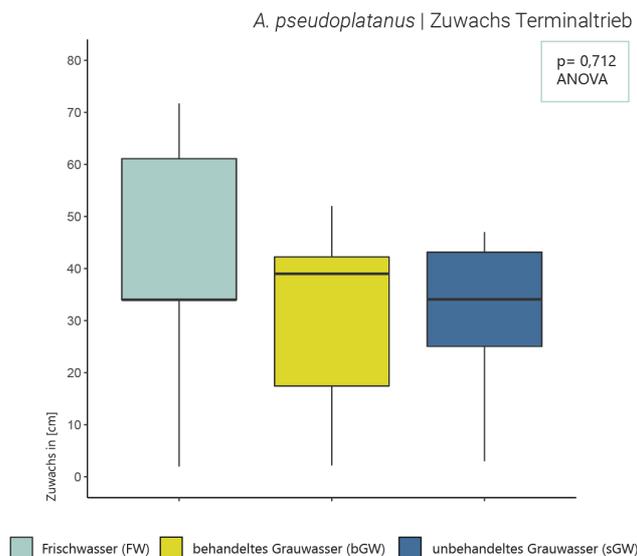


Abbildung 48. Boxplot: Zuwachs des Terminaltriebs zu Versuchsende bei *A. pseudoplatanus* (eigene Abbildung)

## 5.7.2 | *Tilia cordata*

Bezüglich des Zuwachses der Terminaltriebe bei *T. cordata* beeinflusste die Art der Bewässerung deren Entwicklung nicht signifikant ( $p=0,712$ ) (Abbildung 49).

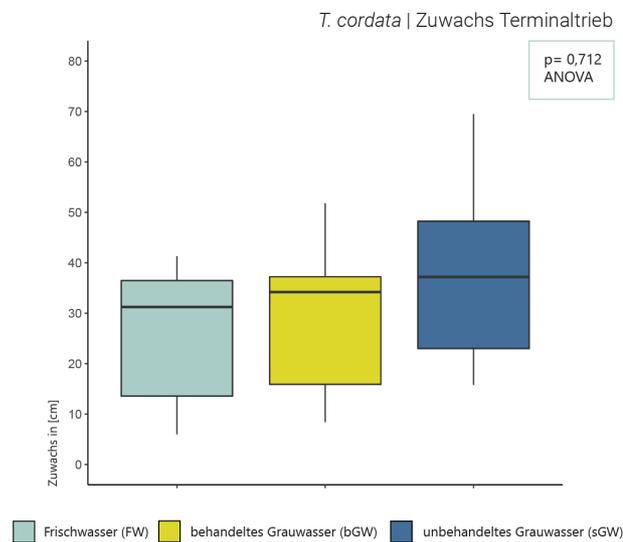


Abbildung 49. Boxplot: Zuwachs des Terminaltriebs zu Versuchsende bei *T. cordata* (eigene Abbildung)

## 5.7.3 | Zusammenfassung Zuwachs Terminaltrieb

Weder bei *Acer pseudoplatanus* noch bei *Tilia cordata* konnte ein Effekt der Bewässerungsart auf den Zuwachs der Terminaltriebe festgestellt werden.

## 5.8 | Bodenanalytik

### 5.8.1 | Nitrat

Die Auswertung der Bodenproben ergab, dass es, bezogen auf den Nitratgehalt, signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen gab ( $p=1,34 \cdot 10^{-4}$ ). Der Nitratwert des Ausgangssubstrats ( $154,82 \mu\text{g NO}_3\text{-N/g}$ ) war im Vergleich zu den Substratvarianten am Versuchsende signifikant reduziert (Abbildung 50). Zwischen den Bewässerungsgruppen gab es am Ende des Versuches keine signifikanten Unterschiede. Der Nitratgehalt lag bei  $1,32 \mu\text{g NO}_3\text{-N/g}$  in der FW-Gruppe,  $3,58 \mu\text{g NO}_3\text{-N/g}$  in der bGW-Gruppe sowie bei  $2,36 \mu\text{g NO}_3\text{-N/g}$  in der sGW-Gruppe. Dies bedeutet, dass der Nitratgehalt im Substrat über den Versuchszeitraum hinweg völlig aufgebraucht wurde.

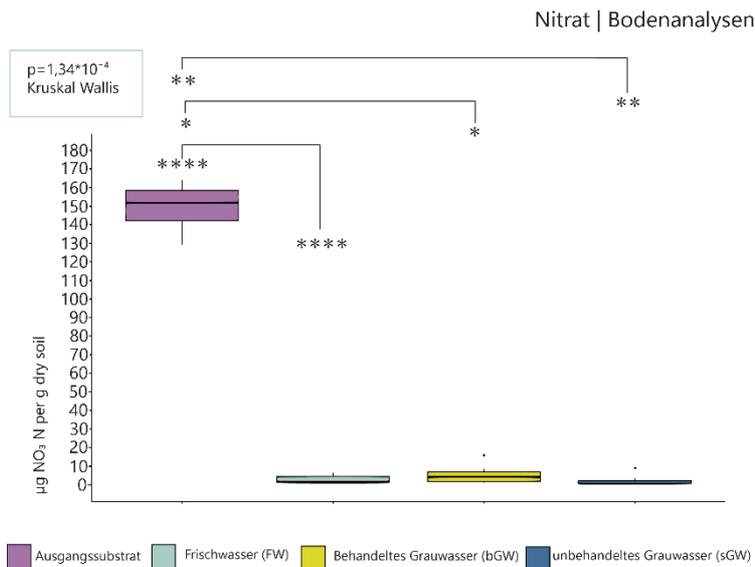


Abbildung 50. Boxplot: Analyse der Bodenproben auf Nitratgehalt (eigene Abbildung)

## 5.8.2 | Phosphat

Es wurden signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen bezüglich des Phosphatgehalts beobachtet ( $p=0,0051$ ). Lag der Phosphatgehalt im Ausgangssubstrat bei 62,27 µg anorganischer P/g, so stieg er durch die bGW-Bewässerung auf 107,2 µg anorganischer P/g sowie durch die Bewässerung mit sGW auf 106,86 µg anorganischer P/g an. Lediglich die Gruppe, die mit FW gegossen wurde, zeigte keinen signifikant veränderten Phosphatgehalt (Abbildung 51).

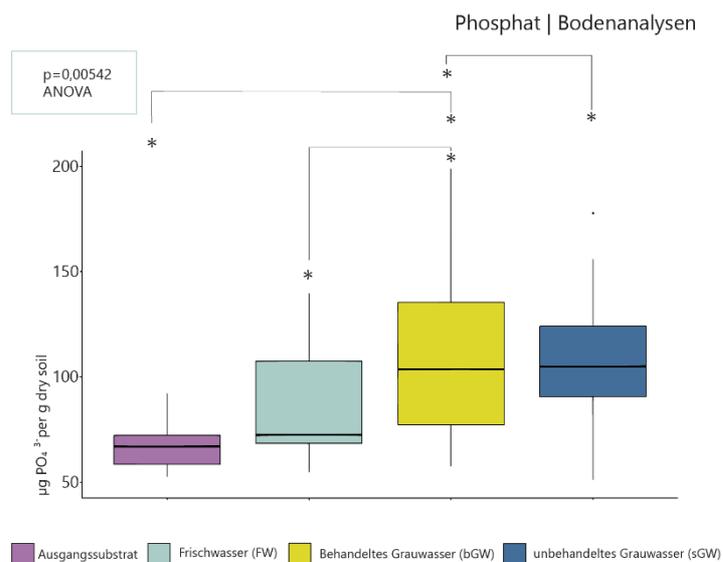


Abbildung 51. Boxplot: Analyse der Bodenproben auf Phosphatgehalt (eigene Abbildung)

### 5.8.3 | pH-Wert

Ein Einfluss der Bewässerungsart auf den pH-Wert des Substrats konnte festgestellt werden ( $p=0,00464$ ). Das bGW bewirkte verglichen mit dem Ausgangssubstrat (7,22) eine leichte, jedoch statistisch signifikante Erhöhung des pH-Wertes auf 7,47. FW und sGW zeigten mit einem pH-Wert von 7,25 bzw. 7,23 keine wesentlichen Unterschiede zum Ausgangssubstrat (Abbildung 52).

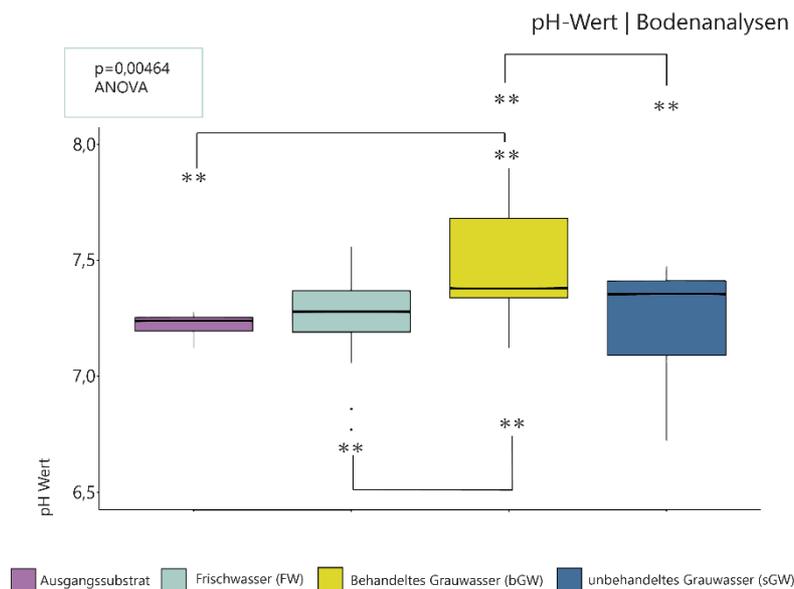


Abbildung 52. Boxplot: Analyse der Bodenproben auf pH-Wert (eigene Abbildung)

### 5.8.4 | Zusammenfassung Bodenproben

Die Nitratwerte aller Bewässerungsgruppen sind im Vergleich zum Ausgangssubstrat über den Versuchsverlauf hinweg stark gesunken. Jedoch hatte die Bewässerungsart selbst keinen Einfluss auf den Nitratwert.

Bei der Untersuchung der Phosphatwerte der Substrate war auffallend, dass das Ausgangssubstrat und die FW-Gruppe keine signifikanten Unterschiede aufwiesen. Jedoch wiesen die Bodenproben, die mit bGW und sGW in Berührung kamen, höhere Phosphatwerte auf.

Bezüglich des pH-Wertes kann gesagt werden, dass die bGW-Gruppe sich von allen anderen Gruppen signifikant unterschied und einen höheren pH-Wert aufwies.

### 6.1 | Eignung des Grauwassers zur Anwendung als Bewässerungswasser

Für die Bewertung der Eignung werden die Grenzwerte hinzugezogen, die laut ÖNORM EN 16941-2 bestehen (siehe Kapitel 2.3.2). Eine genaue Auflistung der Inhaltsstoffe ist im Kapitel 5.1 (Tabelle 15) einsehbar.

Aufgrund der chemischen Parameter ist sowohl das bGW im Zu- als auch im Ablauf laut ÖNORM EN 16941-2 in den Kategorien I bis IV für Grauwasserrecycling möglich. Dies bedeutet einerseits die Kategorie I Sprühanwendung (Hochdruckreinigung, Gartensprenger und Autowäsche), andererseits die Wiederverwendung für Kategorie II WC-Spülung, Kategorie III Gartenbewässerung und Kategorie IV Reinigung (Waschmaschine). Die Grenzwerte für den pH-Wert müssen hierbei zwischen 5 und 9,5 liegen. Dieser liegt im Zulauf bei 7,5 und erhöht sich durch die Behandlung des Grauwassers im Ablauf auf 8,5. Der gelöste Sauerstoff liegt mit 2,06 mg/l (Zulauf) und 3,72 mg/l (Ablauf) über dem geforderten Grenzwert von >1mg/l. Die Trübung im Ablauf liegt mit 289,9 NTU weit über dem Wert des Zulaufs (1,5 NTU) und überschreitet die in der ÖNORM vorgeschriebenen <10 NTU Trübung.

Die mikrobiologischen Voraussetzungen für die Eignung als Bewässerungswasser können nur von dem Grauwasser mit Vorbehandlung (Ablauf =bGW) erfüllt werden. Das Grauwasser im Zulauf darf für keine der vier Verwendungskategorien in Betracht gezogen werden. Für Sprühanwendungen dürfen *E. coli* und Enterokokken nicht nachgewiesen werden und sind mit 2590909 KBE/100 ml bzw. 109091 KBE/100 ml im Zulauf stark erhöht. Des Weiteren überschreitet dieser Wert auch die Grenze von 250 KBE/100 ml bei *E. coli* und 100 KBE/100 ml bei Enterokokken, um für die Anwendungen II-IV in Frage zu kommen. Legionellen konnten nicht nachgewiesen werden. Bei der Betrachtung der mikrobiologischen Analyse-Werte des Ablaufs (bGW) sinken die geforderten Parameter unterhalb der Grenzwerte. *E. coli* und Enterokokken sind mit 1,5 KBE/100 ml bzw. 0,5 KBE/100 ml in einem zulässigen Rahmen.

Der daraus folgende Schluss ist, dass sich das Grauwasser des Ablaufs (bGW) laut ÖNORM EN 16941-2 sowohl aus chemisch-physikalischer als auch mikrobiologischer Sicht für die Verwendung als Bewässerungswasser eignet. Hingegen ergab die Beprobung des Zulaufs, dass die Voraussetzungen an die chemischen Parameter gegeben sind, jedoch die mikrobiologischen Grenzwerte weit überschritten werden und somit eine Eignung für die Bewässerung nicht vorliegt. Dies zeigt deutlich, welche Leistung die Belebung des Grauwassers aufzeigt: Die Reinigung ist maßgeblich für die Wiederverwendung des

Grauwassers sowohl für die Bewässerung als auch für andere Anwendungsbereiche (WC, Wäsche etc.).

Im Vergleich zu den Grauwasser-Untersuchungen von Walker et Schenk (2016) ergeben sich ähnliche Analysewerte. Die Ergebnisse der Grauwässer ohne Waschmaschinen-Abwässer zeigen, dass die maßgeblichen Parameter für die Bewässerung (pH, Leitfähigkeit, B, Cl, Na, Fe, Mn, Zn, B, etc.) im Normbereich liegen und sich weitestgehend nur in geringem Maße von Frischwasser unterscheiden. Ausschlaggebend für die geringe Belastung des Wassers ist die Abwesenheit von Maschinen- und Küchenabwässern, welche eine weit höhere Belastung an Hygiene- und Waschartikeln aufweisen (Walker et Schenk 2016). Tabelle 17 stellt eine Gegenüberstellung zentraler Parameter beider Versuche dar.

*Tabelle 17. Vergleich der Analysewerte aus Wiener Neustadt mit Ergebnissen von Walker et Schenk (2016) ,<sup>1</sup>Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz BOKU, <sup>2</sup> Walker et Schenk 2016 (eigene Bearbeitung)*

PARAMETER	ZULAUF Wr.N. <sup>1</sup>	WALKER ET AL. 2016 <sup>2</sup>
NH4-N [mg/l]	3,2	0,4
Leitfähigkeit [µS/cm]	987,4	662,0
pH-Wert	8,5	7,7
P gesamt [mg/l]	1,4	0,7
Tenside anionisch [mg/l]	0,3	0,2
Tenside kationisch [mg/l]	0,2	0,1
Tenside nichtionisch [mg/l]	1,3	0,8
Calcium [mg/l]	34,4	77,0
Kalium [mg/l]	7,4	5,8
Magnesium [mg/l]	14,2	10,9
Nitrat gelöst [mg/l]	14,4	7,1

Die Ergebnisse aus Wiener Neustadt liegen bei fast allen Werten außer Calcium über jenen aus der Studie von Walker et Schenk (2016). Besonders Ammonium-Stickstoff, Leitfähigkeit, Phosphor und Nitrat sind vergleichsweise stark erhöht.

Al-Jayyousi 2003 untersuchte in seiner Studie in Jordanien unterschiedliche Grauwasserfilterungssysteme und bezogen sich vorwiegend auf pH-Wert, biochemischen (BSB<sub>5</sub>) und chemischen Sauerstoffbedarf (CSB). Verglichen mit den Ergebnissen aus Wiener Neustadt ist festzustellen, dass die jordanischen Untersuchungen weit geringere pH-Werte (unbehandeltes Grauwasser pH= 6 | behandeltes Grauwasser pH= 6-8) aufweisen.

Zudem liegt deren BSB<sub>5</sub> bei 392mg/l O<sub>2</sub>, im Gegensatz dazu ergaben die Auswertungen aus Wiener Neustadt 3,0 mg/l O<sub>2</sub> (Al-Jayyousi 2003).

Die Behandlung von Grauwasser vor dem Einsatz zu Bewässerungszwecken wurde zudem in zahlreichen Studien untersucht und empfohlen (Walker et Schenk 2016; Travis et al. 2010; Pradhan et al. 2019; Al-Mashaqbeh et al. 2012; Boano et al. 2020; Boyjoo et al. 2013; Eregno et al. 2017). Die Werte im unbehandelten Grauwasser können durch die Reinigung stabilisiert werden und erfüllen in den meisten Fällen erst dann die internationalen sowie nationalen Mindestanforderungen an Bewässerungswasser. Um eine flächendeckende Wiedernutzung von Grauwasser zu etablieren, sollten die Reglements für Bewässerungsstandards in Österreich Evaluierungen unterworfen werden, um die Notwendigkeit einzelner Grenzwerte zu untersuchen sowie eine nachhaltige und umweltverträgliche Anpassung der Standards zu entwickeln.

## 6.2 | Auswirkungen der Bewässerung mit Grauwasser auf relativen Chlorophyllgehalt, Transpiration und Pflanzenwachstum

### 6.2.1 | Relativer Chlorophyllgehalt und Blattvitalität

Da der Chlorophyllgehalt mit dem Vorkommen grüner und vitaler Blätter eng verknüpft ist, werden in diesem Unterkapitel Chlorophyllgehalt und Blattvitalität miteinander diskutiert.

Die Chlorophyllkonzentration pro Blattfläche ist in der Regel bei sogenannten Schattenblättern höher als bei jenen Blättern, die der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind. Das heißt, je grüner ein Blatt ist, desto höher der Anteil an Chlorophyll (Kadereit et al. 2014). Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Chlorophyllbildung ist die Verfügbarkeit von Stickstoff. Dieses Makroelement wird großteils in Form von Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) über die Wurzeln aus dem Boden aufgenommen und stellt einen wesentlichen Bestandteil der Chlorophyllbildung dar (Kadereit et al 2014). Da im Versuch keine Düngerzugaben erfolgten, sank der Nitratwert über die Vegetationsperiode auf einen Minimalwert, wie in Kapitel 6.2.4. eingehender diskutiert wird. Diese Absenkung des Nitratwertes könnte bei den Arten eine zusätzliche Hemmung der Chlorophyllbildung dargestellt haben.

Der relative Chlorophyllgehalt aller untersuchten Arten wurde durch die Bewässerung mit Grauwasser (bGW und sGW) nicht negativ beeinflusst, sondern bei einzelnen Arten sogar gesteigert. *T. cordata* und *H. helix* zeigten im Laufe des Versuches eine Erhöhung des

Chlorophyllgehaltes, beide Grauwassergruppen (bGW und sGW) konnten an den einzelnen Versuchstagen höhere Chlorophyllgehalte aufweisen als die Frischwassergruppe (FW). Diese zwei Arten wiesen während des Versuchs tiefgrüne und vitale Blätter auf: Bei *T. cordata* und *H. helix* lag der vitale grüne Blattanteil, gemessen an der Gesamtblattanzahl, bei 81% bzw. 94%.<sup>6</sup> Inwiefern *H. helix* durch sein immergrünes Laub und den in der Vegetationsperiode zunehmenden Chlorophyllgehalt einen Vorteil gegenüber anderen Pflanzenarten in Vertikalbegrünungen aufweist, eröffnet ein spannendes, neues Forschungsfeld.

Wird die Blattvitalität von *H. sanguinea* und *G. macrorrhizum* betrachtet, entwickelten diese Arten unabhängig von der Bewässerungsgruppe bereits ab Juni rötliche Verfärbungen der Blätter (Abbildung 53). Dies resultiert bei *H. sanguinea* und *G. macrorrhizum* in einem 78%igen bzw. 70,1%igen vitalen Blattanteil. Alle Bewässerungsgruppen dieser Arten wiesen einen über die Erhebungstage hinweg sinkenden Chlorophyllgehalt auf, was mit der zunehmenden Hitze und Strahlungsintensität im Gewächshaus zusammenhängen kann. *G. macrorrhizum* kann zwar an sonnigen Standorten eine vitale Entwicklung durchlaufen, bevorzugt aber die Lebensbereiche Gehölz und Gehölzrand, welche einen halbschattigen bis schattigen Standort garantieren (Pruns 2015). Des Weiteren bevorzugt diese Art (speziell die Sorte 'Leuchtkäfer') einen trockenen bis frischen Boden (Pruns 2015; Baumschule Horstmann 2020). Da die Bewässerungsmenge eine permanente Sättigung des Substrats bedingte, kann somit die damit entstandene Staunässe neben der hohen Temperatur, der



**Abbildung 53.** Bild links: rötliche Verfärbungen bei *G. macrorrhizum* im Juli, Bild rechts: grünes, vitales Blatt von *G. macrorrhizum* zu Versuchsbeginn (eigene Aufnahmen 2020)

---

<sup>6</sup> Der Anteil bei *T. cordata* ist insofern niedrig, da die Blätter zwar grün und vital bei der Messung waren, jedoch von Fraß durch Insekten im Mai und Juni betroffen waren und dies dementsprechend in die Zählung der vitalen Blätter miteinbezogen wurde.

starken Sonnenstrahlung und dem Stickstoffmangel ein weiterer Grund für die Rotfärbung der Blätter sein.

*H. sanguinea* bevorzugt hingegen frische, nährstoffreiche Böden und gedeiht am besten in sonnigen bis absonnigen Standorten. Hierbei könnten wiederum die gering verfügbaren Mengen an Stickstoff für einen Rückgang des Chlorophylls gesorgt haben (Pruns 2015; Baumschule Horstmann 2020).

*A. pseudoplatanus* konnte an den ersten zwei Erhebungstagen zunächst einen Anstieg des Chlorophyllgehalts in allen Bewässerungsgruppen vorweisen, jedoch ergaben die späteren Messungen einen stetigen Abfall der Werte. Wiederum könnte dies ein Zusammenspiel von starker Sonneneinstrahlung und Stickstoffmangel bedeuten. Zusätzlich wurden die FW- und bGW-Gruppen im Mai und Juni von Echtem Mehltau (*Uncinula tulasne*) befallen (Abbildung 54). Die Schädlingsbekämpfung erfolgte mit einem Milch-Wasser-Spülmittel-Gemisch<sup>7</sup> für zwei Wochen (28.05.-12.06.2020). Mehltau kann unter Umständen zu Trockenstress führen und Einfluss auf die Assimilationsleistungen ausüben (Kral et al. 1993). Zusätzlich zu dem Schädlingsbefall entwickelten Ende Juni viele Blätter der Individuen, die mit bGW und sGW bewässert wurden, Blattrandnekrosen. Dies bewirkte im Vergleich mit den anderen Arten den niedrigsten Anteil an vitalen Blättern (53%). Blattrandnekrosen können im Zusammenhang mit Salz und Trockenheit stehen (Dujesiefken et al. 2018). Das bGW mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 847,4µS/cm sowie das sGW mit 1005 µS/cm weisen Salzgehalte



Abbildung 54. Bild links: Blattrandnekrose bei *A. pseudoplatanus*; Bild rechts: Mehltaubefall bei *A. pseudoplatanus* (eigene Aufnahmen 2020)

auf, die nur für Pflanzen geeignet sind, die eine hohe Salzverträglichkeit aufweisen. *A. pseudoplatanus* gilt jedoch als salzempfindlich. Eine hohe Salzbelastung im Boden bedingt eine Blockierung der Wasseraufnahme der Pflanze, was durch eine Erhöhung des osmotischen Drucks ausgelöst wird. Der entstehende Trockenstress begünstigt wiederum

---

<sup>7</sup> 125 ml Milch, 1 l abgekochtes Wasser, 1 Teelöffel Spülmittel (Marke Frosch)

die Bildung von nekrotischem Blattgewebe. Die Kontrolle über das Schließen der Stomata ist gehemmt, was zu weiterem Wasserverlust durch Transpiration und einer vermehrten Wasseraufnahme durch die Wurzeln führt. Zusätzliches Salz im Boden wird in die Pflanze aufgenommen und fördert die Bildung weiterer Blattnekrosen (Schönenbuch 2007).

## 6.2.2 | Stomatäre Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit zeigte art- und bewässerungsabhängige Unterschiede, wie bereits im Kapitel 5.3.6 beschrieben wurde. Es konnte während des Versuches kein eindeutig negativer Effekt der bGW- und sGW- Bewässerung festgestellt werden, jedoch reagierten *T. cordata*, *G. macrorrhizum* und *H. sanguinea* gegen Versuchsende hin mit einer verminderten stomatären Leitfähigkeit auf die Bewässerung mit bGW. Die sGW- Gruppe verhielt sich jedoch bei allen untersuchten Arten wie FW. Bei *A. pseudoplatanus* konnte sogar ein positiver Effekt auf die stomatäre Leitfähigkeit durch die Nutzung von bGW und sGW festgestellt werden.

Die stomatäre Leitfähigkeit kann tageszeitlich starken Schwankungen unterworfen sein. Dies hängt mit der Öffnung der Stomata zusammen, die durch Feuchtigkeit, Strahlung und Temperatur beeinflusst werden. Bei gleichbleibenden Faktoren ist die stomatäre Leitfähigkeit am Vormittag bei holzigen und krautigen Pflanzen am stärksten und nimmt zum Nachmittag hin ab (Kadereit et al. 2014). Die Messungen wurden bewusst an sonnigen und wolkenlosen Tagen durchgeführt. Die zeitintensive Messung dauerte in der Regel 6-7 Stunden, d.h. dass *H. sanguinea*, *G. macrorrhizum* und *H. helix* in der bGW- Gruppe meist zu einem Zeitpunkt gemessen wurden, zu dem die Strahlungsintensität und Temperatur nicht mehr so hoch waren. Dies kann sich negativ auf die Werte ausgewirkt haben und muss in zukünftigen Versuchen mitberücksichtigt werden.

Es ist zu betonen, dass die stomatäre Leitfähigkeit keine direkten Aussagen über Photosynthese- und Transpirationsraten tätigt, sondern Aufschluss über die Öffnung der Stomata gibt. Diese Information kann jedoch Rückschlüsse auf Photosynthese und Transpiration liefern. Je größer die Stomata geöffnet sind, desto mehr Transpiration kann bei bestehender Wasserverfügbarkeit stattfinden. Walker et Schenk (2016) untersuchten Evapotranspirationsraten von Dachbegrünungen, die mit Grauwasser bewässert wurden. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass im Vergleich zur Frischwassergruppe der Wasserverbrauch<sup>8</sup> der Grauwassergruppen nur bei einem Fünftel der untersuchten Arten negative Werte

---

<sup>8</sup> Der Wasserverbrauch wurde als Parameter für die Evapotranspiration verwendet (Walker et Schenk 2016).

aufwies. Der Großteil der Arten tolerieren die Grauwasserbewässerung (Walker et Schenk 2016). Signifikante Unterschiede bei Photosyntheseraten zwischen Grauwasser- und Frischwasserbewässerung konnten auch in der Untersuchung von Lubbe et al. (2016) nicht festgestellt werden. Die stomatäre Leitfähigkeit wurde durch die Art der Bewässerung nicht wesentlich beeinflusst. Eine der untersuchten Arten (*Amaranthus dubius*), die mit gechlortem Grauwasser gegossen wurde, konnte sogar eine höhere stomatäre Leitfähigkeit aufweisen als diejenigen, die mit gechlortem Trinkwasser behandelt wurden. Transpirationsraten waren zudem bei *Amaranthus dubius* und *Solanum nigrum* bei der Grauwasserbewässerung höher als bei Frischwasser (Lubbe et al. 2016).

### 6.2.3 | Zuwachs

Die Ergebnisse hinsichtlich des Zuwachses zeigen artabhängige Unterschiede. Bezüglich der Zunahme an Blattmasse (Blattanzahl) bewirkte die Bewässerung mit bGW- und sGW keinen negativen Einfluss, es kam in allen Gruppen zu einer Zunahme während der Vegetationsperiode. Lediglich *G. macrorrhizum* zeigte in der sGW-Gruppe weniger Zuwachs als jene Testpflanzen dieser Art in der FW-Gruppe. *G. macrorrhizum* und *H. sanguinea* litten aufgrund der Hitze im Gewächshaus (Kapitel 6.2.1) und wiesen eine Stagnation der Blattzunahme zu Versuchsende hin auf (Abbildung 35, S.73). Dies passierte jedoch unabhängig der Bewässerungsart. Im Hinblick auf das Wachstum der Terminaltriebe hatte keine der Grauwasserarten einen limitierenden Einfluss auf *A. pseudoplatanus* und *T. cordata*. Das unbehandelte Grauwasser (sGW) verursachte bei *G. macrorrhizum* und *H. helix* einen verminderten Zuwachs an Biomasse (Zuwachs Frischgewicht von Spross und Wurzeln), bGW hatte hingegen nur negativen Einfluss auf den Wurzelzuwachs von *G. macrorrhizum*.

Anzumerken ist, dass es im gesamten Versuch nur einen Totalausfall (*G. macrorrhizum* in der FW-Gruppe) gab und alle Arten in allen Bewässerungsgruppen Zuwachs erlangt haben. Somit hemmt die Grauwasserbewässerung den Zuwachs nicht, jedoch kann es bei einzelnen Arten zu einer verlangsamten Entwicklung kommen. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen bereits Alfiya et al. (2012) in ihrem Versuch mit *Beta vulgaris*. In deren Studie kam sowohl behandeltes als auch unbehandeltes Grauwasser zum Einsatz. Es wurden keine signifikanten Einflüsse der unbehandelten Grauwasserbewässerung auf das Pflanzenwachstum festgestellt, im Gegenteil verzeichneten die Pflanzen die höchsten Zuwächse, die mit behandeltem Grauwasser bewässert wurden. In allen Gruppen konnte ein Zuwachs vermerkt werden (Alfiya et al. 2012). Pinto et al. (2009) untersuchten neben Frisch- und behandeltem Grauwasser, alternierende Bewässerungsmuster (abwechselnd Frisch-

und Grauwasser) und 1:1 Mischverhältnisse von Frisch- und Grauwasser. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen bezüglich des Trockengewichts von Spross und Wurzel festgestellt werden. Einzig ein Trend zu einer leichten Zuwachsminderung bei der Grauwassergruppe wurde sichtbar (Pinto et al. 2009). Weitere Studien zeigten ähnliche Ergebnisse (Travis et al. 2010; Walker et Schenk 2016) und sind mit den vorliegenden Ergebnissen des Pflanzenversuches vergleichbar.

Den Rückgang der Zuwachsraten führen Lubbe et al. (2016) auf die Veränderungen im Boden (pH Wert, elektrische Leitfähigkeit) zurück, die durch die Bewässerung mit Grauwasser entstehen können, was eingehender im Kapitel 6.2.4 diskutiert wird.

#### 6.2.4 | Bodenanalytik

Die Ergebnisse der Nitratanalyse zeigten keine negativen Auswirkungen der Grauwasserbewässerung (bGW und sGW) auf das Bodensubstrat. Allgemein wurde in allen Bewässerungsgruppen das bereits im Ausgangssubstrat vorhandene Nitrat fast gänzlich ausgewaschen bzw. von den Pflanzen aufgebraucht. Interessanterweise verhielt sich der Phosphatgehalt in der Untersuchung unterschiedlich. Hier kam es besonders in der bGW- und sGW-Gruppe zu Akkumulationen. Hingegen konnten in der FW-Gruppe ähnliche Phosphatgehalte wie im Ausgangssubstrat festgestellt werden. Es wurde über den gesamten Versuchsverlauf hinweg bewusst kein Dünger eingesetzt, um zu sehen, wie sich die Bewässerung mit bGW und sGW in Bezug auf den Nitrat- und Phosphatgehalt verhält. Da Nitrat ein für das Pflanzenwachstum lebensnotwendiger Nährstoff ist, können durch den geringen Nitratwert Mangelerscheinungen und Hemmungen des Pflanzenwachstums entstehen. Zudem wird es für die Osmoseregulation und die Ionenbilanz benötigt (Kadereit et al. 2014).

Die Bewässerung mit bGW hatte in diesem Versuch gezeigt, dass es zu einer leichten Erhöhung des Boden pH-Wertes von 7,2 (Ausgangssubstrat) auf 7,5 kam. Dies liegt jedoch nach wie vor in einem für Pflanzen verträglichen Bereich und kann von einer Großzahl an Pflanzen gut toleriert werden. Die Erhöhung kann auf das Vorhandensein von basischen Tensiden im Grauwasser zurückgeführt werden. Ähnliche Ergebnisse wurden in den Studien von Al-Jayyousi (2003), Lubbe et al. (2016), Pinto et al. (2009) sowie Walker et Schenk (2016) erzielt. Eine leichte Erhöhung des Boden-pH-Wertes konnte in allen Studien erkannt werden. Untersuchungen von Hasanuzzaman et al. (2013) kamen zu der Erkenntnis, dass die durch Grauwasserbewässerung mögliche Erhöhung des pH-Wertes zu einem Defizit im Mikro- und Makronährstoffbereich führen kann. Die Nährstoffverfügbarkeit im Boden und die Aufnahmefähigkeit der Pflanzen können dadurch gehemmt werden. In ihrer Studie lag der

pH-Wert des verwendeten Grauwassers bei 9,9, was im Vergleich zu dem Wert aus dem vorliegenden Versuch mit 8,5 (bGW im Ablauf) weit drastischere Auswirkungen auf das Bodengefüge und des Weiteren auf die Pflanzenvitalität ausübt.

Walker et Schenk (2016) beschrieb zudem, dass es durch den zusätzlichen Natrium-Eintrag zu einem Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit und folglich des Salzgehaltes in den Böden kam. Erhöhte Salzwerte können neben einem gestörten pflanzlichen Wasserhaushalt (siehe Kapitel 6.2.1) zu Bodenveränderungen führen und die Nährstoffverfügbarkeit und -aufnahme beeinträchtigen (ähnlich wie ein erhöhter pH-Wert) (Lubbe et al. 2016). Die elektrische Leitfähigkeit des Bodens wurde zwar in diesem Versuch nicht evaluiert, wird aber die elektrische Leitfähigkeit des Versuchsgrauwassers aus Weihenstephan mit dem hier vorliegenden bGW verglichen, so ergeben sich mit 919  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Walker et Schenk 2016) und 987,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Wiener Neustadt) ähnliche Werte. Infolgedessen ist davon auszugehen, dass das hier untersuchte Bodensubstrat einen erhöhten Salzwert aufwies und dies z.B. bei *A. pseudoplatanus* zu den Blattrandnekrosen geführt hat. Diesen Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit haben zudem Pinto et al. (2009) in ihrem Versuch mit Mangold beobachtet.

Lubbe et al. (2016) empfehlen in zukünftigen Studien parallel zur Grauwasserbewässerung die Nährstoffaufnahme der Pflanzen, das osmotische Potenzial der Blätter und das Bodenwasser zu beobachten, um detailliert herauszufinden, welchen Einfluss das Grauwasser über den Boden auf die Pflanzen hat. Alternierende Bewässerung mit Frisch-/Regenwasser würde der Versalzung zusätzlich entgegenwirken.

### 6.3 | Beurteilung der geeigneten Pflanzen für Grauwasserbewässerung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich der Großteil der untersuchten Arten für eine Bewässerung mit Grauwasser (behandelt und unbehandelt) eignet. Lediglich für *G. macrorrhizum* in der sGW-Gruppe und *H. helix* in der bGW-Gruppe wird von einer Bewässerung mit Grauwasser abgeraten, da die Effekte auf stomatäre Leitfähigkeit und Biomasse-Zuwachs eindeutig negativ sind. Es muss bedacht werden, dass pflanzenunterstützende Maßnahmen wie alternierende Bewässerung mit Frisch- (oder Regen) -wasser, standortgerechte Pflanzung und Düngerzugabe die Werte wesentlich verbessern können. Eine bedingte Eignung oder Ablehnung der Eignung könnten somit ausgeglichen werden.

Tabelle 18. Matrix zur Beurteilung der Eignung der untersuchten Arten für die Bewässerung mit behandeltem (bGW) und unbehandeltem (sGW) Grauwasser im Vergleich zu Frischwasser (FW) (eigene Bearbeitung)

Untersuchte Pflanzenarten	Grüne Infrastruktur	Stomatäre Leitfähigkeit	Chlorophyll-Gehalt	Zuwachs Terminaltrieb	Zuwachs Biomasse	Blattanzahl	Punktzahl	Eignung	
		bGW   sGW	bGW   sGW	bGW   sGW	bGW   sGW	bGW   sGW	bGW   sGW	bGW   sGW	
<i>A. pseudoplatanus</i>	Straßenbaum	0   0	0   0	0   0	nicht erhoben	0   0	0   0	✓	✓
<i>T. cordata</i>	Straßenbaum	-   0	0   +	0   0	nicht erhoben	0   0	-1   +1	○	✓
<i>G. macrorrhizum</i>	Vertikalbegrünung	-   0	0   0	nicht erhoben	+   -	0   -	0   -2	✓	—
<i>H. helix</i>	Vertikalbegrünung	-   0	0   +	nicht erhoben	-   -	0   0	-2   0	—	✓
<i>H. sanguinea</i>	Vertikalbegrünung	-   0	0   0	nicht erhoben	0   0	0   0	-1   0	○	✓

Punktevergabe pro Pflanzenart und Parameter

- Wenn FW bessere Ergebnisse erzielt als bGW/sGW -1 Punkt
- 0 Wenn FW gleiche Ergebnisse wie bGW/sGW erzielt 0 Punkte
- + Wenn bGW/sGW bessere Ergebnisse als FW erzielt +1 Punkt

Beurteilungsschema für Eignung

- < -1 — nicht geeignet (negativer Einfluss)
- 1 - 0 ○ bedingt geeignet (kaum Einfluss)
- 0 ✓ geeignet (kein Einfluss)
- >0 ✓ geeignet (positiver Einfluss)

## 6.4 | Forschungsfragen und -antworten

Abschließend werden die der Arbeit zugrundeliegenden Forschungsfragen beantwortet.

**F1:** Welche chemischen und mikrobiologischen Inhaltsstoffe sind im Grauwasser (bGW) vorzufinden und entsprechen diese den Mindestanforderungen an Bewässerungswasser?

**H1:** Die chemischen Inhaltsstoffe der Grauwasserproben (bGW) entsprechen den Mindestanforderungen an Bewässerungswasser.

H1 kann angenommen werden. Das untersuchte Grauwasser (bGW) wies eine Trübung von 1,49 NTU auf. Des Weiteren lag die elektrische Leitfähigkeit bei 987,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bzw. der BSB<sub>5</sub> und CSB waren jeweils bei 3 mg/l O<sub>2</sub> bzw. 21 mg/l O<sub>2</sub>. Der gelöste Sauerstoff wurde bei 3,72 mg/l im bGW gemessen. Der pH-Wert lag bei 8,52.

Bezüglich der Makronährstoffe konnte ein Phosphorgehalt im bGW von 1,4 mg/l und ein Nitratwert von 14,39 mg/l gemessen werden.

Aus mikrobiologischer Sicht sind alle untersuchten Parameter kaum nachweisbar: *E. coli* lag bei 1,5 KBE/100 ml im bGW bzw. Enterokokken auf 0,5 KBE/100 ml. *Legionella pneumophila* konnte im Ablauf nachgewiesen werden.

Die chemischen und mikrobiologischen Inhaltsstoffe der Grauwasserproben (bGW) entsprechen den österreichischen (und europäischen) Mindestanforderungen an Bewässerungswasser. Alle Werte liegen im Normbereich (ÖNORM EN 16941-2).

**F2:** Welche Auswirkungen hat Grauwasser (bGW+sGW) auf den relativen Chlorophyllgehalt, stomatäre Leitfähigkeit und das Wachstum der untersuchten Pflanzen?

**H2:** Die Bewässerung mit Grauwasser (bGW+sGW) zeigt keine negativen Einflüsse hinsichtlich des relativen Chlorophyllgehalts, der stomatären Leitfähigkeit und des Zuwachses der untersuchten Pflanzen.

H2 kann zu Teilen angenommen werden. Die Bewässerung mit Grauwasser (bGW und sGW) hatte keine negativen Einflüsse auf den relativen Chlorophyllgehalt. Zudem hatte bGW und sGW bei dem Großteil der untersuchten Pflanzen keine hemmende Wirkung auf den Zuwachs der Terminaltriebe, die Blattanzahl und Biomasse. Artabhängig bestehen jedoch feine Unterschiede. Negative Auswirkungen hatte bGW auf die stomatäre Leitfähigkeit bei 4 von 5 untersuchten Arten, jedoch konnte durch die Bewässerung mit sGW kein verschlechternder Effekt beobachtet werden.

**F3:** Welche der untersuchten Pflanzen, die in gebäudenahen Begrünungen (Vertikalbegrünungen und Stadtbäume) eingesetzt werden, überleben schadlos eine Bewässerung mit Grauwasser (bGW +sGW)?

**H3:** Grauwasser (bGW+sGW) eignet sich zur Bewässerung der untersuchten Pflanzen in Form von Vertikalbegrünung und Stadtbäumen.

Arten, die sich für eine **bGW**- Bewässerung **eignen und diese schadlos überleben:**

- | *A. pseudoplatanus*
- | *G. macrorrhizum*

Es konnte kein negativer Gesamteinfluss der bGW- Bewässerung auf die untersuchten Arten festgestellt werden.

---

Arten, die sich für eine **bGW**- Bewässerung **bedingt eignen und diese schadlos überleben:**

- | *T. cordata*
- | *H. sanguinea*

Einzig die stomatäre Leitfähigkeit wurde durch die bGW-Bewässerung negativ beeinflusst. Dies hat eine bedingte Eignung zur Folge. Bei allen anderen Untersuchungsparametern konnte keine Wirkung des bGW beobachtet werden.

---

Arten, die sich für eine **bGW**-Bewässerung **nicht eignen und diese nicht schadlos überleben:**

- | *H. helix*

Sowohl die stomatäre Leitfähigkeit als auch der Zuwachs beim Frischgewicht (Biomasse) wurden durch die Bewässerung mit bGW negativ beeinflusst.

---

Arten, die sich für eine **sGW**-Bewässerung **eignen und diese schadlos überleben:**

- | *A. pseudoplatanus*
- | *T. cordata*
- | *H. helix*
- | *H. sanguinea*

Es konnte kein negativer Gesamteinfluss der sGW-Bewässerung auf die untersuchten Arten festgestellt werden.

---

Arten, die sich für eine sGW-Bewässerung **nicht eignen und diese nicht schadlos überleben:**

| *G. macrorrhizum*

Die Bewässerung mit sGW bewirkte einen Rückgang des Chlorophyllgehalts und des Zuwaches (Biomasse- Frischgewicht, Blattanzahl).

## 7 | Conclusio

Das untersuchte behandelte Grauwasser entspricht allen Mindestanforderungen an Bewässerungswasser, die in Österreich und folglich der EU aktuell gültig sind. Weder aus chemisch-physikalischer noch mikrobiologischer Sicht konnten bei dem behandeltem Grauwasser aus der Referenzanlage in Wr. Neustadt Ergebnisse verzeichnet werden, die für die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanze bedenklich wären. Jedoch wird bei dem Vergleich des Grauwassers im Zu- (unbehandelt) und Ablauf (behandelt) der Anlage offensichtlich, wie wichtig die Reinigung des betreffenden Grauwassers ist, um besonders den hygienisch-mikrobiologischen Qualitätsstandards zu entsprechen.

Aus pflanzenphysiologischer Sicht beeinflusst das behandelte Grauwasser (bGW) weder den relativen Chlorophyllgehalt der Pflanzen noch deren Zuwachs der Terminaltriebe, Biomasse und Blattanzahl. Durch die Bewässerung mit unbehandeltem Grauwasser (sGW) kann sogar eine Steigerung des relativen Chlorophyllgehalts beobachtet werden. Negative Auswirkungen auf die stomatäre Leitfähigkeit wurden zwar bei behandeltem Grauwasser verzeichnet, jedoch ist dies auf stark veränderte Lichtverhältnisse zurückzuführen. Wird die stomatäre Leitfähigkeit der Arten, die mit unbehandeltem Grauwasser (sGW) bewässert wurden, betrachtet, so können diese negativen Auswirkungen nicht beobachtet werden. Da die Strahlung stark mit der stomatären Leitfähigkeit korreliert, kann dies ein möglicher Faktor sein, der die Ergebnisse der bGW-Gruppe schlechter ausfielen ließ als sie tatsächlich wären.

Da die Bewässerung eine ressourcenintensive Angelegenheit ist, stellt die gezielte Bewässerung grüner Infrastrukturen mit Grauwasser eine sinnvolle und zukunftssträchtige Alternative zu Frischwasser dar. Besonders die Verwendung von Grauwasser, das keine Abwässer aus Spül- und Waschmaschinen enthält, birgt ein enormes Potenzial, um dem künftig steigenden Druck auf Frischwasser zu begegnen. Um die Pflanzen unter Grauwasserbewässerung zu unterstützen und notfalls auf Defizite reagieren zu können, ist ein regelmäßiges Monitoring der Vitalität der Pflanzen und der Bodenbeschaffenheit (pH, elektrische Leitfähigkeit, Nährstoffverfügbarkeit) notwendig. Somit kann die Wasser- und Nährstoffversorgung grüner Infrastrukturen langfristig gesichert werden.

Die Folgen der Klimakrise werden in Europa von Tag zu Tag spürbarer und sind schon längst kein Phänomen mehr, das nur Ländern des Globalen Südens widerfährt. Die Notwendigkeit klimawirksamer Maßnahmen, wie z.B. der flächenbreiten Etablierung urbaner grüner Infrastrukturen, nimmt täglich zu. Neben der Speicherung von CO<sub>2</sub> und der

Luftschadstofffilterung hat Vegetation in Form von Transpiration und Beschattung auch einen maßgeblichen Effekt auf die Kühlung sogenannter städtischer Hitzeinseln. Sommerliche Hitzeperioden können somit gemildert werden. Für diese klimawirksame Ökosystemleistung sind die Pflanzen jedoch auf eine ausreichende Wasserversorgung angewiesen, die in Zukunft aus einem Mix aus Grau- und Regenwasser bereitgestellt werden kann. Lebensnotwendige Frischwasserreserven müssen dementsprechend nicht angetastet werden.

## 8 | Literaturverzeichnis

Alcade-Sanz, L.; Gawlik, B. M. (2017): Minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge - Towards a legal instrument on water reuse at EU level. JRC Policy report (EUR 28962 EN).

Alexandri, Eleftheria; Jones, Phil (2008): Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. In: *Building and Environment* 43 (4), S. 480–493. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.10.055.

Alfiya, Y.; Damti, O.; Stoler-Katz, A.; Zoubi, A.; Shaviv, A.; Friedler, E. (2012): Potential impacts of on-site greywater reuse in landscape irrigation. In: *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research* 65 (4), S. 757–764. DOI: 10.2166/wst.2012.903.

Al-Jayyousi, O. R. (2003): Greywater reuse: towards sustainable water management. In: *Desalination* 156, S. 181–192.

Al-Mashaqbeh, Othman A.; Ghrair, Ayoup M.; Megdal, Sharon B. (2012): Grey Water Reuse for Agricultural Purposes in the Jordan Valley: Household Survey Results in Deir Alla. In: *Water* 4 (3), S. 580–596. DOI: 10.3390/w4030580.

American Public Health Association (1992): APHA Method 4500-P: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Austrian Standards (2000): ÖNORM EN 12056-1 Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden. Teil 1: Allgemeine und Ausführungsanforderungen.

Austrian Standards (2017): ÖNORM EN16941-2:2017 Vor-Ort-Anlagen für Nicht-Trinkwasser-Teil 2: Anlagen für die Verwendung von behandeltem Grauwasser.

BGBl II 98:2010: Verordnung über den guten chemischen Zustand des Grundwassers. Bundesgesetzblatt II 98:2010.

Balany, F.; Ng, Anne W. M.; Muttill, N.; Muthukumaran, Sh.; Wong, M. S. (2020): Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy —A Review. In: *Water* 12 (12), S. 3577. DOI: 10.3390/w12123577.

Balder, H.; Ehlebracht, K.; Mahler, E. (1997): „Strassenbäume – Planen, Pflanzen, Pflegen am Beispiel Berlin“, Patzer Verlag:Berlin

Balder, H. (2007): Biotische und abiotische Schäden an Bäumen in der Stadt bei Klimaerwärmung. In: Roloff A.; Thiel, D.; Weiß, H. (Hg.): Urbane Gehölzverwendung im Klimawandel und aktuelle Fragen der Baumpflege. Dresden: Selbstverlag der Fachrichtung Forstwissenschaften der TU Dresden, S. 29-41.

Baumschule Horstmann (2021): Balkanstorchschnabel „Ingwersen“ Online:  
<https://www.baumschule-horstmann.de/shop/exec/product/699/12384/Balkan-Storchschnabel-Ingwersen.html> [letzter Zugriff 20.07.2021]

Baumschule Horstmann (2021): Purpurglöckchen „Leuchtkäfer“. Online:  
<https://www.baumschule-horstmann.de/shop/exec/product/699/1646/Purpurgloeckchen-Leuchtkaefer.html> [letzter Zugriff 20.07.2021]

BGBl II 98:2010: Verordnung über den guten chemischen Zustand des Grundwassers.  
Bundesgesetzblatt II 98:2010

Bland J. M.; Altman D.G. (1995): Multiple significance tests: the Bonferroni method. In: *BMJ* (310), S. 170.

Boano, Fulvio; Caruso, Alice; Costamagna, Elisa; Ridolfi, Luca; Fiore, Silvia; Demichelis, Francesca et al. (2020): A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. In: *The Science of the total environment* 711, S. 134731. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134731.

Boyjoo, Y.; Pareek, V. K.; Ang, M. (2013): A review of greywater characteristics and treatment processes. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 67 (7), S. 1403–1424. DOI: 10.2166/wst.2013.675.

BRUNS Pflanzen Export GmbH & Co.KG (2015): Sortimentskatalog 2015/2016

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (2017): Wasserversorgung und Wasserverbrauch in Österreich.  
<https://www.bmlrt.gv.at/wasser/nutzung-wasser/wasserversorgung/versorgung.html>

Communication from Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (2015): Closing the loop- An EU action plan for the circular economy. COM (2015)614.

Dixon, A.; Buttler D.; Fewkes, A.F. (1997): Local domestic water reuse: reusing greywater and rainwater in combination. Engineering and Physical Sciences Research Council Project

Drča, M. (2007): Seuchenhygienisch-mikrobiologische Untersuchungen an einer mesophil betriebenen Biogasanlage zur Verwertung von Speiseresten in Verbindung mit methodischen Untersuchungen zum Nachweis von Salmonellen und Escherichia coli aus biologischen Material. Dissertation. Universität Leipzig. Insitut für Tierhygiene und Öffentliches Veterinärwesen.

Dujesiefken, D.; Jaskula, P.; Kowol, T.; Lichtenauer, A. (2018): Baumkontrolle unter Berücksichtigung der Baumart. Braunschweig: Haymarket Media GmbH.

Dunn, O.J. (1961): Multiple comparisons among means. *JASA*, S. 54-64.

Eregno, F.; Moges, M.; Heistad, A. (2017): Treated Greywater Reuse for Hydroponic Lettuce Production in a Green Wall System: Quantitative Health Risk Assessment. In: *Water* 9 (7), 1-20. DOI: 10.3390/w9070454.

European Parliament and the Council of the European Union (2020): Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse.

Fezer F. (1995): Das Klima der Städte. Gotha: Perthes.

FLL -Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V (2015): Bewässerungsrichtlinien- Richtlinien für die Planung, Installation und Instandhaltung von Bewässerungsanlagen in Vegetationsflächen.

Fowdar, Harsha S.; Hatt, Belinda E.; Breen, Peter; Cook, Perran L. M.; Deletic, Ana (2017): Designing living walls for greywater treatment. In: *Water research* 110, S. 218–232. DOI: 10.1016/j.watres.2016.12.018.

Ghaitidak, D. M.; Yadav, K. D. (2013): Characteristics and treatment of greywater-a review. In: *Environmental science and pollution research international* 20 (5), S. 2795–2809. DOI: 10.1007/s11356-013-1533-0.

Glaser, Rüdiger; Hauter, Christiane; Faust, Dominik; Glawion, Rainer; Saurer, Helmut; Schulte, Achim; Sudhaus, Dirk (2010): Physische Geographie kompakt. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

GREEN4CITIES; MA22; GRÜNSTATTGRAU (2019): Leitfaden Fassadenbegrünung.

Gupta, V. K.; Ali, I.; Saleh, T. A.; Nayak, A.; Agarwal, S. (2012): Chemical treatment technologies for waste-water recycling — an overview. In: *RSC Adv.* 2 (16), S. 6380–6388. DOI: 10.1039/c2ra20340e.

Hacker J.; Ott M.; Tschäpe H. (1991): Das Problem der Pathogenität von Escherichia coli und seine Bedeutung für die rekombinante DNA-Technologie. Bioforum 14.

Hasanuzzaman, M.; Nahar, K.; Fujita, M. (2013): Plant Response to Salt Stress and Role of Exogenous Protectants to Mitigate Salt-Induced Damages. In: Parvaiz Ahmad, M.M Azooz und M.N.V Prasad (Hg.): Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress, Bd. 167. New York, NY: Springer New York, S. 25–87.

Helmecke, Manuela (2018): Landwirtschaftliche Nutzung von behandeltem Abwasser aus Umwelt- und Gesundheitsicht. In: Schimmelpfennig, S.; Anter, J.; Heidecke, C.; Lange, S.; Röttcher, K.; Bittner, F. (Hg.): Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. *Thünen Working Paper, Vol. 95.*, S.35-46

Hourlier, F.; Masse, A.; Jaouen, P.; Lakel, A.; Gerente, C.; Faur, C.; Le Cloirec, P. (2010): Formulation of synthetic greywater as an evaluation tool for wastewater recycling technologies. In: *Environmental technology* 31 (2), S. 215–223. DOI: 10.1080/09593330903431547.

Hupfer, P.; Kuttler W. (2005): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Hypes, W.D.; Batten, C.E.; Wilkins, J.R. (1975): Processing of combined bath and laundry waste-water for reuse as commode flushing water. Washington D.C.: National Aeronautics and Space Administration.

Kral, G.; Oerke E.-C.; Schönbeck F. (1993): Einfluss des Echten Mehltaus auf Wasserhaushalt und Photosynthese unterschiedlicher toleranter Sommergerstensorten. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Vol. 100 (1)*, S.1-10

IAEA (2001): Use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition Training Course Series (No.14).

Jefferson, B.; Palmer, A.; Jeffrey P.; Stuetz, R.; Judd, S. (2004): Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. In: *Water science and technology* (50 No. 2), S. 157–164. Online verfügbar unter DOI:10.2166/wst.2004.0113.

Kadereit, J.W.; Körner, Ch.; Kost, B.; Sonnewald, U. (2014): Strasburger Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften. Berlin: Springer Spektrum Verlag.

- Koc, C. B.; Osmond, P.; Peters, A. (2017): Towards a comprehensive green infrastructure typology: a systematic review of approaches, methods and typologies. In: *Urban Ecosyst* 20 (1), S. 15–35. DOI: 10.1007/s11252-016-0578-5.
- Köhler, M. (2012): Handbuch Bauwerksbegrünung : Planung, Konstruktion, Ausführung: mit 49 Tabellen. Köln: Müller.
- Kong, L.; Lau, K.; Yuan, C.; Chen, Y.; Xu, Y.; Ren, C.; Ng, E. (2017): Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. In: *Sustainable Cities and Society* 31 (3), S. 12–25. DOI: 10.1016/j.scs.2017.01.018.
- Kos B. (2017): Untersuchungen zu Baumsubstraten und Straßenbäumen mittels ausgewählter geotechnischer und vegetationstechnischer Methoden im Rahmen des "SAVE"- Projekts der Stadt Wien. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau.
- Lehmann, Steffen (2014): Low carbon districts: Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure. In: *City, Culture and Society* 5 (1), S. 1–8. DOI: 10.1016/j.ccs.2014.02.002.
- Lubbe, E.; Rodda, N.; Naidoo, Serphen (2016): Effects of greywater irrigation on germination, growth and photosynthetic characteristics in selected African leafy vegetables. In: *WSA* 42 (2), S. 203. DOI: 10.4314/wsa.v42i2.04.
- Lucht, W.; Schaaf, C.; Strahler, A. H.; D'Entremont, R. (2000): Remote sensing of Albedo using the BRDF in relation to land surface properties. In: M. M. Verstraete, M. Menenti und J. Peltoniemi (Hg.): *Observing Land from Space: Science, Customers and Technology*. Dordrecht: Kluwer Academics Publishers, S. 175–186.
- McPherson, E. G.; Simpson, J. R. (2003): Potential energy savings in buildings by an urban tree planting programme in California. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 2 (2), S. 73–86. DOI: 10.1078/1618-8667-00025.
- Medl, Alexandra; Stangl, Rosemarie; Florineth, Florin (2017): Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. In: *Building and Environment* 125 (6), S. 227–239. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.08.054.
- Menberg, Kathrin; Bayer, Peter; Zosseder, Kai; Rumohr, Sven; Blum, Philipp (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. In: *The Science of the total environment* 442, S. 123–133. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.043.

Merz, C.; Scheumann, R.; El Hamouri, B.; Kraume, M. (2007): Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club. In: *Desalination* 215 (1-3), S. 37–43. DOI: 10.1016/j.desal.2006.10.026.

Moder, Karl (2012): Statistik. Studienjahr 2012/2013. Skriptum für Lehrveranstaltung. Institut für Angewandte Statistik und EDV, BOKU Wien.

Montgomery, Mark R. (2008): The urban transformation of the developing world. In: *Science (New York, N. Y.)* 319 (5864), S. 761–764. DOI: 10.1126/science.1153012.

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2001): Empfehlungen für Bewässerungswasser. Arbeitsbehelf 11

Oke, T. R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (108), S. 1–24.

Ollevent, N.A. (1999): Tukey Multiple Comparison test. Blackwell science Ltd.

Oron, Gideon; Adel, Mike; Agmon, Vered; Friedler, Eran; Halperin, Rami; Leshem, Ehud; Weinberg, Daniel (2014): Greywater use in Israel and worldwide: standards and prospects. In: *Water research* 58, S. 92–101. DOI: 10.1016/j.watres.2014.03.032.

Pan, L.; Wei, S.; Chu, L. M. (2018): Orientation effect on thermal and energy performance of vertical greenery systems. In: *Energy and Buildings* 175, S. 102–112. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.024.

Pfleger, Ingrid (2009): Bewässerungswasserqualität - hygienische und chemische Belange. In: *Landbauforschung* (328).

Pfoser, N. (2016): Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadenbegrünung. Eine Untersuchung zu Sachstand, Motivation und Zukunftseignung der weltweit zunehmenden Fassadenbestimmung als funktionale und ästhetische Fusion von Vegetation und vertikalen Bauteilen. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Fachbereich Architektur.

Pinto, U.; Maheshwari, B. L.; Grewal, H. S. (2009): Effects of greywater irrigation on plant growth, water use and soil properties. In: *Resources, Conservation and Recycling* 54 (7), S. 429–435. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.09.007.

Pradhan, Snigdhendubala; Al-Ghamdi, Sami G.; Mackey, Hamish R. (2019): Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and

challenges. In: *The Science of the total environment* 652, S. 330–344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.226.

Pucher, B.; Zluwa, Irene; Ribeiro, G.; Langergraber G.; Spörl, P.; Pitha, U. (2020): Entwicklung eines multifunktionalen Living-Wall-Systems zur Reinigung und Nutzung von Grauwasser. In: *Wasser und Abfall* (07-08), S. 37–40.

Ribeiro, G. (2021): Grauwasserreinigung in fassadengebundenen Begrünungssystemen. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien. Institut für Siedlungswasserbau, Industrierewasserwirtschaft und Gewässerschutz.

Roloff, A. (2013): Bäume in der Stadt. Stuttgart:Ulmer.

Sanusi, R.; Johnstone, D.; May, P.; Livesley, S. J. (2017): Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. In: *Landscape and Urban Planning* (157), S. 502–511. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2016.08.010.

Scharf, B.; Pitha, U.; Oberarzbacher, S. (2012): Living Walls - More than scenic beauties. 49th IFLA world congress landscapes in transition, cape town, South Africa, Sep 5-7, 2012. In: *IFLA e International Federation of Landscape Architects*.

Schinner, F.; Öhlinger, R.; Kandeler, E. (1991): Bodenbiologische Arbeitsmethoden. Barcelona: Springer Verlag.

Schönenbuch (2007): Wirkung von Streusalz auf Forstgehölze. Zusammenfassung von Untersuchungen auf dem Botanischen Institut der Universität Basel. Institut für angewandte Pflanzenbiologie. Universität Basel.

Schulze, Helene; Langenberg, Heike (2014): Urban heat. In: *Nature Geosci* 7 (8), S. 553. DOI: 10.1038/ngeo2219.

Schumacher, J. (2007): Analysis of Variance (ANOVA) in R.

Siegel, S.; Tukey, J. W. (1960): A Nonparametric Sum of Ranks Procedure for Relative Spread in Unpaired Samples. In: *Journal of the American Statistical Association* 55 (291), S. 429–445. DOI: 10.1080/01621459.1960.10482073.

Sommer, N. (2007): Gehölzsortimente und ihre Verwendung. Wien: Agrarverlag.

Sonnenerde GmbH (2021): Dachsubstrat intensiv. Online:

<https://www.sonnenerde.at/de/produkt/dachgartenerde-intensiv/> [letzter Zugriff 20.07.2021]

Stangl, R.; Meld, A.; Scharf, B.; Pitha, U. (2019): Wirkungen der grünen Stadt. Studie zur Abbildung des aktuellen Wissenstands im Bereich städtischer Begrünungsmaßnahmen.

STREBELWERK GmbH (2017): Energetische und stoffliche Grauwasserverwertung. Folder.

Thorne, D.W.; Peterson, H.B. (1954): Irrigated soils. Toronto: The Blakistan Company.

Travis, Micheal J.; Wiel-Shafran, Alit; Weisbrod, Noam; Adar, Eilon; Gross, Amit (2010): Greywater reuse for irrigation: effect on soil properties. In: *The Science of the total environment* 408 (12), S. 2501–2508. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.03.005.

Umweltbundesamt (2016): Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von behandeltem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung. Dessau-Roßlau.

Wagner I., Krauze K., Zalewski M. (2013): Blue aspects of green infrastructure. In: *Sustainable Development Application (No 4)*.

Walker, R.; Schenk, D. (2016): Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser. Abschlussbericht.

Winker, M.; Deffner, Jutta; Frick-Trzebitzky, F.; Schramm, E. (2019): GruenImKlimawandel\_StadtUndGruen\_Researchgate. In: *Stadt+Grün* (68(5)), S. 33–38.

Zeiler, S. (2015): Auswirkungen des Klimas auf Stadtbäume im Bezirk Korneuburg, Niederösterreich. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau.

Zimmermann, A. (2015): Landschaft konstruieren. Materialien, Techniken, Bauelemente. Birkhäuser: Basel.

## 9 | Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Definition Grauwasser und Schwarzwasser (eigene Abbildung) 17

Abbildung 2. Reinigungsstufen für Grauwasserbehandlung (Gupta et al. 2012; Boyjoo et al. 2013; ÖNORM EN 16941:2; eigene Abbildung) 20

Abbildung 3. Bodengebundene Vertikalbegrünung mit Klettergerüst. St. Anna Kinderspital, Wien (eigene Aufnahme 2019) 31

Abbildung 4. Wandgebundene Vertikalbegrünung (von links nach rechts): Bild 1: punktueller, teilflächiger Vegetationskörper, SOHO Innsbruck (eigene Aufnahme 2020), Bild 2: linearer teilflächiger Vegetationskörper, Kempelenpark Wien (eigene Aufnahme 2020),

Bild 3 + 4: vollflächiger, modularer Vegetationsträger, Kempelenpark Wien (eigene Aufnahme 2020)	31
Abbildung 5. Tröpfchenbewässerung in wandgebundener Vertikalbegrünung. BeRTA Tröge Wien (eigene Aufnahme 2021)	33
Abbildung 6. Von links nach rechts: Bild links: Zu klein dimensionierte Baumscheibe, die keine adäquate Wasser-und Nährstoffversorgung des Baumes zulässt: Unter dem Gehsteig sind die ersten Wurzelhebungen zu sehen. Bisamberg (eigene Aufnahme 2019) Bild Mitte: Offene Gestaltung einer Baumscheibe: Regenwasser kann versickern, Gasaustausch ist möglich. Haus des Meeres, Wien (eigene Aufnahme 2021), Bild rechts: Baumneupflanzung in einem Staudenbeet mit integrierter Tropfbewässerung, Neubaugasse Wien (eigene Aufnahme 2021)	35
Abbildung 7. Bewässerung von Baumneupflanzungen: Bewässerungssack, der Wasser langsam an den Boden abgibt, Bild links: Feistmantelstraße Wien (eigene Aufnahme 2021), rechtes Bild: Schottenfeldgasse Wien (eigene Aufnahme 2021)	36
Abbildung 8. Versuchsplan: Anordnung der Pflanzen im Gewächshaus (eigene Abbildung)	37
Abbildung 9. Bild links: Platzierung der Bewässerungsrohre und Mikroschläuche inkl. der Tropfspieße Bild rechts: Anordnung der Grauwassergruppe auf dem Pflanztisch (eigene Aufnahmen 2020)	40
Abbildung 10. Bild links: Tropfspieß mit 8l/h Durchlauf; Bild rechts: Tropfspieß mit 4 l/h Durchlauf (eigene Aufnahme 2020)	40
Abbildung 11. Schema der stofflichen Grauwasseranlage in Wiener Neustadt mit Zu- und Ablauf (STREBEL GmbH 2017; eigene Bearbeitung)	41
Abbildung 12. Zeitlicher Ablauf der drei Phasen des Versuches mit Chronologie der Erhebungen (eigene Abbildung)	43
Abbildung 13. Probenentnahme der Grauwasseranalyse (eigene Abbildung)	44
Abbildung 14. Bild links: Probenentnahme für chemische Analysen am Zulauf; Bild Mitte: Probenentnahme für chemische Analysen am Ablauf; Bild rechts: Probenentnahme für mikrobiologische Analyse am Ablauf (eigene Aufnahmen 2020)	46
Abbildung 15. Sterilisation der Instrumente und des Ablaufs für mikrobiologische Analysen (eigene Aufnahmen 2020)	46

Abbildung 16. Bild links: Taschenmessgerät MultiLine ® Multi 3630 IDS; Bild rechts: Messung des gelösten Sauerstoffs am Ablauf (eigene Aufnahmen 2020)	47
Abbildung 17. Vitale Blätter: Bild links: Hedera helix; Bild Mitte: Heuchera sanguinea; Bild rechts: Geranium macrorrhizum (eigene Aufnahmen 2021)	48
Abbildung 18. Messung des Terminaltriebs (eigene Aufnahme 2020)	49
Abbildung 19. Ermittlung des Frischgewichts des Sprosses am Versuchsanfang (eigene Aufnahme 2020)	50
Abbildung 20. Nitratanalyse in 96-Well-Mikrotiterplatten. (eigene Aufnahme 2020)	51
Abbildung 21. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von <i>A. pseudoplatanus</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	59
Abbildung 22. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von <i>T. cordata</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	60
Abbildung 23. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von <i>G. macrorrhizum</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	61
Abbildung 24. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von <i>H. helix</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	62
Abbildung 25. Boxplot: Messung des relativen Chlorophyllgehalts von <i>H. sanguinea</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	63
Abbildung 26. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von <i>A. pseudoplatanus</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	65
Abbildung 27. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von <i>T. cordata</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	65
Abbildung 28. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von <i>G. macrorrhizum</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	67
Abbildung 29. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von <i>H. helix</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	68
Abbildung 30. Boxplot: Messung der stomatären Leitfähigkeit von <i>H. sanguinea</i> an vier Tagen (eigene Abbildung)	68
Abbildung 31. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von <i>A. pseudoplatanus</i> an drei Tagen (eigene Abbildung)	70

Abbildung 32. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von <i>T. cordata</i> an drei Tagen (eigene Abbildung)	71
Abbildung 33. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von <i>G. macrorrhizum</i> an drei Tagen (eigene Abbildung)	72
Abbildung 34. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von <i>H. helix</i> an drei Tagen (eigene Abbildung)	72
Abbildung 35. Boxplot: Zählung der Gesamtblattanzahl von <i>H. sanguinea</i> an drei Tagen (eigene Abbildung)	73
Abbildung 36. Boxplot: Messung des Frischgewichts des Sprosses bei <i>G. macrorrhizum</i> (eigene Abbildung)	74
Abbildung 37. Boxplot: Messung des Frischgewichts der Wurzeln bei <i>G. macrorrhizum</i> (eigene Abbildung)	75
Abbildung 38. Boxplot: Messung des Frischgewichts des Sprosses bei <i>H. helix</i> (eigene Abbildung)	75
Abbildung 39. Boxplot: Messung des Frischgewichts der Wurzeln bei <i>H. helix</i> (eigene Abbildung)	76
Abbildung 40. Boxplot: Messung des Frischgewichts des Sprosses bei <i>H. sanguinea</i> (eigene Abbildung)	76
Abbildung 41. Boxplot: Messung des Frischgewichts der Wurzeln bei <i>H. sanguinea</i> (eigene Abbildung)	77
Abbildung 42. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Sprossmasse bei <i>G. macrorrhizum</i> (eigene Abbildung)	78
Abbildung 43. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Wurzelmasse bei <i>G. macrorrhizum</i> (eigene Abbildung)	78
Abbildung 44. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Sprossmasse bei <i>H. helix</i> (eigene Abbildung)	79
Abbildung 45. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Wurzelmasse bei <i>H. helix</i> (eigene Abbildung)	79
Abbildung 46. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Sprossmasse bei <i>H. sanguinea</i> (eigene Abbildung)	80

Abbildung 47. Boxplot: Ermittlung des Zuwachses an Wurzelmasse bei <i>H. sanguinea</i> (eigene Abbildung)	80
Abbildung 48. Boxplot: Zuwachs des Terminaltriebs zu Versuchsende bei <i>A. pseudoplatanus</i> (eigene Abbildung)	81
Abbildung 49. Boxplot: Zuwachs des Terminaltriebs zu Versuchsende bei <i>T. cordata</i> (eigene Abbildung)	82
Abbildung 50. Boxplot: Analyse der Bodenproben auf Nitratgehalt (eigene Abbildung)	83
Abbildung 51. Boxplot: Analyse der Bodenproben auf Phosphatgehalt (eigene Abbildung)	83
Abbildung 52. Boxplot: Analyse der Bodenproben auf pH-Wert (eigene Abbildung)	84
Abbildung 53. Bild links: rötliche Verfärbungen bei <i>G. macrorrhizum</i> im Juli, Bild rechts: grünes, vitales Blatt von <i>G. macrorrhizum</i> zu Versuchsbeginn (eigene Aufnahmen 2020)	88
Abbildung 54. Bild links: Blattrandnekrose bei <i>A. pseudoplatanus</i> ; Bild rechts: Mehltaubefall bei <i>A. pseudoplatanus</i> (eigene Aufnahmen 2020)	89

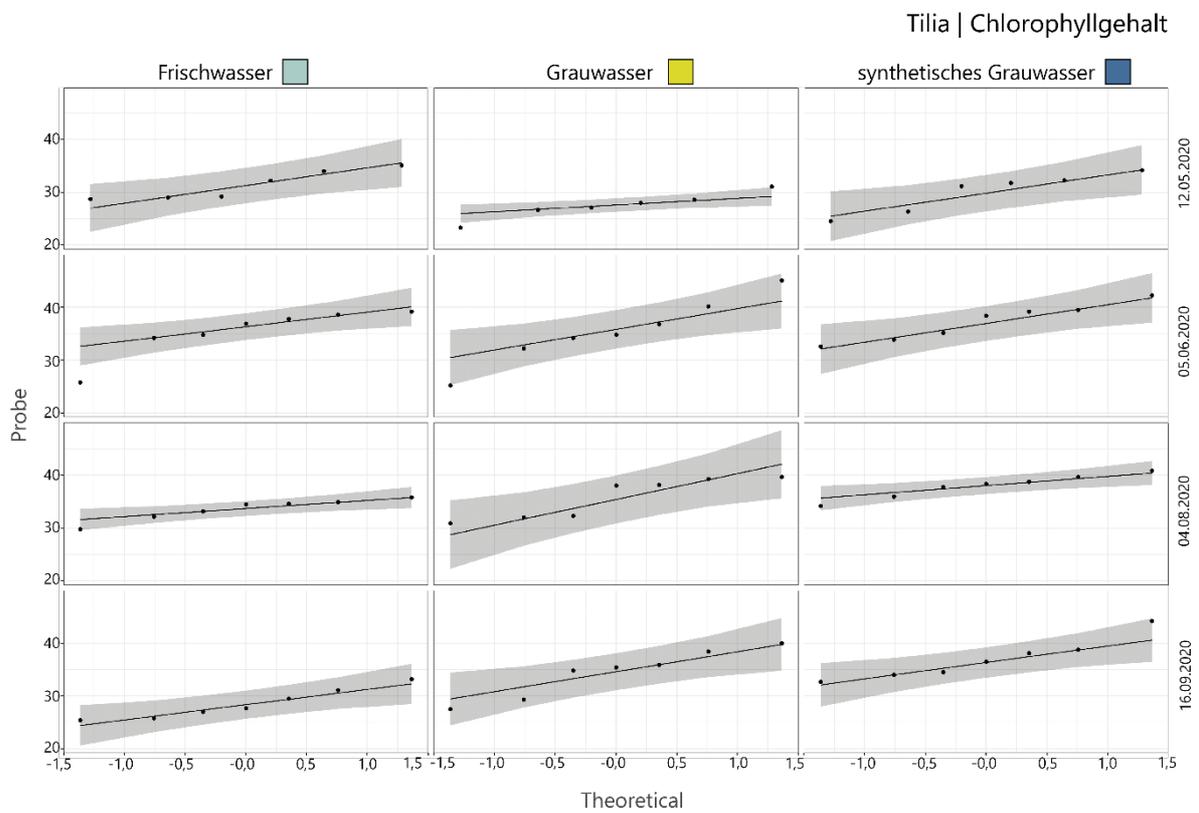
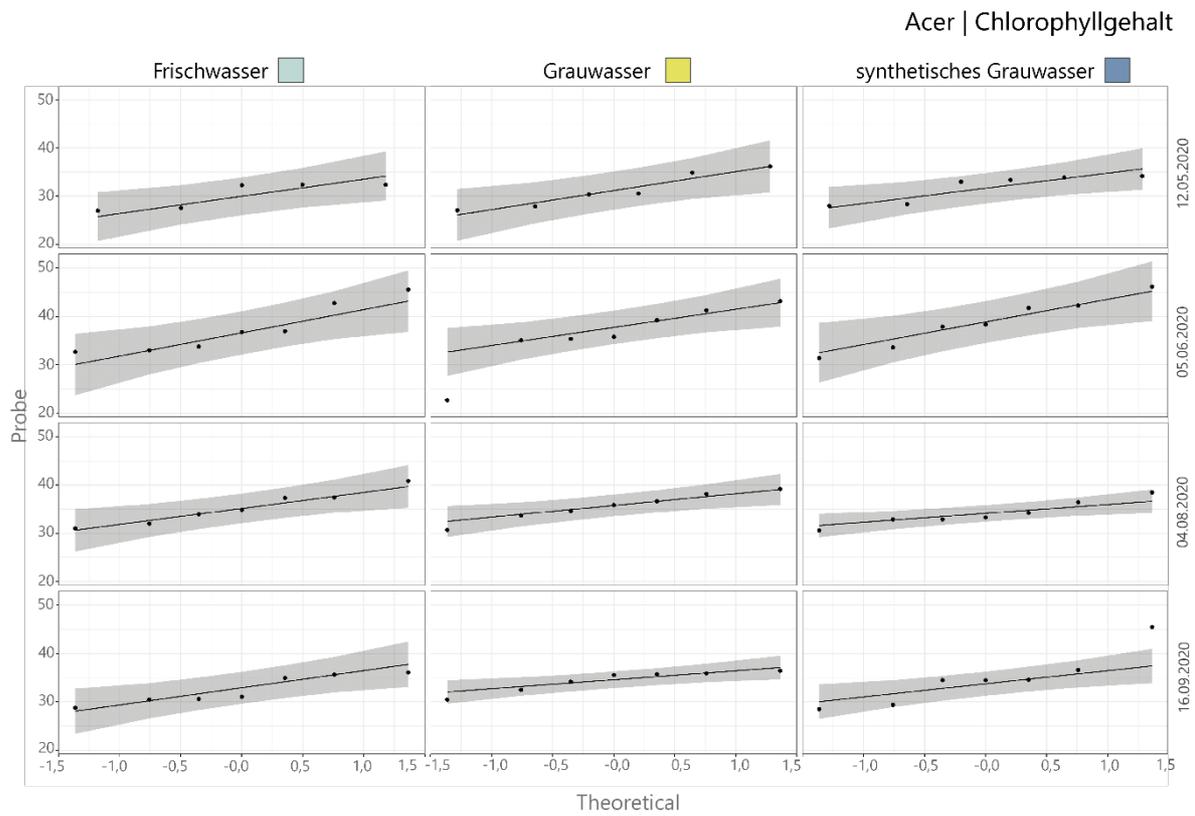
## 10 | Tabellenverzeichnis

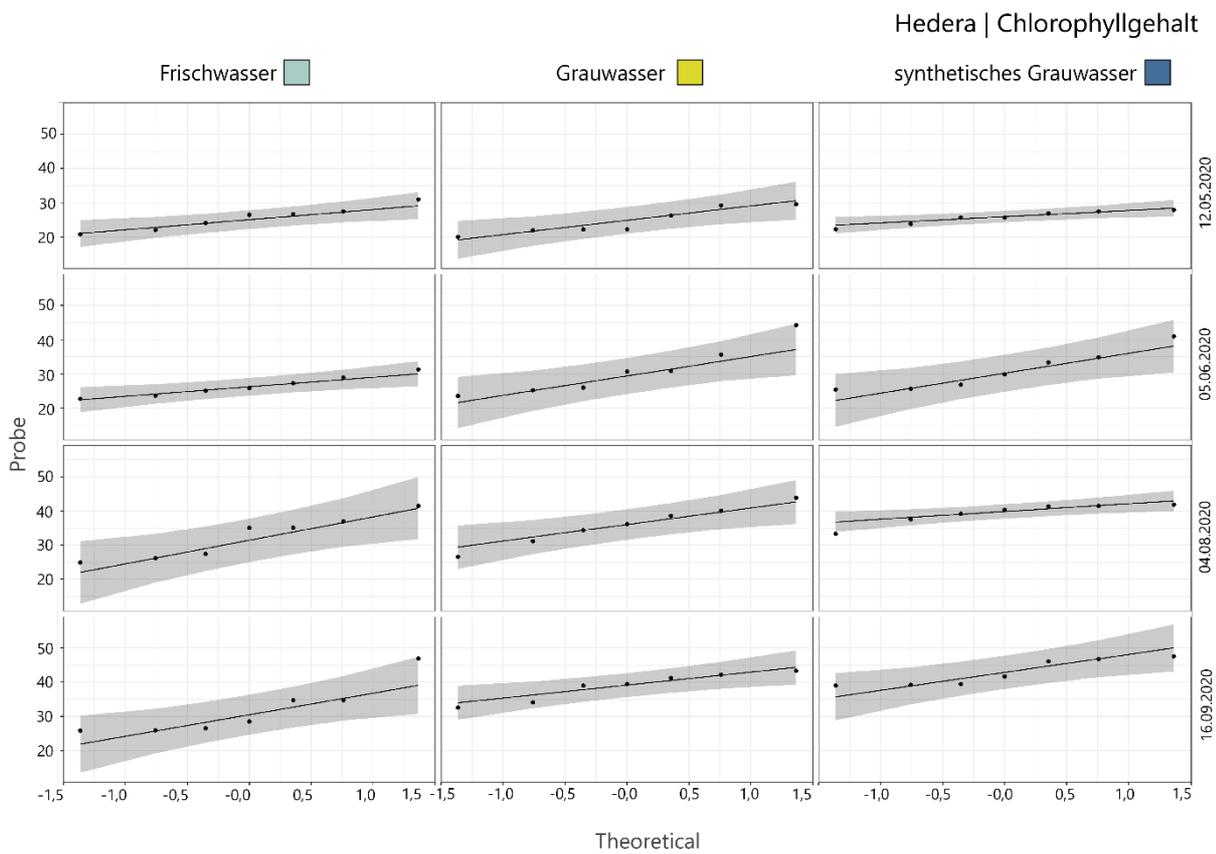
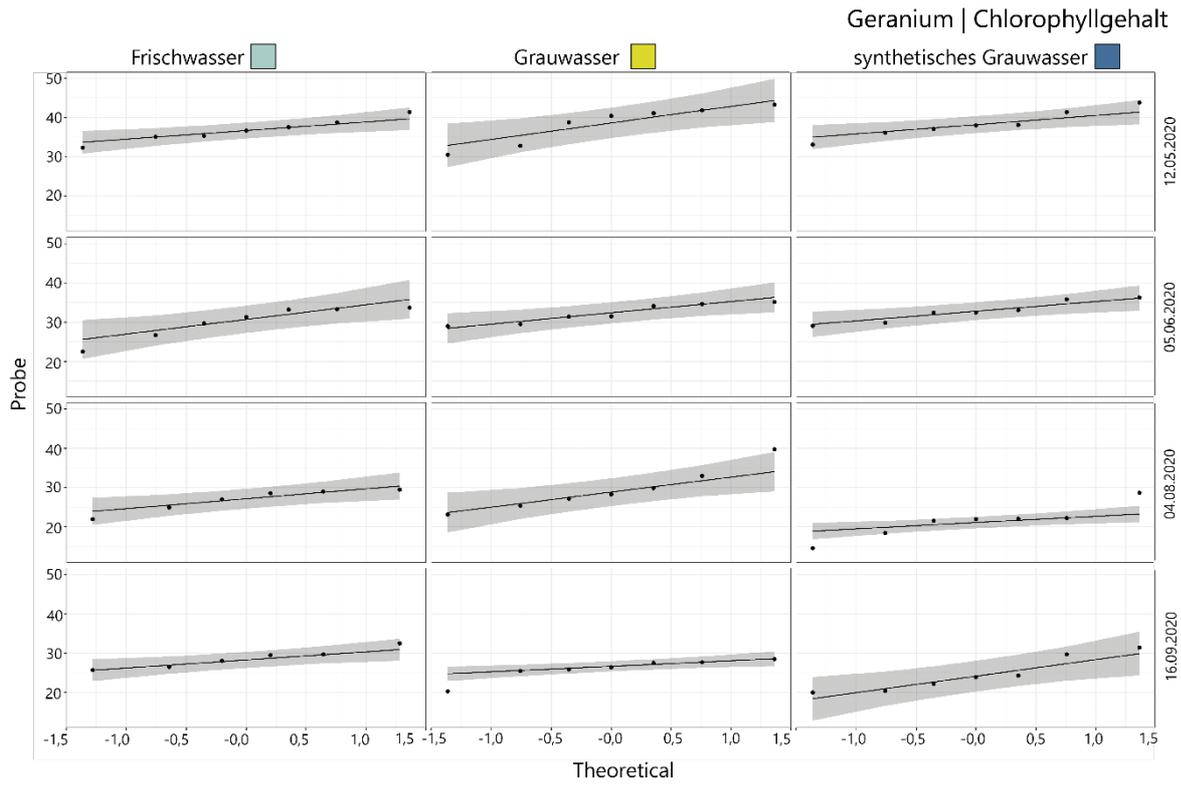
Tabelle 1. Forschungsdesign der Masterarbeit (eigene Abbildung)	16
Tabelle 2. Zusammensetzung verschiedener Grauwasser aus europäischen Ländern (eigene Bearbeitung), <sup>1</sup> (Merz et al. 2007); <sup>2</sup> (Hourlier et al. 2010); <sup>3</sup> (Ghaitidak et Yadav 2013; Jefferson et al. 2004); <sup>4</sup> (Boano et al. 2020); <sup>5</sup> (Ghaitidak et Yadav 2013); <sup>6</sup> (Ghaitidak et Yadav 2013)	18
Tabelle 3. Schwellenwerte für im Grundwasser nachgewiesene Stoffe. nach BGBl. II 98/2010 (eigene Bearbeitung)	23
Tabelle 4. Einteilung des Schwebstoffgehalts und gelöster Stoffe für die Eignung für Tröpfchenbewässerung (ÖWAV 2001; eigene Bearbeitung)	25
Tabelle 5. Kennwerte der chemischen Bestandteile für die Eignung von Grauwasser zu Bewässerungszwecken (ÖNORM EN 16941-2; ÖWAV 2001; Pflieger 2009; eigene Bearbeitung)	26
Tabelle 6. Richtwerte für elektrische Leitfähigkeit und Salzgehalt (ÖWAV 2001; eigene Bearbeitung)	26

Tabelle 7. Grenzwerte für hygienische Anforderungen an Bewässerungswasser. Ein Überschreiten muss verhindert werden. (EU 2020/ 741; ÖNORM EN 16941-2:2017; ÖWAV 2001; eigene Bearbeitung)	27
Tabelle 8. Albedo (in%) verschiedener Oberflächen (Fezer 1995; eigene Bearbeitung)	29
Tabelle 9. Übersicht über Pflanzen, die in Vertikalbegrünungen in Österreich eingesetzt werden (Enzi 2010; GREEN4CITIES et al. 2019; eigene Bearbeitung)	32
Tabelle 10. Wasserbedarf vertikaler Bauwerksbegrünungen (eigene Bearbeitung)	33
Tabelle 11. Übersicht und Charakteristika der untersuchten Pflanzenarten (PRUNS 2015; Sommer 2007; eigene Bearbeitung; eigene Aufnahmen 2021)	38
Tabelle 12. Chemische Zusammensetzung des Dachgartensubstrats der Firma Sonnenerde (eigene Bearbeitung)	39
Tabelle 13. Untersuchungsparameter der Grauwasseranalysen im Labor des Instituts für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz BOKU Wien und chronologische Verortung der Beprobungen (eigene Bearbeitung)	45
Tabelle 14. Übersicht über die statistische Arbeitsweise (eigene Abbildung)	54
Tabelle 15. Gemittelte Messwerte (fünf Messungen) der untersuchten Parameter am Ab- und Zulauf der Grauwasseranlage in Wiener Neustadt (Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz, BOKU Wien, eigene Bearbeitung)	56
Tabelle 16. Gemittelte Messwerte der untersuchten chemischen Parameter des bGW und sGW in den Tanks im Gewächshaus (Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz, BOKU Wien, eigene Bearbeitung)	58
Tabelle 17. Vergleich der Analysewerte aus Wiener Neustadt mit Ergebnissen von Walker et Schenk (2016) , <sup>1</sup> Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz BOKU, <sup>2</sup> Walker et Schenk 2016 (eigene Bearbeitung)	86
Tabelle 18. Matrix zur Beurteilung der Eignung der untersuchten Arten für die Bewässerung mit behandeltem (bGW) und unbehandeltem (sGW) Grauwasser im Vergleich zu Frischwasser (FW) (eigene Bearbeitung)	94

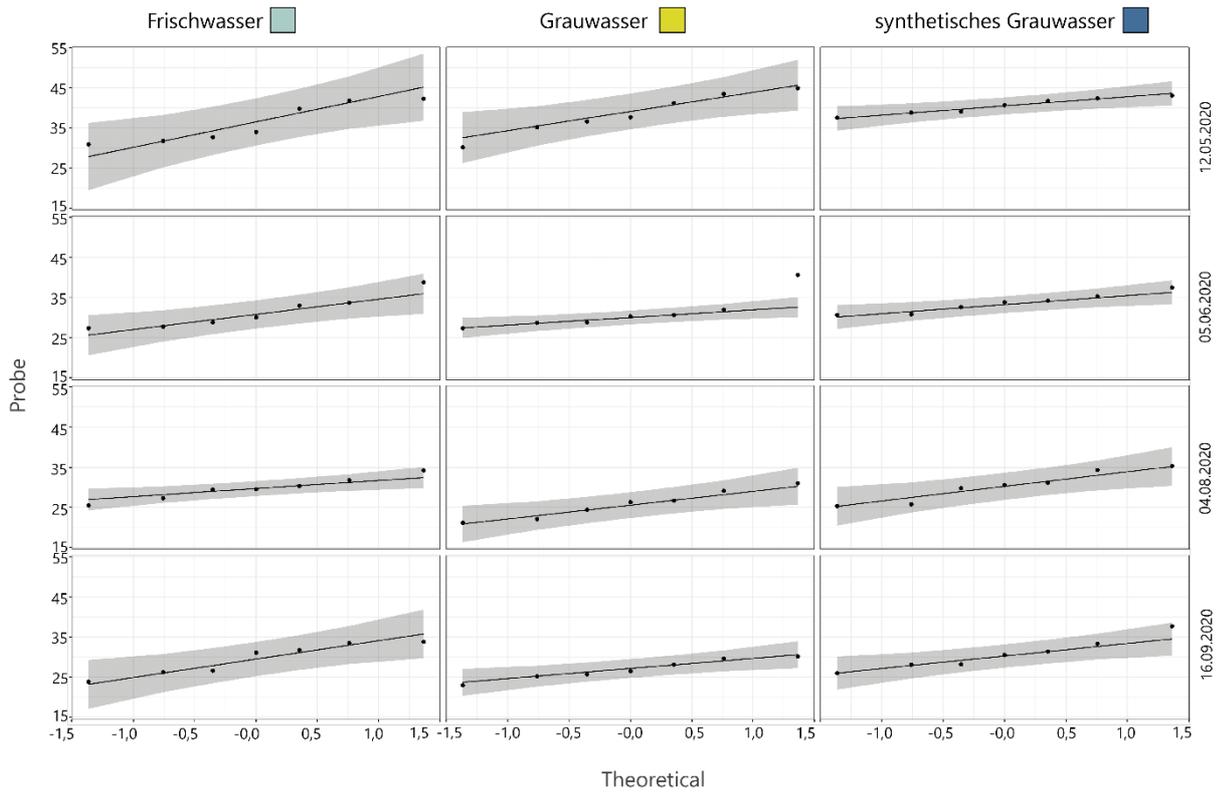
# 11 Anhang. Statistische Daten

## 11.1 | Relativer Chlorophyllgehalt



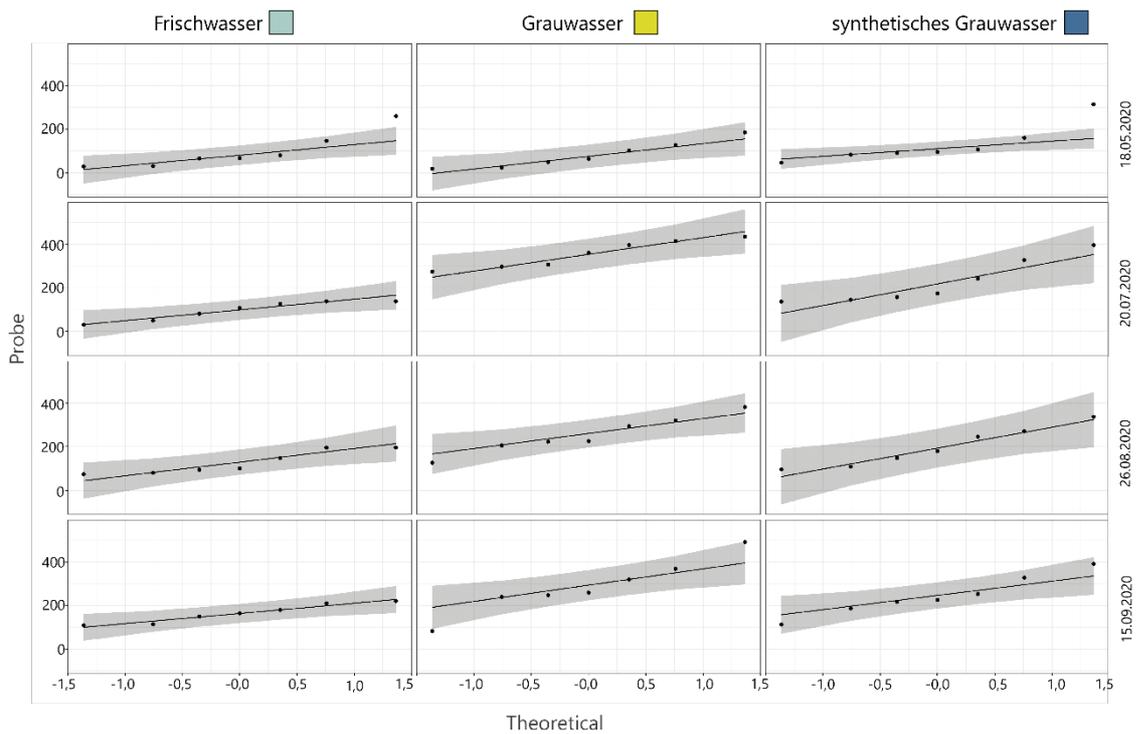


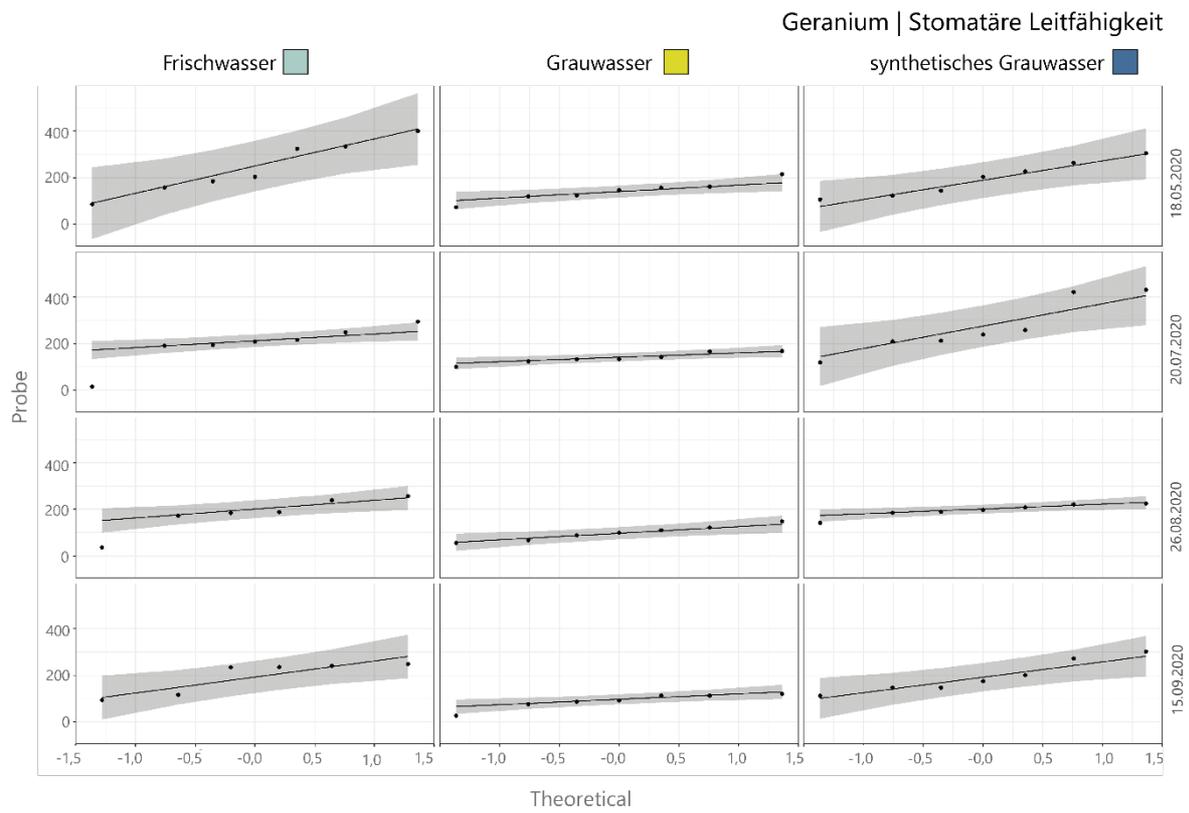
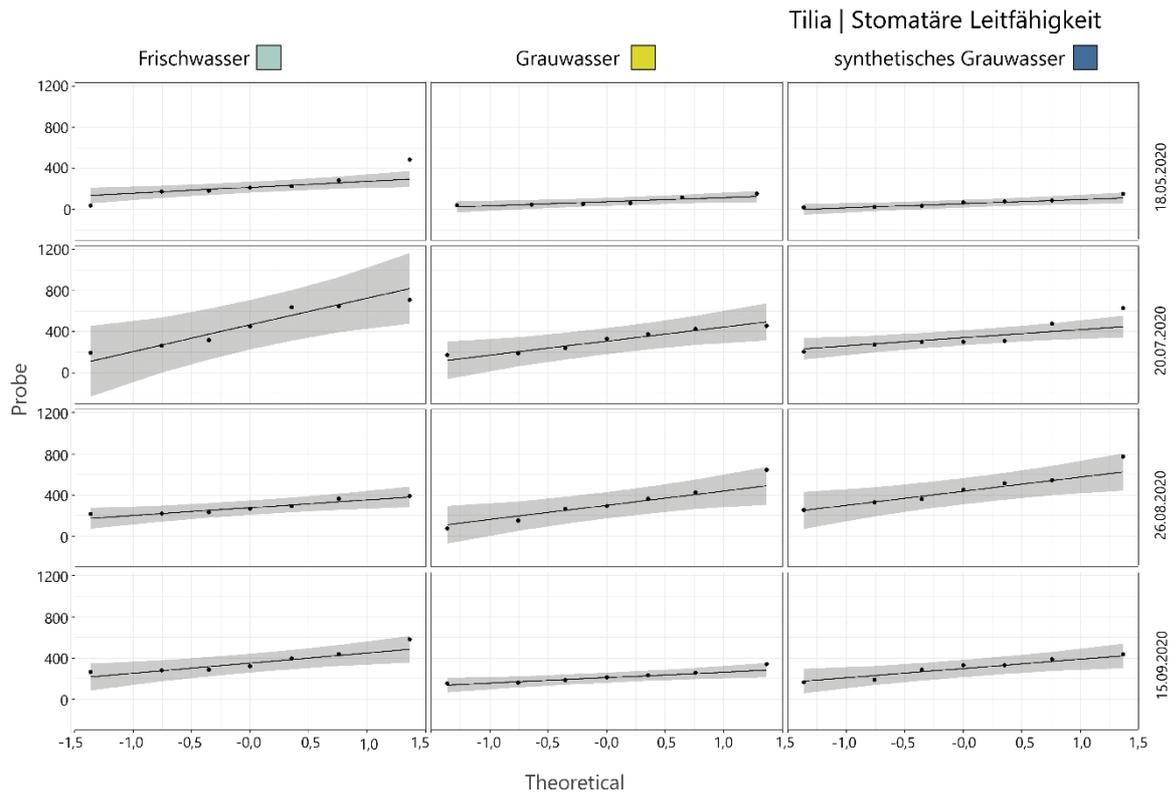
## Heuchera | Chlorophyllgehalt



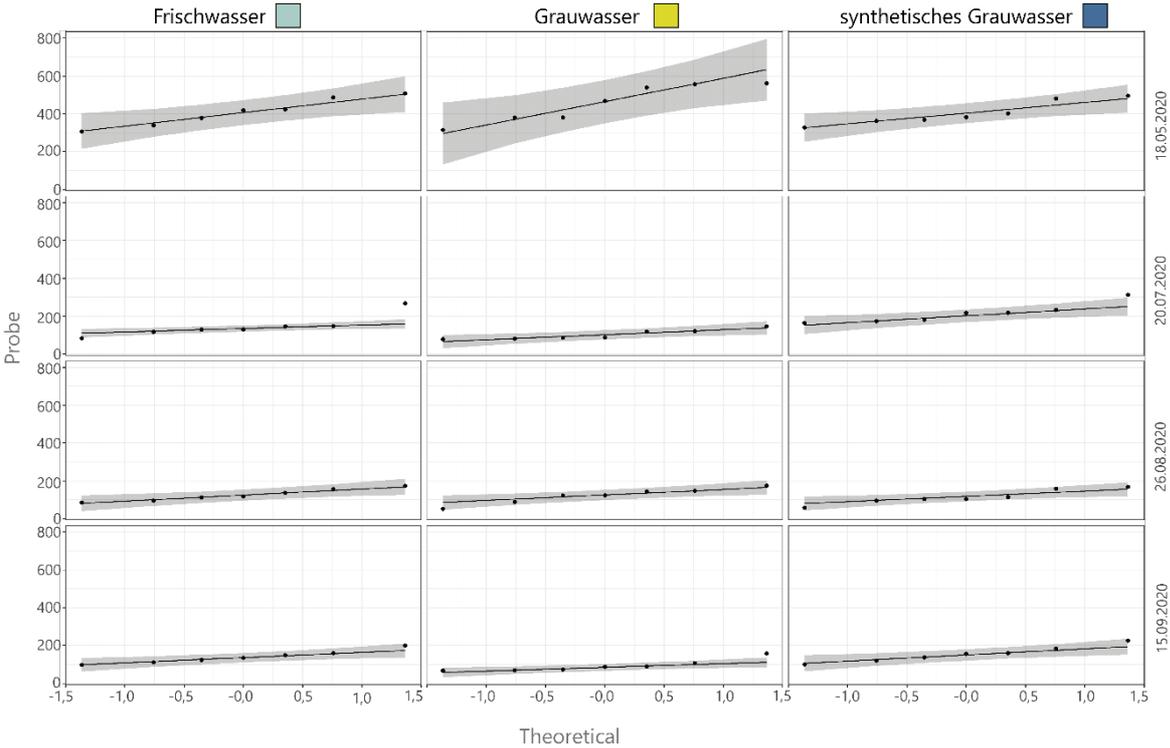
## 11.2 | Stomatäre Leitfähigkeit

### Acer | Stomatäre Leitfähigkeit

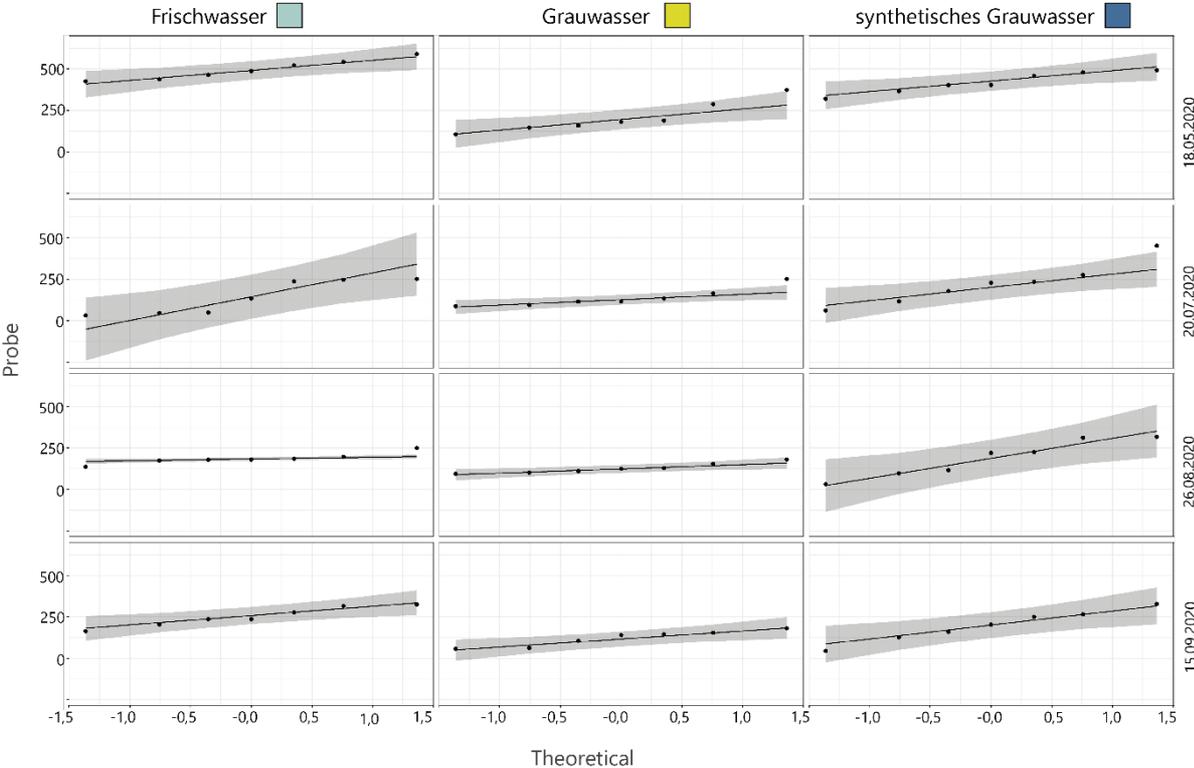




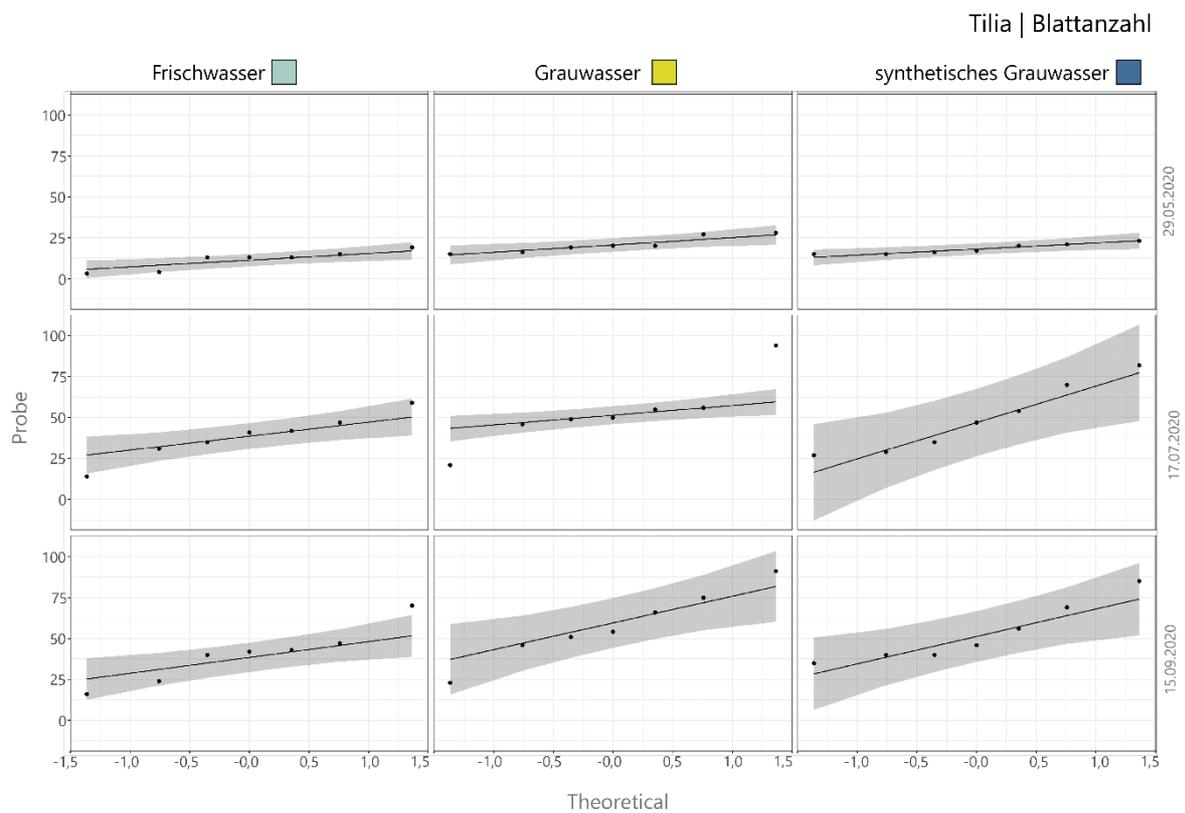
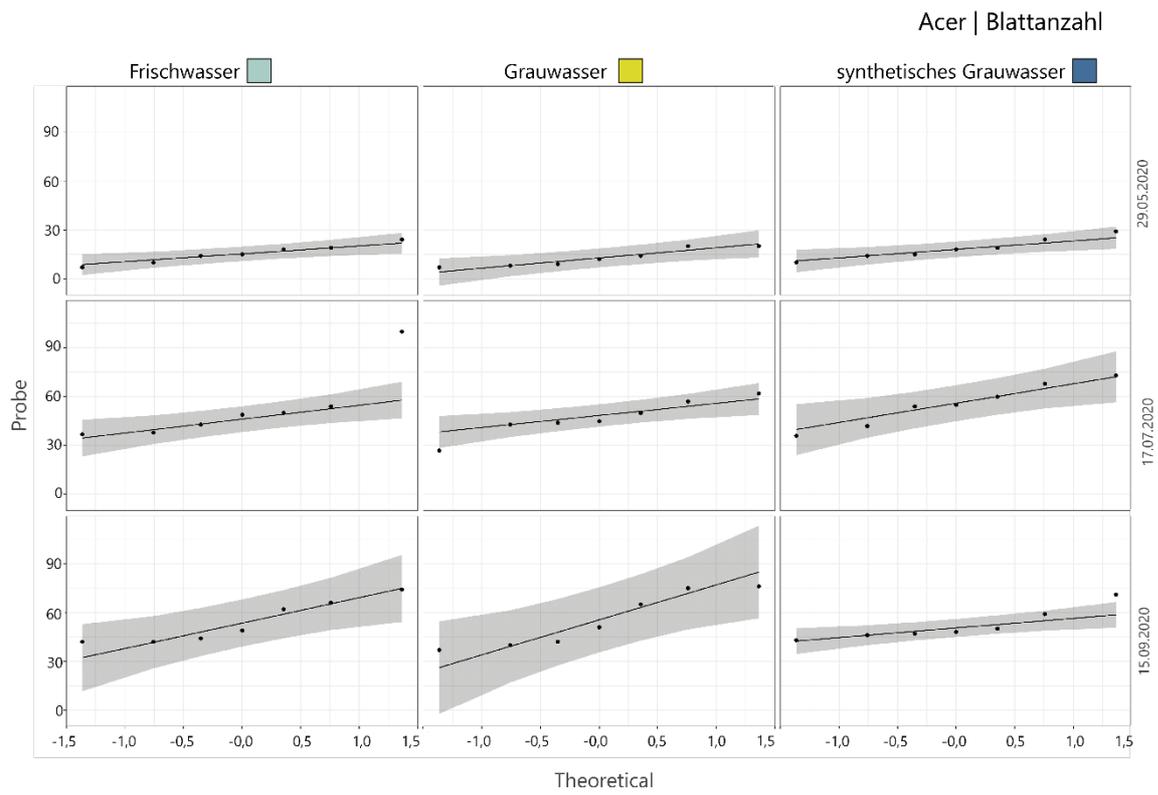
Hedera | Stomatäre Leitfähigkeit



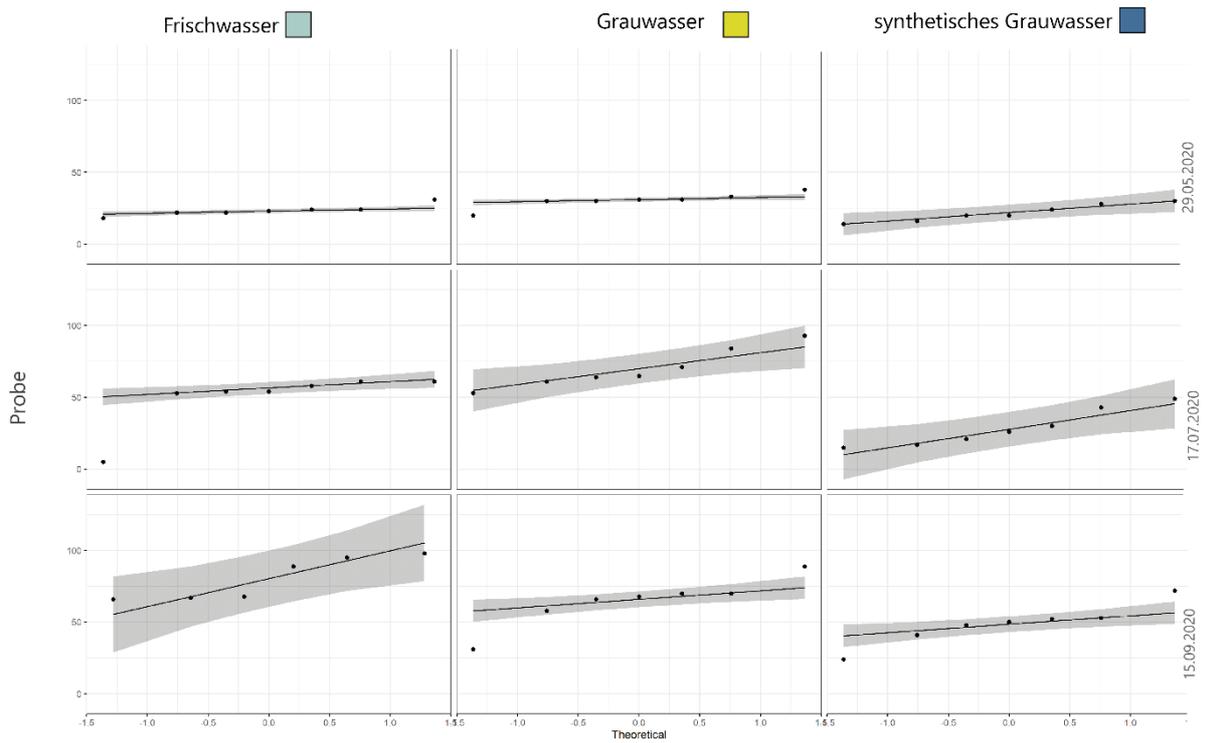
Heuchera | Stomatäre Leitfähigkeit



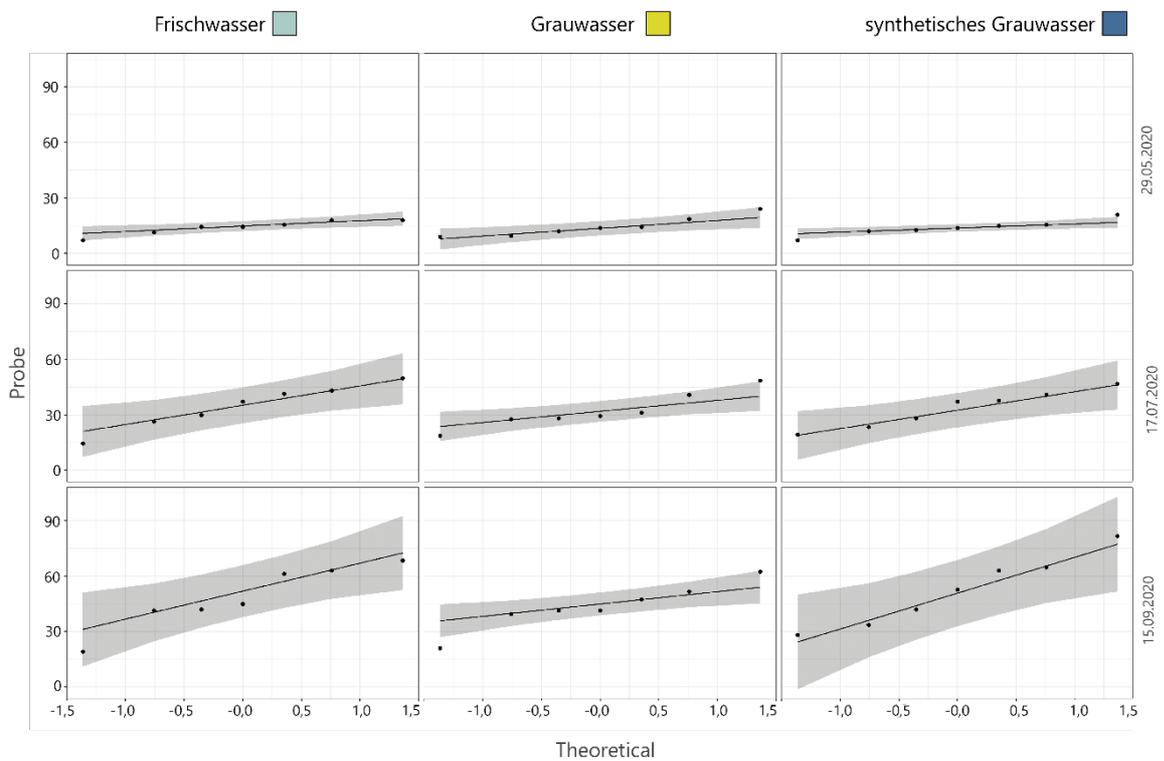
## 11.3 | Zuwachs Blattanzahl

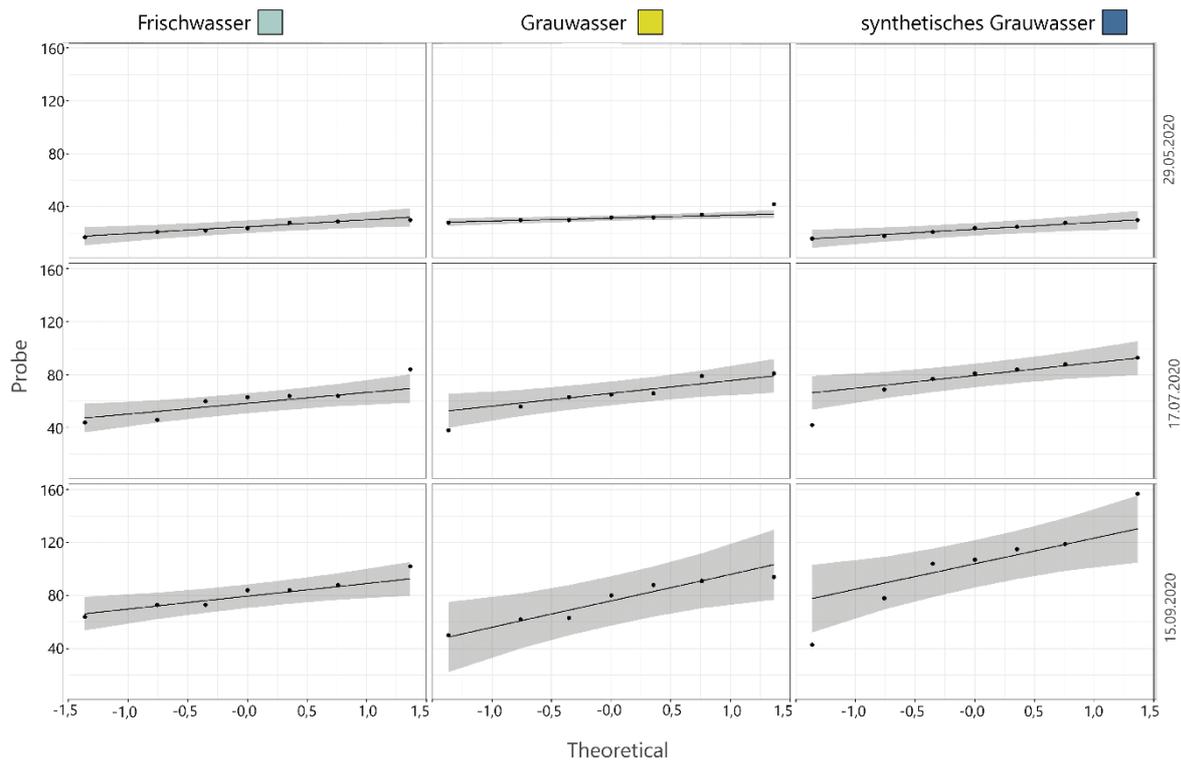


### Geranium | Blattanzahl



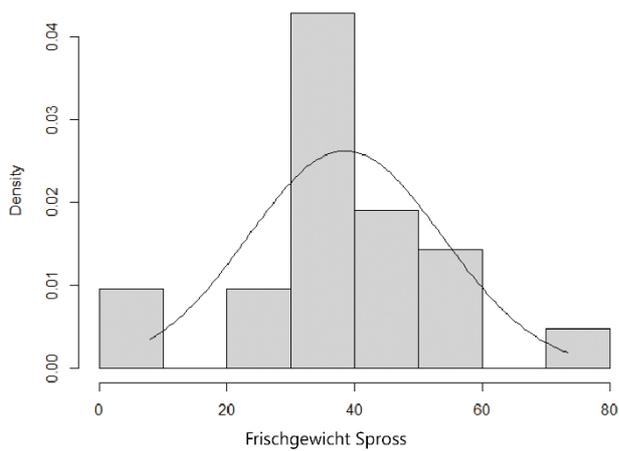
### Hedera | Blattanzahl



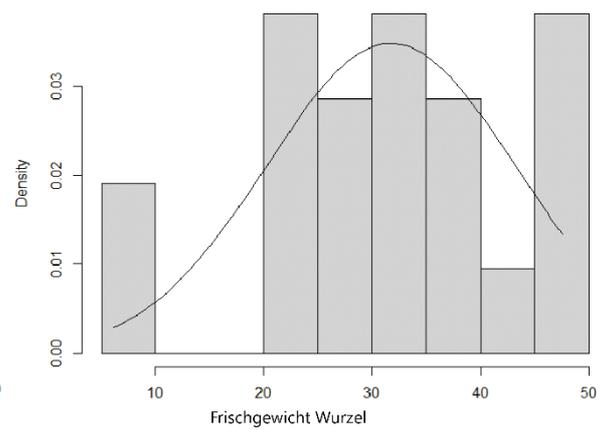


## 11.4 | Frischgewicht Spross und Wurzel

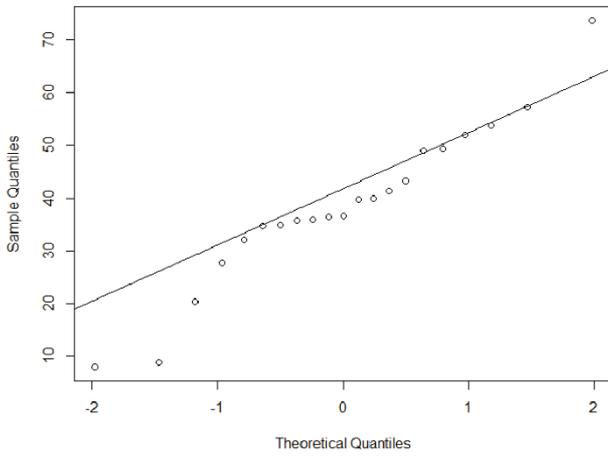
Geranium | Histogramm



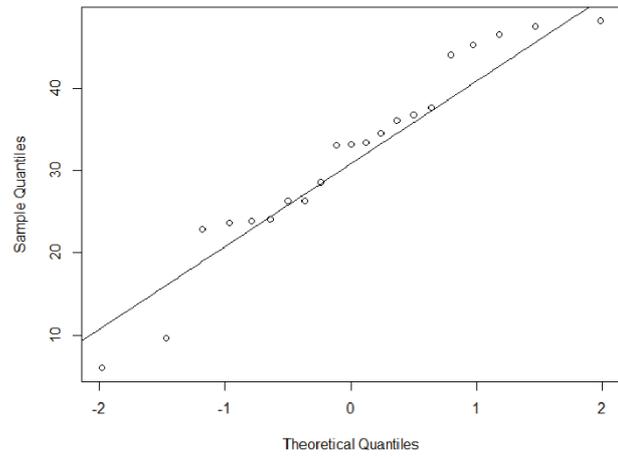
Geranium | Histogramm



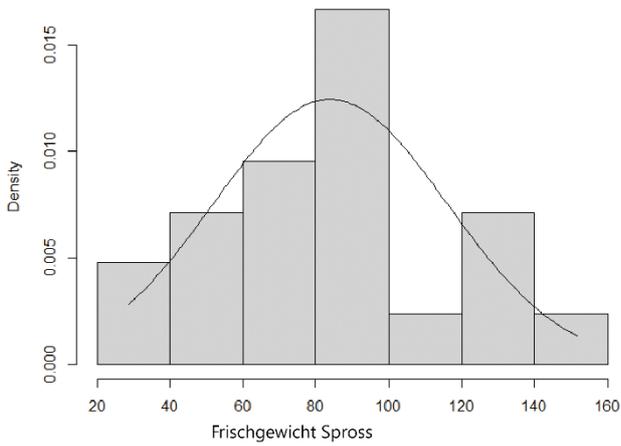
Geranium Frischgewicht Spross | QQ-Plot



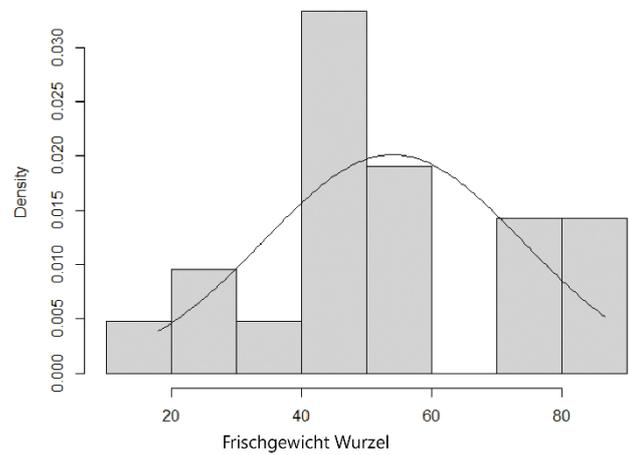
Geranium Frischgewicht Wurzel | QQ-Plot



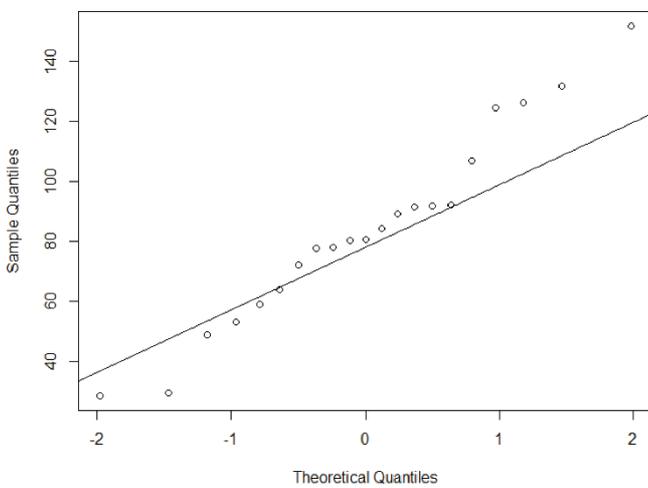
Hedera | Histogramm



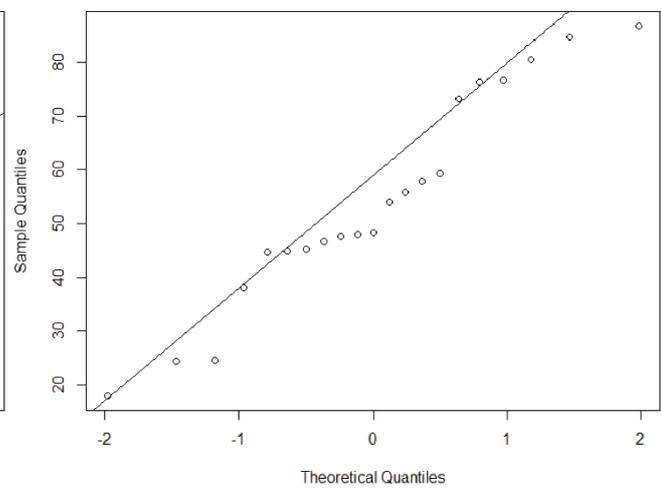
Hedera | Histogramm



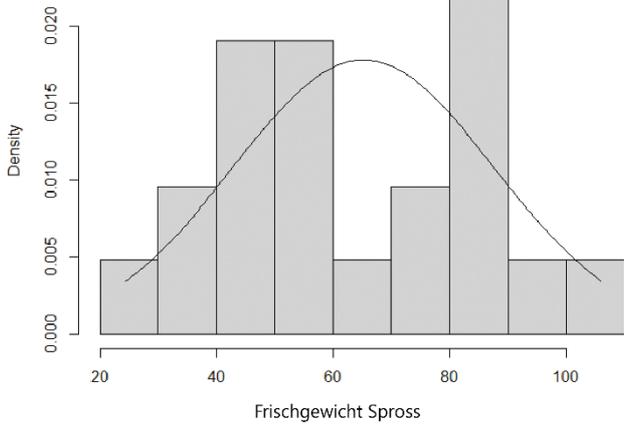
Hedera Frischgewicht Spross | QQ-Plot



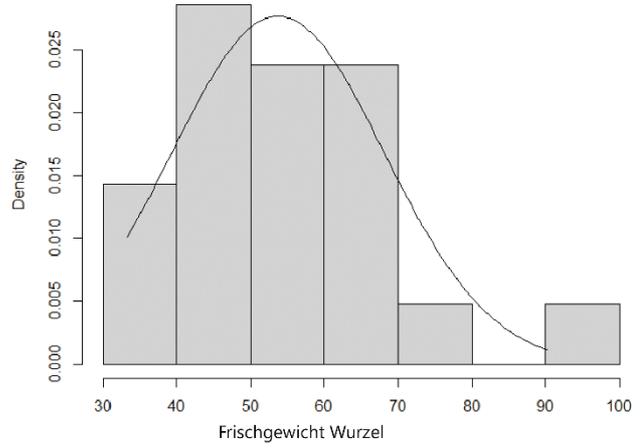
Hedera Frischgewicht Wurzel | QQ-Plot



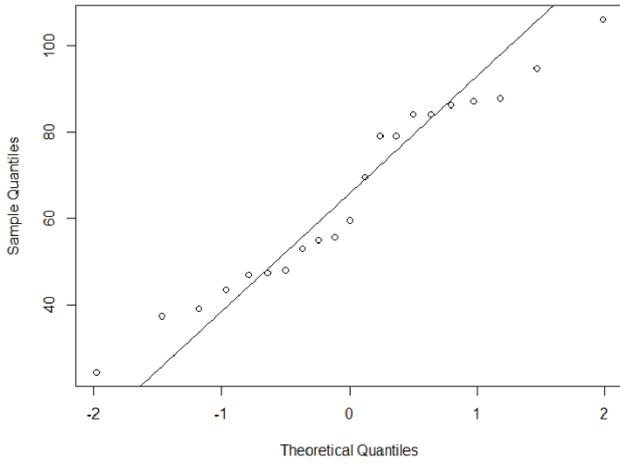
Heuchera | Histogramm



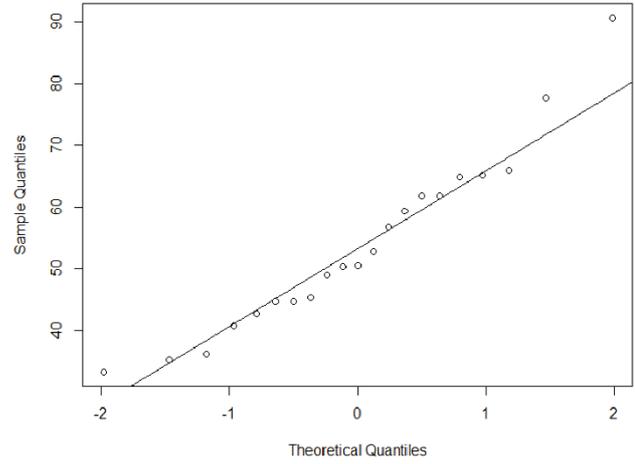
Heuchera | Histogramm



Heuchera Frischgewicht Spross | QQ-Plot

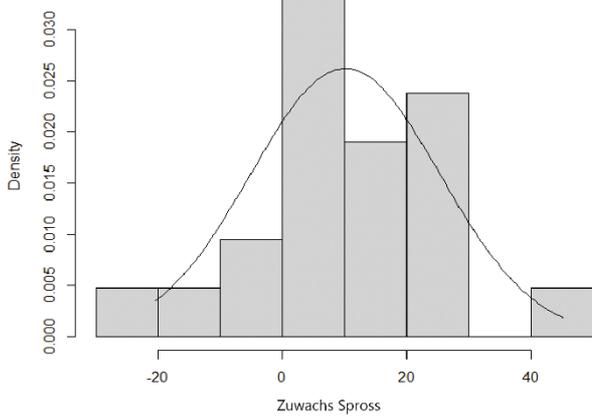


Heuchera Frischgewicht Wurzel | QQ-Plot

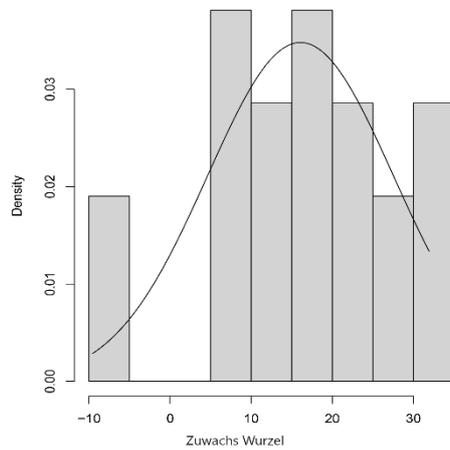


## 11.5 | Zuwachs Biomasse

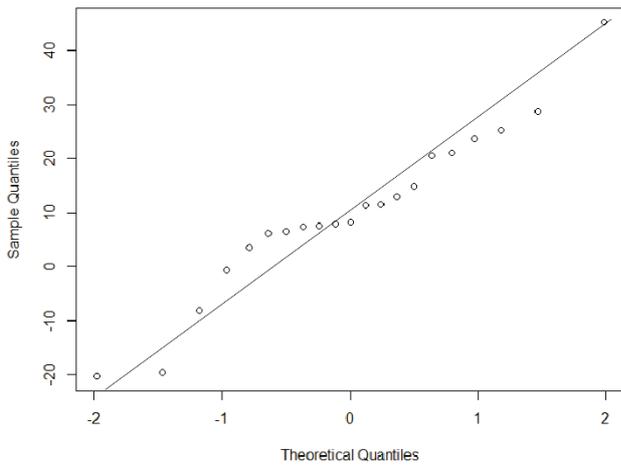
Geranium | Histogramm



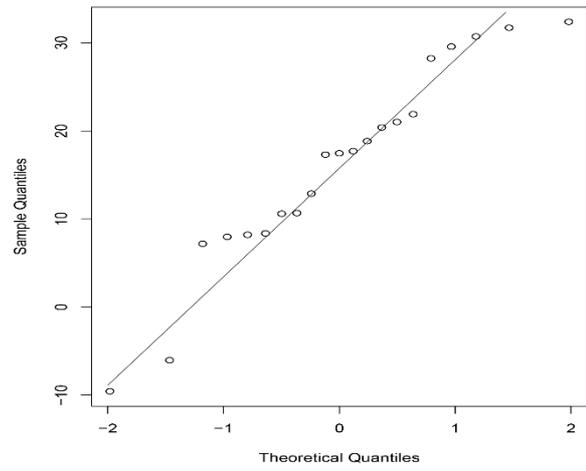
Geranium | Histogramm



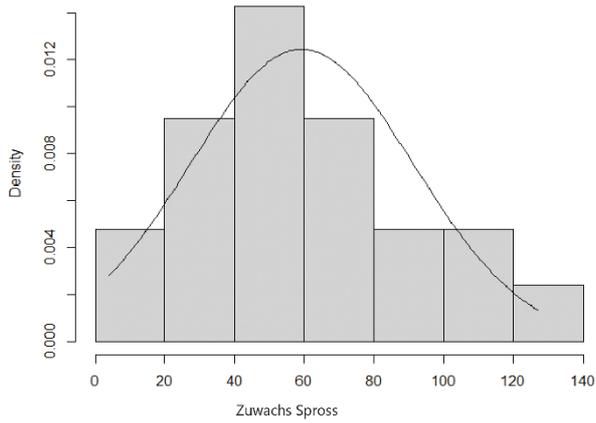
Geranium Zuwachs Spross | QQ-Plot



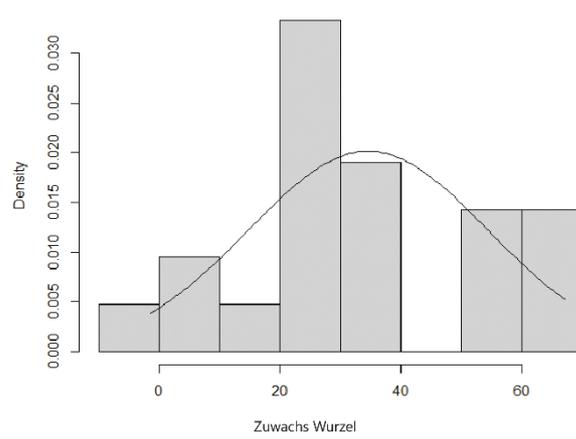
Geranium Zuwachs Wurzel | QQ-Plot



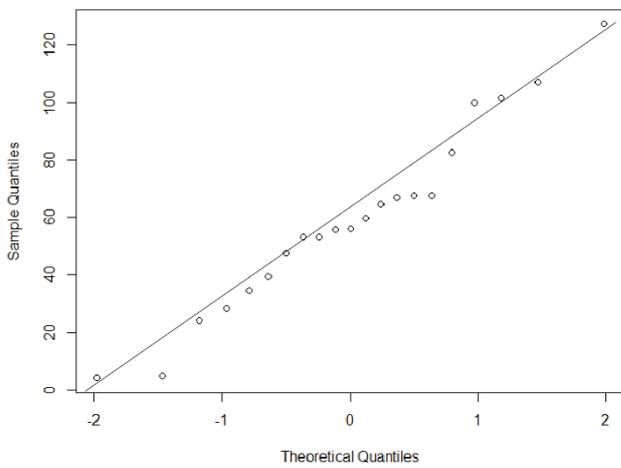
Hedera | Histogramm



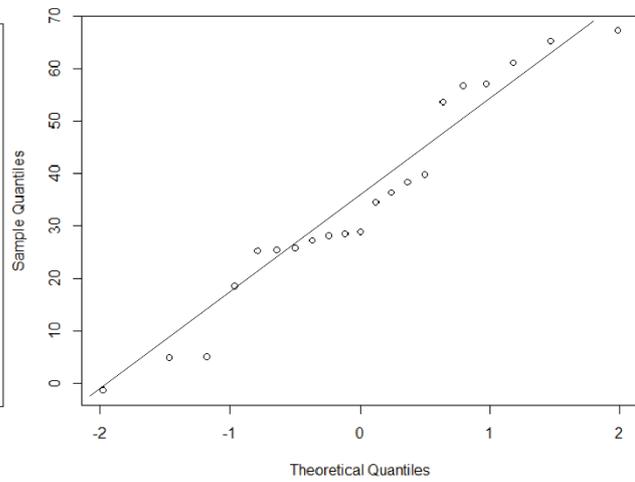
Hedera | Histogramm



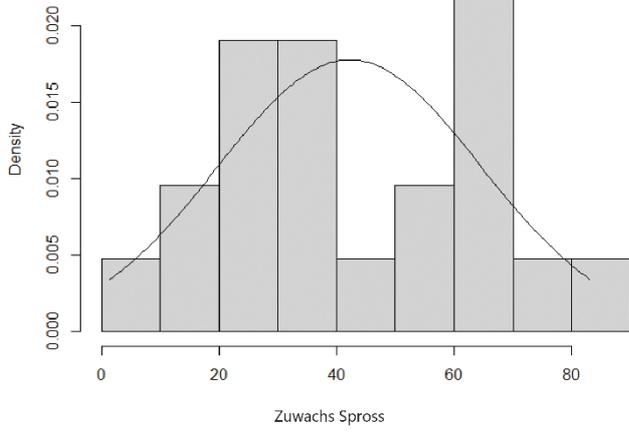
Hedera Zuwachs Spross | QQ-Plot



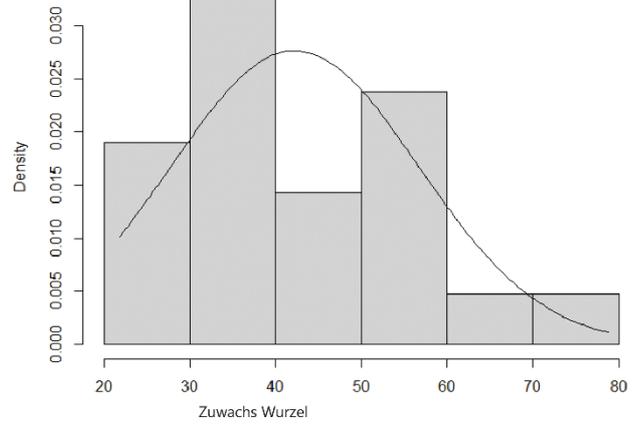
Hedera Zuwachs Wurzel | QQ-Plot



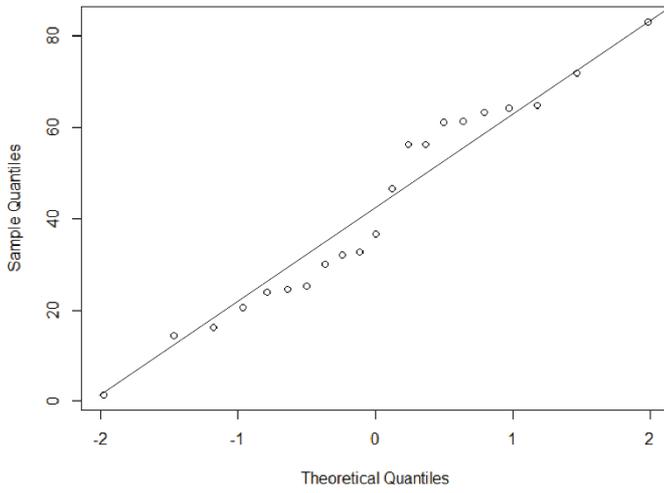
Heuchera | Histogramm



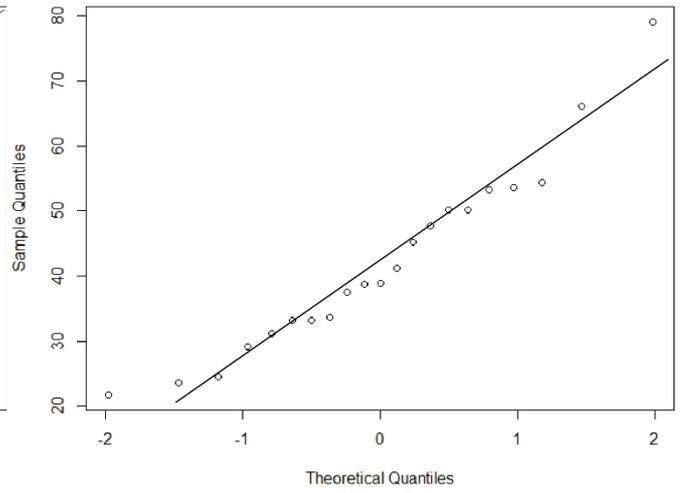
Heuchera | Histogramm



Heuchera Zuwachs Spross | QQ-Plot

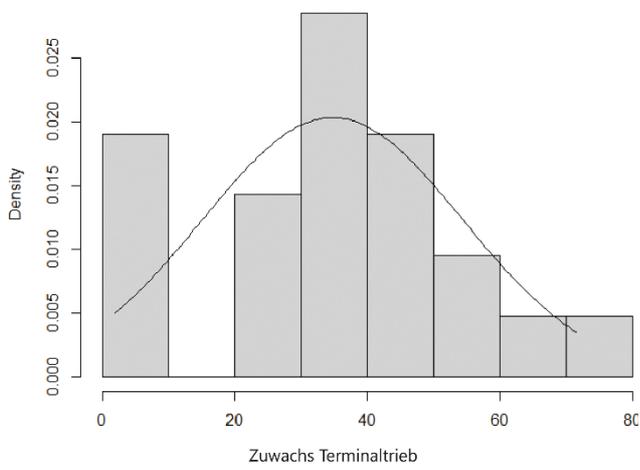


Heuchera Zuwachs Wurzel | QQ-Plot

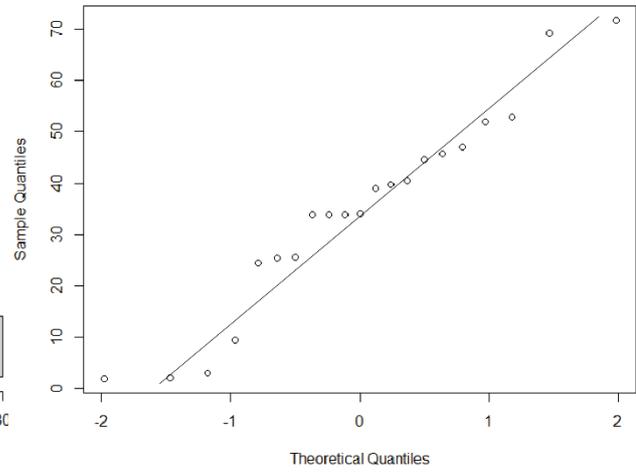


## 11.6 | Zuwachs Terminaltrieb

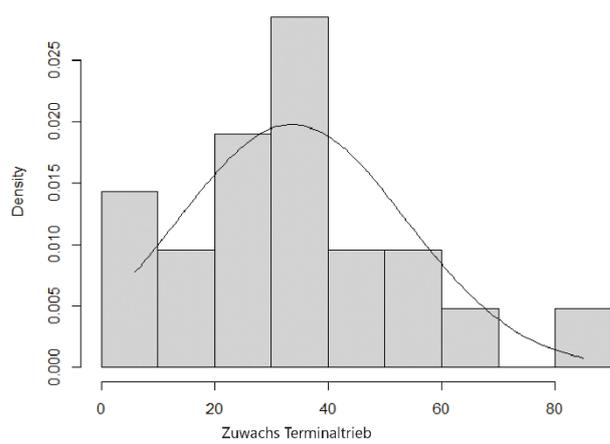
Acer | Histogramm



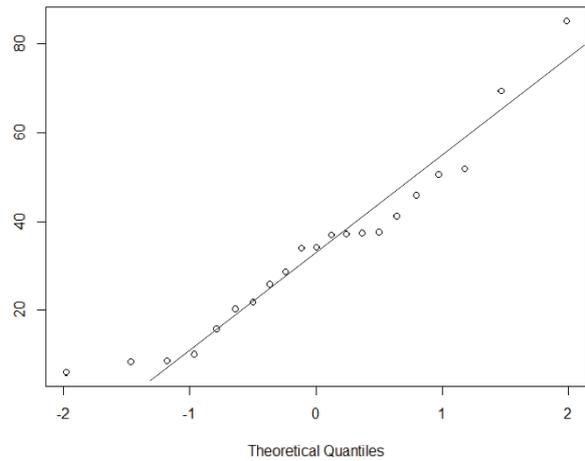
Acer Zuwachs Terminaltrieb | QQ-Plot



Tilia | Histogramm

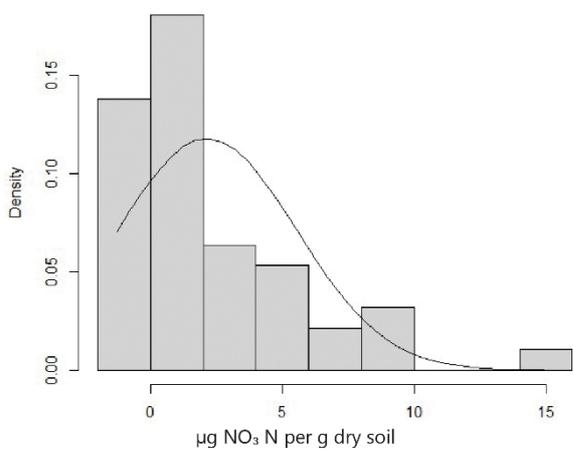


Tilia Zuwachs Terminaltrieb | QQ-Plot

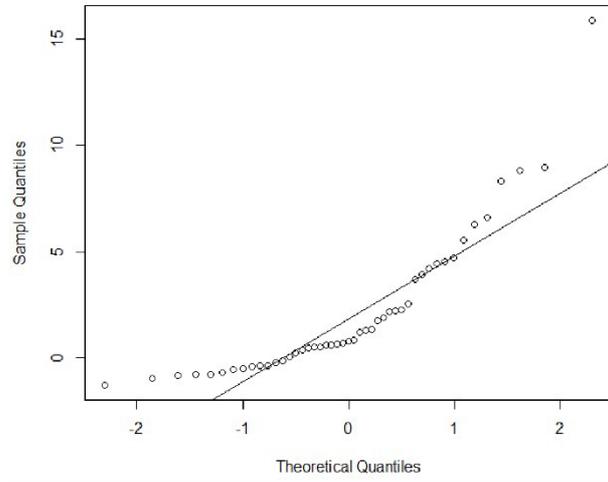


# 11.7 | Bodenanalytik

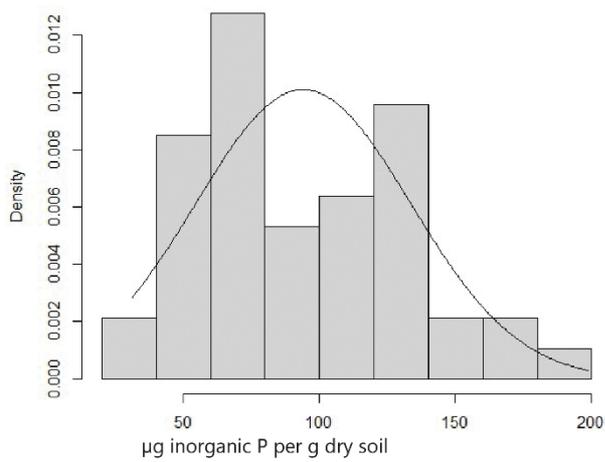
### Nitrat | Histogramm



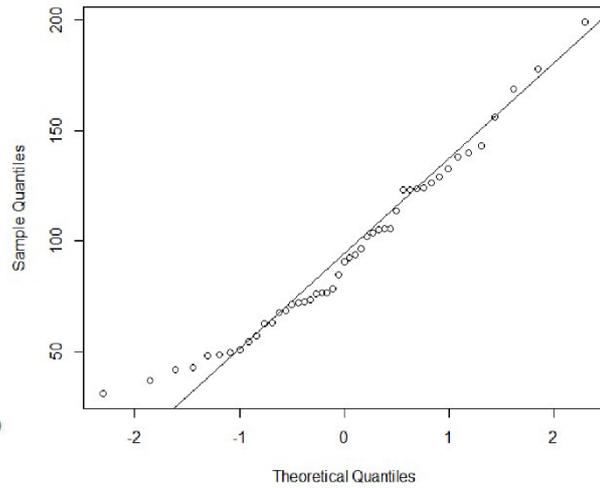
### Nitrat | QQ-Plot



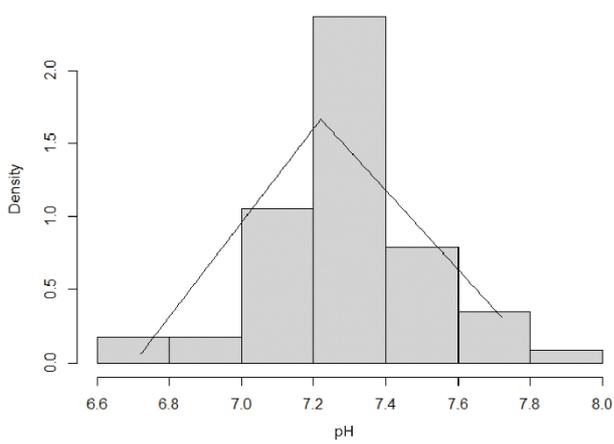
### Phosphat | Histogramm



### Phosphat | QQ-Plot



### pH-Wert | Histogramm



### pH-Wert | QQ-Plot

