



GRAUWASSERREINIGUNG IN FASSADENGEBUNDENEN BEGRÜNUNGSSYSTEMEN

**Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur**

eingereicht von:
RIBEIRO, GUILHERME

Betreuer: Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Günter Langergraber

Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Bernhard Pucher

Vorwort

Diese Masterarbeit wurde am Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz an der Universität für Bodenkultur in Wien unter der Leitung von Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Günter Langergraber und Dipl.-Ing. Bernhard Pucher durchgeführt.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Pucher meinen besonderen Dank für die Unterstützung bei der Umsetzung dieser Arbeit aussprechen. Vor allem bedanke ich mich für die mir gegenüber aufgewendete Zeit, die Bereitstellung von Literatur und Unterlagen sowie den ständigen Beistand bei der Durchführung der Versuche.

Außerdem möchte ich Herrn Friedrich Kropitz danken, der mich mit seinem technischen Know-how sehr unterstützt hat und mir bei allen Fragen zur Seite stand.

Von ganzem Herzen möchte ich meiner Familie danken, die mir während meiner Studienzeit stets mit mentaler Unterstützung zur Seite stand. Vor allem danke ich meiner Frau, die mich immer auf Trab gehalten und an mich geglaubt hat.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Zielsetzung, Aufgabenstellung und Gliederung	2
3. Allgemeine Grundlagen	3
3.1 Wassergebrauch	3
3.2 Grauwasseranfall	4
3.2.1 Wiedernutzung von Grauwasser	6
3.3 Bepflanzte Bodenfilter	7
3.3.1 Horizontal durchflossene Filter (HF)	7
3.3.2 Vertikal durchflossene Filter (VF)	8
3.4 Fassadenbegrünung	9
3.5 Grauwasserreinigung in Fassadenbegrünung	10
4. Material und Methoden	11
4.1 Methodik der Literaturrecherche	11
4.2 Synthetisches Grauwasser	11
4.3 Anlagenbeschreibung	12
4.4 Versuchsprogramm, Beschickung und Probenahme	13
4.5 Hydraulik	14
4.6 Abflussverhalten	15
4.7 Mann-Whitney-U-Test	15
5. Ergebnisse und Diskussion	16
5.1 Ergebnisse der Literaturrecherche	16
5.2 Versuchsdurchführung	21
5.2.1 Synthetisches Grauwasser	21
5.2.2 Hydraulik	21
5.2.3 Abflussverhalten	22
5.2.4 Reinigungsleistung des Systems	23
5.2.5 Vergleich zwischen Einfahrphase und Phase II	28
5.2.6 Analyse der einzelnen Wannen	30
5.3 Statistische Auswertung mittels Mann-Whitney-U-Test	35
6. Diskussion	36
7. Schlussfolgerungen und Ausblick	38
8. Zusammenfassung	39
9. Literatur	40
10. Abbildungsverzeichnis	43
11. Tabellenverzeichnis	44
12. Anhang	46
12.1 Synthetisches Grauwasser – Herstellungsablauf und Rezepte	46
12.2 Anlagenbilder	48
12.3 Zu- und Ablauf Analytik	49

13. Lebenslauf	50
14. Eidesstattliche Erklärung	52

Abkürzungen

GW	Grauwasser
HF	Horizontaldurchströmter Filter
VF	Vertikaldurchströmter Filter
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff
TN _b	Gesamter gebundener Stickstoff
P _{ges}	Gesamtphosphor
TSS	Gesamtmenge der gelösten Feststoffe
OLR	Organische Belastungsrate
HLR	Hydraulische Belastungsrate
LW	Living Wall (Fassadengebundene Begrünung)

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Eignung von Living Walls (LW) zur Reinigung von Grauwasser (GW). Hierfür wurden Untersuchungen in einer Versuchsanlage mit zwei unterschiedlichen Durchströmungsrichtungen (HF - Horizontaldurchströmter Filter und VF - Vertikaldurchströmter Filter) am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz (SIG) der BOKU Wien durchgeführt.

Das für diese Studie benötigte GW wurde mit handelsüblichen Produkten aus einem Supermarkt hergestellt. Damit wurde das gesamte in einem zwei Personen Haushalt anfallende GW simuliert. Um die Reinigungsleistung der Anlage feststellen zu können, wurden regelmäßige Messungen durchgeführt. Es wurden Parameter, wie zum Beispiel CSB, BSB₅, NH₄-N, NO₃-N analysiert. Die Analyse wurde vom Labor des SIGs durchgeführt.

Die Anlage wurde von April bis November 2019 betrieben, innerhalb von 225 Tagen wurden insgesamt 26 Proben des Zuflusses sowie 24 Proben der Abflüsse genommen. Die in dieser Zeit gewonnenen Werte ermöglichten den Vergleich beider Anlagenteile sowie die Gegenüberstellung mit Werten von Versuchen aus ausgewählter Fachliteratur.

Es konnte beobachtet werden, dass vor allem in Phase II Nitrifikation stattgefunden hat. In Bezug auf CSB und BSB₅ konnten weitere Abbauvorgänge festgestellt werden. Die Abbauleistung im Bereich des CSB lag im Schnitt bei 73% für den HF_LW und 76% für den VF_LW. Beim BSB₅ lag die Abbauleistung bei 78% für den HF_LW und 87% für den VF_LW.

Zwischen HF_LW und VF_LW wurde für die CSB Elimination kein signifikanter Unterschied festgestellt. Für NH₄-N und NO₃-N konnte hingegen ein signifikanter Unterschied der Ablaufkonzentrationen festgestellt werden. Erst durch die Betrachtung der Mittelwerte wurde erkennbar, dass der VF_LW im Schnitt eine bessere Reinigungsleistung aufweist.

Abstract

This work deals with the suitability of Living Walls (LW) for cleaning gray water (GW). For this purpose, investigations were carried out in a test facility with two different flow directions (HF - horizontal flow and VF - vertical flow) at the Institute for Sanitary Engineering and Water Pollution Control (SIG) at BOKU Vienna.

The GW required for this study was produced using commercially available products from a supermarket. The entire GW occurring in a two-person household was thus simulated. Regular measurements were carried out to determine the cleaning performance of the system. Parameters such as COD, BOD₅, NH₄-N, NO₃-N were analyzed. The analysis was carried out by the SIG laboratory.

The test facility was operated from April to November 2019, a total of 26 samples of the inflow and 24 samples of the outflow were taken within 225 days. The values obtained during this time made it possible to compare both parts of the system and to compare them with values from scientific attempts from selected specialist literature.

It could be observed that nitrification took place mainly in Phase II. With regard to COD and BOD₅, further degradation processes could be determined. The efficiency of degradation in the area of COD was on average 73% for the HF_LW and 76% for the VF_LW. With the BOD₅ the degradation rate was 78% for the HF_LW and 87% for the VF_LW.

No significant difference was found for the COD elimination between HF_LW and VF_LW. For NH₄-N and NO₃-N, however, a significant difference in the effluent concentrations was found. Only by looking at the mean values it can be seen that the VF_LW has a better cleaning line on average.

1. Einleitung

Städtische Siedlungsgebiete unterscheiden sich in vielen Punkten stark von den umgebenden ruralen Gebieten, so auch in den klimatischen Komponenten wie dem Niederschlag, den Windverhältnissen und der Temperatur – die Folge sind so genannte städtische Hitzeinseln (MA 22, 2015). Die Schaffung von grünen Inseln könnte dieses Problem für die unmittelbare Umgebung mildern. Bedingt durch fehlendes Raumangebot in dicht bebautem städtischem Gebiet gewinnen Fassadenbegrünungen an Bedeutung. Sie stellen eine naturnahe Klimaanlage dar. Im Sommer kühlen sie die Wände, im Winter wirken sie wärmedämmend (MA 22, 2013).

Der Wasserbedarf solcher Systeme wird hauptsächlich mit Trinkwasser gedeckt. Die Nutzung von Grauwasser (Abwasser, das bei häuslicher Verwendung von Trinkwasser entstanden ist, z.B. Wasser aus Dusch- oder Waschmaschinenabläufen, jedoch ohne Abwasser aus dem WC (ÖVGW, 2005)), um Fassadenbegrünungen zu bewässern, stellt eine nachhaltige Alternative zu Trinkwasser dar.

Die OECD hält fest, dass die Süßwasserressourcen von großer ökologischer und ökonomischer Bedeutung sind. Ihre Verteilung zwischen und in den Ländern variiert stark. In ariden Regionen können die Süßwasserressourcen bisweilen so begrenzt sein, dass der Wasserbedarf nur in einer Weise gedeckt werden kann, die nicht mehr nachhaltig ist (OECD, 2014). Daher sollte wann immer möglich an Wasserwiederverwendung gedacht werden.

Auch in Österreich und Europa ist und wird es zunehmend notwendig sein, sich mit dem Thema der Wiedernutzung von Wasser auseinanderzusetzen. Wasser zu recyceln und wieder zu verwenden, muss nicht nur auf die üblichen Kläranlagen beschränkt bleiben. Teile der Abwässer können auch direkt vor Ort aufbereitet werden.

Die vorliegende Arbeit setzt sich mit der Grauwasseraufbereitung in so genannten Fassadenbegrünungssystemen auseinander.

Fassadenbegrünungen gibt es in unterschiedlichen Varianten. Sie können nach der Bauweise unterschieden werden in fassadengebundene Begrünung und bodengebundene Begrünung. Für diese Arbeit sind die unterschiedlichen Durchströmungsformen (HF_LW und VF_LW) der fassadengebundenen Begrünung und ihre Funktionsweise von Bedeutung.

Um GW wieder verwenden bzw. in den Gebrauchswasserkreislauf einspeisen zu können, sollten die darin enthaltenen Schadstoffe bestimmte Werte nicht überschreiten. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) bezeichnet die Wiedernutzung von Grauwasser als ausschlaggebende Ressource für die landwirtschaftliche Produktion und somit als Mittel im Kampf gegen Hunger und Armut (WHO, 2006).

Fassadenbegrünungen sind in der Lage, Grauwasser zu behandeln. Pradhan et al., (2019) fasst einige Studien zusammen, die sich diesem Thema gewidmet haben. Dennoch fehlte bis dato ein direkter Vergleich zwischen einem horizontal- und einem vertikaldurchströmten Filter.

2. Zielsetzung, Aufgabenstellung und Gliederung

Bei der Erstellung dieser Masterarbeit wurden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Durchführung einer Literaturrecherche zur Identifikation von potenziellen vergleichbaren Studien zum Thema GW-Reinigung in fassadengebundenen Begrünungssystemen.
- Betrieb einer fassadengebundenen Begrünung mit zwei unterschiedlichen hydraulischen Konfigurationen (VF und HF), um Kenntnisse über die jeweiligen Reinigungsprozesse zu vertiefen und die Frage zu beantworten, ob es wesentliche Unterschiede gibt.
- Regelmäßige Durchführung von Probenahmen zur analytischen Bestimmung von für GW relevanten Parametern, wie zum Beispiel CSB, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$.
- Andenken von Empfehlungen für den Betrieb von fassadengebundenen Begrünungssystemen zur GW-Reinigung auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse.

Struktur der Arbeit:

In Kapitel 3 werden die allgemeinen Grundlagen, welche das theoretische Grundgerüst dieser Masterarbeit darstellen, beschrieben. Dieses Kapitel wird in die drei Bereiche GW, naturbasierte Reinigungssysteme und Fassadenbegrünung unterteilt.

Kapitel 4 beschreibt die angewandten Methoden beginnend mit der Darstellung der Literaturrecherche. Ebenfalls beschrieben wird die für die Durchführung der Versuche und für die Gewinnung von Daten relevante Herangehensweise.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche und aller durchgeführten Versuche sowie die gewonnenen Datensätze werden in Kapitel 5 dargestellt und interpretiert.

Schließlich werden in Kapitel 6 die Ergebnisse dieser Masterarbeit mit internationalen Versuchen, mit Grenzwerten für die Wiedernutzung von Wasser sowie mit der österreichischen Emissionsbegrenzung verglichen. Im Kapitel 7 finden sich Schlussfolgerungen und ein kurzer Ausblick. Kapitel 8 fasst die Arbeit nochmals kurz zusammen.

3. Allgemeine Grundlagen

3.1 Wassergebrauch

Wasser kann im globalen Wasserkreislauf nicht verbraucht werden, daher wird hier der Begriff Wassergebrauch anstatt des eher gebräuchlichen Wasserverbrauchs verwendet (BMLFUW, 2010).

Der globale Wassergebrauch schwankt sehr stark. In Europa liegt der Durchschnitt bei 124 L/Ed, in den USA bei 262 L/Ed und Australien bei 412 L/Ed (Grafton et al., 2011; BMLFUW, 2010). Abbildung 3-1 zeigt den Pro-Kopf-Wassergebrauch für Länder in Europa und Nordamerika sowie Australien und Südkorea. Die unten angezeigten Pro-Kopf-Wassergebrauchsmengen sind als Menge zu verstehen, die in erster Linie in Haushalten und mitversorgten Kleingewerben abgegeben werden.

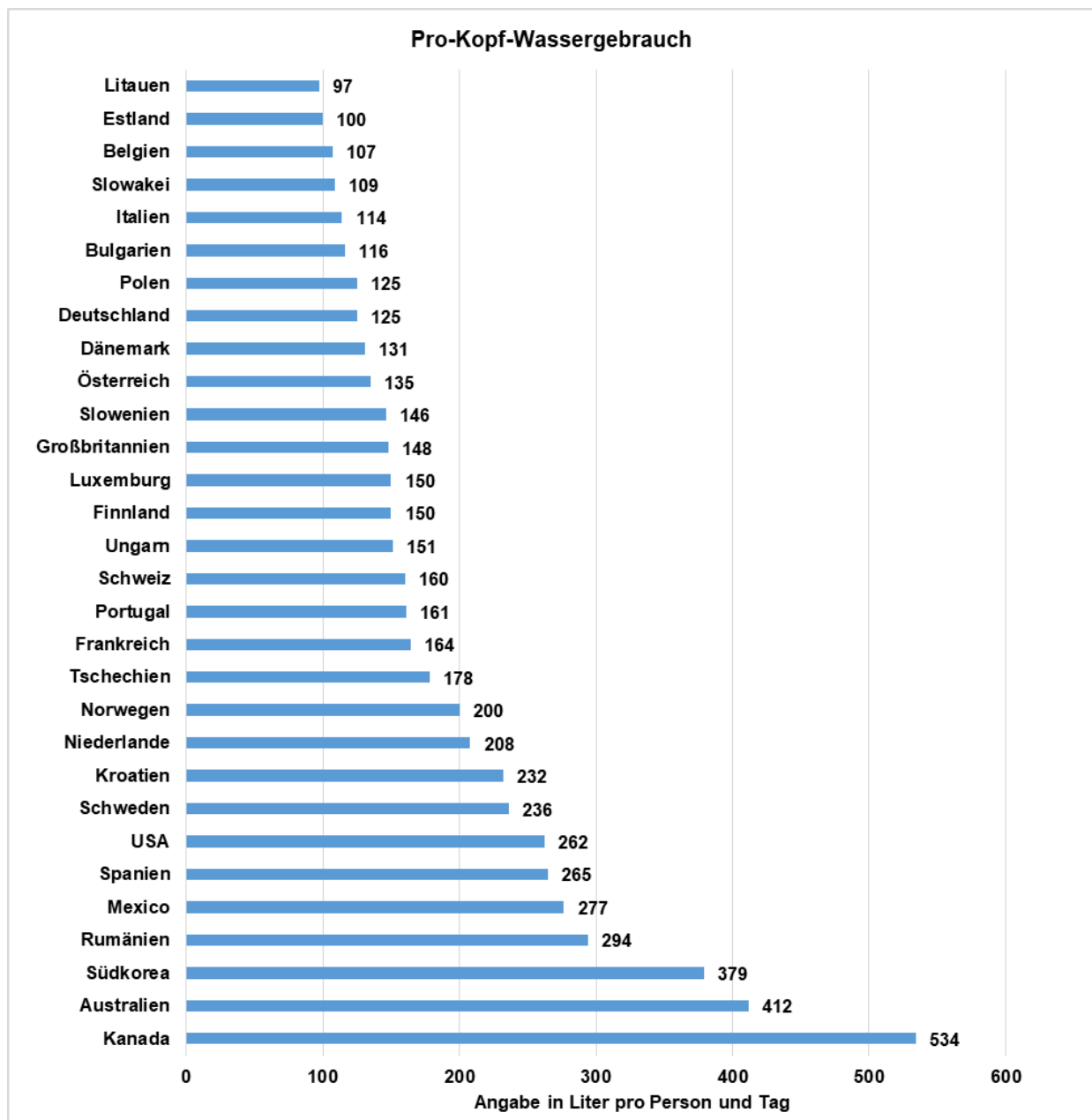


Abbildung 3-1: Weltweiter Pro-Kopf-Wassergebrauch (UBA, 2014; Grafton et al., 2011; BMLFUW, 2010, 2012)

Der größte Teil der weltweiten Wassergebrauchsmenge stammt aus Oberflächengewässern. Wasser ist regional sowie zeitlich unterschiedlich verteilt, daher ist die Versorgung meistens nur in der Theorie sichergestellt.

Diese und andere auftretende Probleme können Auswirkungen auf globaler Ebene hervorrufen, wie Migrationsströme, Umweltbeeinträchtigungen sowie weitere Konflikte (BMLFUW, 2010).

Der größte Teil des Trinkwassers wird nach häuslichem Gebrauch zu Abwasser.

3.2 Grauwasseranfall

Häusliches Abwasser kann in zwei unterschiedliche Hauptströme geteilt werden, Schwarz- (SW) und Grauwasser (GW). SW besteht aus Toilettenabwasser (mit Fäkalien und Urin). GW kann wiederum in schwach- oder starkbelastetes GW unterteilt werden. Schwachbelastetes GW besteht hauptsächlich aus Badezimmer- und Waschbeckenabwässern und starkbelastetes GW aus Abwässern von Küche, Geschirrspüler und Waschmaschine (Gross et al., 2015).

Diese Teilströme unterscheiden sich nicht nur in der Quantität sondern auch in der Qualität. Sie weisen Belastungen unterschiedlicher Nähr- und organischer Stoffe auf.

GW ist für 55 bis 70% des täglichen Anteils an TSS und BSB₅ verantwortlich, der im kommunalen Abwasser anfällt. Der Teilstrom aus Küchenabwässern ist für circa 42% des CSB und 48% des BSB₅ der gesamten täglichen Fracht verantwortlich. Ein großer Betrag an Natrium, Phosphat und CSB (40%, 37% und 22% der täglichen Fracht) stammt aus der Waschmaschine. Der Geschirrspüler wiederum hat einen sehr geringen quantitativen Beitrag (ca. 5%), dennoch ist er ein signifikanter Phosphat- und Bor-Lieferant (Friedler, 2004).

Im Schnitt fallen 27% des häuslichen Abwassers als SW an. Die restliche Menge fällt als GW an, dies bedeutet ein sehr großes Wiedernutzungspotenzial (siehe Abbildung 3-2).

In Tabelle 3-1 sind typische Konzentrationswerte für Grauwasser aufgelistet und Tabelle 3-2 gibt einen Überblick auf Konzentrationswerte ausgewählter Länder.

Tabelle 3-1: Beschaffenheit von GW (DWA, 2008)

Parameter - mg·L ⁻¹	Grauwasser Gesamt	Schwachbelastet	Starkbelastet
TS	159	87	400
BSB ₅	218	138	656
CSB	545	283	1780
N	15.4	10	37
P	5.4	3.3	24
K	8.8	-	-
S	72	28	-

Tabelle 3-2: GW Eigenschaften in unterschiedlichen Ländern (Morel und Diener, 2006; Ghaitidak und Yadav, 2013)

Parameter	Tagesmenge	CSB	BSB ₅	NH ₄ -N	PO ₄ -P	N _{ges}	P _{ges}
Einheit	L	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹
Costa Rica	107	-	167	-	16	-	-
Palästina	50	1270	590	3.8	4.4	-	-
Israel	100	822	477	1.6	126	10-34.3	1.9-48
Nepal	72	411	200	13.3	3.1	-	-
Malaysia	225	212	129	13	-	-	4.5
Jordanien	30	58-1712	275-2287	-	-	6.44-52	0.69-51.58
USA	196	-	86	-	-	13.5	4
Großbritannien	96	840-1340	39-155	-	-	4.6-10.4	0.4-0.9
Deutschland	86	109	59	-	-	15.2	1.6
Spanien	-	151-177	-	-	-	10-11	-
Schweden	-	890	425	-	-	75	4.2
Indien	-	250-375	100-188	-	-	-	0.012
Niger	-	-	106	-	-	-	-
Pakistan	-	146	56	-	-	-	-
Taiwan	-	55	23	-	-	-	-
Tunesien	-	102	97	-	-	8.1	-
Türkei	-	190-350	91	-	-	7.6	7.2
Jemen	-	2000	518	-	-	-	-
Japan	-	675	-	-	-	25.6	1.1
Süd-Korea	-	-	255	-	-	-	-
Oman	161	58-486	25-562	-	-	-	-

Nicht nur der qualitative Betrag ist hier von Bedeutung sondern auch der quantitative. Die Form der Nutzung von Wasser in den Haushalten weltweit unterscheidet sich je nach Lage, Verfügbarkeit, Konsumverhalten und ökonomischem Status (Gross et al., 2015). In Abbildung 3-2 sind die Abwasser-Teilströme nach Ländern aufgeteilt.

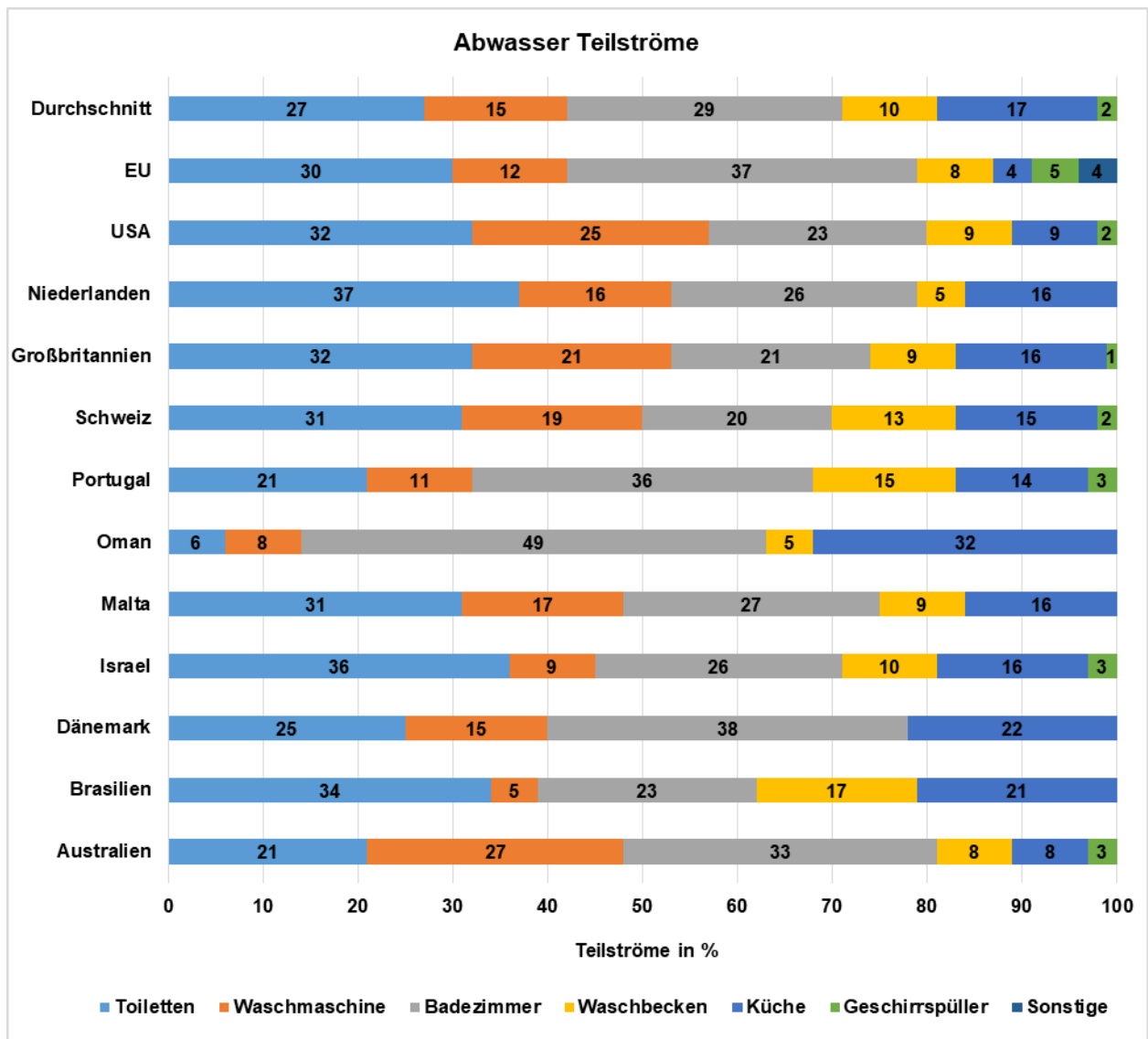


Abbildung 3-2: Abwasser Teilströme bezogen auf die Menge in verschiedenen Ländern (Gross et al., 2015; BMLFUW, 2010)

3.2.1 Wiedernutzung von Grauwasser

Die Wiedernutzung von GW als Betriebswasser gewinnt weltweit immer mehr an Bedeutung, vor allem dort, wo Wasserknappheit ein Thema ist. Dennoch fehlt es an internationalen Richtlinien und Regelwerken. Einige Länder haben bereits Grenzwerte für die Wiedernutzung von Wasser festgelegt, wie in Tabelle 3-3 ersichtlich ist.

Tabelle 3-3: Grenzwerte für die Wiedernutzung von Wasser in verschiedenen Ländern (Sanz und Gawlik, 2014; Vuppaladadiyam et al., 2019)

Parameter	CSB	BSB ₅	N	P
Einheit	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹
Zypern	70	10 - 70	15	2 - 10
Deutschland	-	20	-	-
Frankreich	60	-	-	-
Griechenland	-	10 - 25	30	1 - 2
Italien	100	20	15	2
Spanien	-	-	10	2
Indien	<250	<30	<50	-
China	<15	10-20	15-20	1-5
Australien	20	-	-	-
Japan	-	<20	-	-
Jordan	100-500	30-300	50-70	30
Slowenien	200	30	10	1
USA	-	<10	-	-
Kanada	<150	<50	-	-

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat im Jahr 2006 eine Broschüre veröffentlicht mit Empfehlungen zur Wiedernutzung von SW und GW. Hier liegt der Fokus auf der Wiedernutzung in der Landwirtschaft (WHO, 2006).

In Deutschland publizierte die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) im Jahr 2017 das Merkblatt DWA-M 277 (Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen), darin wird die Verwendung von GW als Betriebswasser, wie folgt, vorgeschlagen (DWA, 2017):

- Toilettenspülung
- Textilwaschmaschinen und (untergeordnete) Gebäudereinigung
- Grauwassernutzung im öffentlichen und gewerblichen Bereich (Reinigung von Betriebsflächen und Fahrzeugen zum Beispiel)
- Bewässerung im privaten und öffentlichen Bereich

3.3 Bepflanzte Bodenfilter

Bepflanzte Bodenfilter kommen sowohl zur Abwasserreinigung als auch zur Grauwasserreinigung zum Einsatz. Sie wurden entwickelt, um natürliche Prozesse zu optimieren und sind umweltfreundliche und nachhaltige Optionen für die Abwasserbehandlung (Dotro et al., 2017). Sie werden je nach Strömungsrichtung in horizontal- und vertikal durchflossene Filter unterteilt (Morel und Diener, 2006).

3.3.1 Horizontal durchflossene Filter (HF)

Beim HF fließt das Abwasser auf einer Seite des Filterkörpers hinein und durchfließt diesen langsam. Die Beschickung erfolgt in der Regel kontinuierlich im freien Gefälle. Der Auslass befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite (siehe Abbildung 3-3). Das Abwasser wird dem Filterkörper über einen relativ kleinen seitlichen Infiltrationsquerschnitt zugeführt. Der erforderliche Infiltrationsquerschnitt wird durch die Abwassermenge, die Durchlässigkeit des

Filtermaterials und das hydraulische Gefälle im Bodenfilter bestimmt (Geller und Höner, 2003; GIZ, 2011).

Die erste Behandlungsstufe ist erforderlich, um Partikel zu entfernen, die zu einer Filterverstopfung führen können. Der Wasserspiegel bleibt konstant unter der Filteroberfläche. Durch die Wassersättigung herrschen im HF hauptsächlich anaerobe (ohne Sauerstoff und ohne Nitrat) oder anoxische (ohne Sauerstoff, aber mit Nitrat für die Nitrifikation) Abbauprozesse (Dotro et al., 2017; Gujer, 2007).

Die organischen Abbauprozesse finden auf der Oberfläche der Filterpartikel und Pflanzenwurzeln statt und werden durch Bakterien betrieben. Hier spielt der Sauerstoffgehalt eine wichtige Rolle. Durch den geringen Eintrag, kann Sauerstoff zu einem limitierenden Faktor werden (GIZ, 2011).

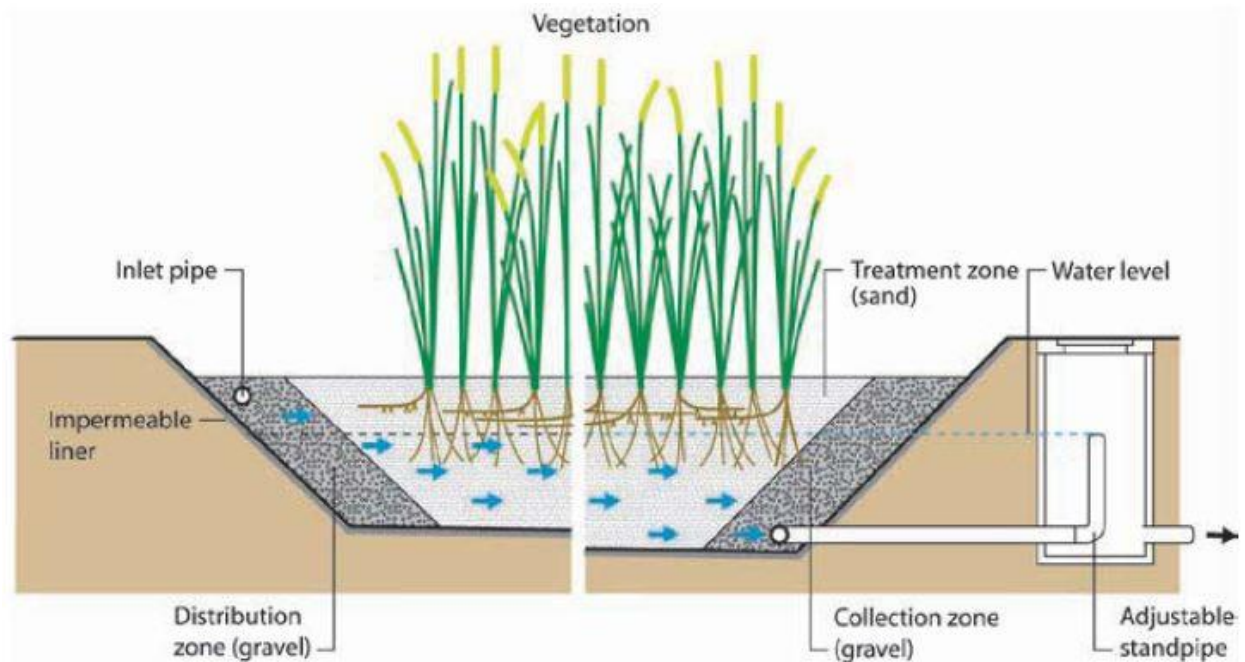


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines HF (Morel und Diener, 2006)

In Bezug auf die Abbauleistung sollten bestimmte Grenzen nicht überschritten werden. Für OLR liegt diese bei $4-10 \text{ gBSB}_5 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ oder $16 \text{ gCSB} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, bei HLR bei maximal $60-80 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ für Grauwasser und $40 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ für Abwasser. Wobei die organische Fracht einen limitierenden Faktor darstellt. Das bedeutet, beim leichten Grauwasser kann eine höhere Beschickungsmenge angewendet werden (GIZ, 2011).

3.3.2 Vertikal durchflossene Filter (VF)

Beim VF wird das Wasser von oben beschickt, durchfließt den Filterkörper vertikal nach unten und fließt durch ein am Filterbett liegendes Rohr wieder ab (siehe Abbildung 3-4).

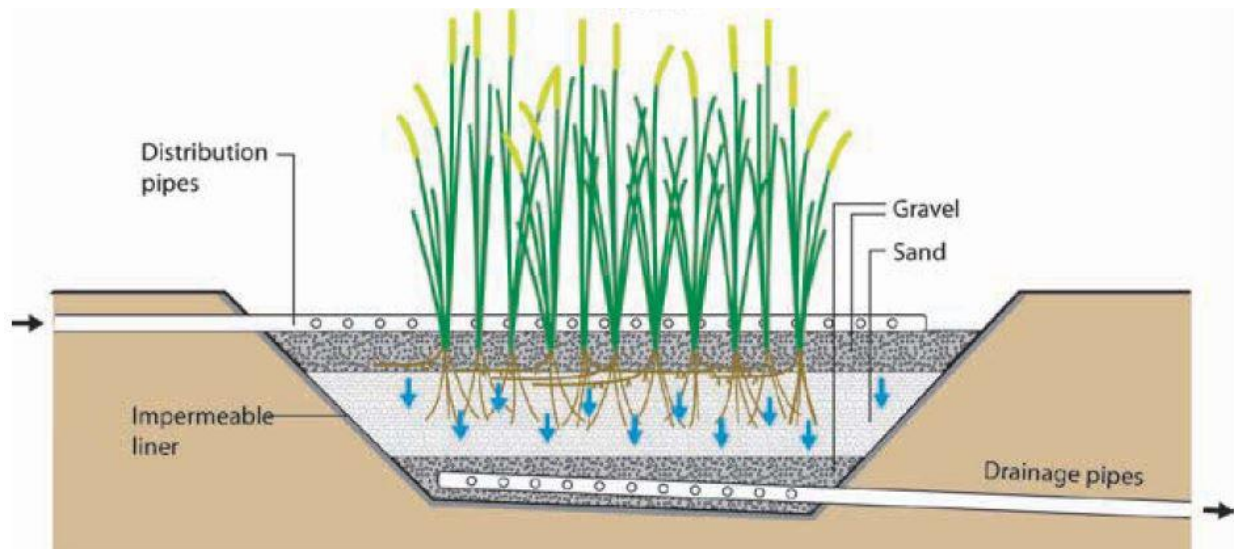


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung eines VF (Morel und Diener, 2006)

VF werden intervallweise mit Abwasser beschickt. Das Abwasser wird dabei mehrmals täglich auf die Bodenfilter aufgebracht (bei Verwendung von Sand als Filtermaterial wird der beste Sauerstoffeintrag bei etwa vier Schwallbeschickungen pro Tag erreicht). In der Ruhephase zwischen den Beschickungen gelangt Luft in den Bodenfilter (Geller und Höner, 2003).

Durch die oxidierende Wirkung am Filterbett sind VF gut geeignet, um organischen Kohlenstoff abzubauen (CSB und BSB₅). Ebenso gut geeignet sind sie für streng aerobe Prozesse, wie zum Beispiel Nitrifikation (Dotro et al., 2017).

Die Effizienz eines VF hängt direkt vom Filtermaterial ab. Wenn kleine Korngrößen verwendet werden, erhöht sich die Aufenthaltsdauer und somit wird einerseits die Reinigungsleistung erhöht, auf der anderen Seite die HLR begrenzt. Es dauert länger, bis das Wasser den Filterkörper durchfließt, dies kann zu Kolmation führen (Dotro et al., 2017).

In unseren Breitengraden sollte die spezifische Fläche circa $3\text{--}4\text{ m}^2 \cdot \text{EW}^{-1}$ betragen. Die OLR sollte $20\text{ gCSB} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ und die HLR 100 bis maximal $120\text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ nicht überschreiten (GIZ, 2011).

3.4 Fassadenbegrünung

Fassadenbegrünungen leisten einen aktiven Beitrag zum Umwelt- und Naturschutz und können je nach Gebäudeart längerfristig, durch Kühlung im Sommer und wärmedämmende Wirkung im Winter, Betriebskosten senken. Auch das lokale Kleinklima wird durch Fassadenbegrünungen maßgeblich beeinflusst. Diese können Staub binden, die Luftbefeuchtung anregen und, von besonderer Bedeutung in Zeiten des Klimawandels, gleichzeitig kühlen. Außerdem wird durch gezielte Nutzung von GW Trinkwasser eingespart.

Grüne Wände im urbanen Raum übernehmen die Funktion einer naturnahen Klimaanlage. Im Sinne einer nachhaltigen Zukunft ist es sinnvoll, alle geeigneten Flächen im urbanen Raum einer grünen Nutzung zuzuführen (MA 22, 2013).

Fassadenbegrünung können, angelehnt an Bustami et al. (2018) sowie den Leitfaden des MA 22 (2013), in zwei unterschiedliche Systeme getrennt werden (siehe Abbildung 3-5).

- **Bodengebundene Begrünung (Grüne Fassade):** der Wurzelraum befindet sich am Boden, die Pflanzen (Kletterpflanzen) wachsen die Mauer hoch, entweder direkt entlang der Wand oder auf einem Gerüst. Die Gestaltung und Pflege einer grünen Fassade ist einfacher im Vergleich zu fassadengebundenen Begrünungen.

- **Fassadengebundene Begrünung (Living Wall):** die Pflanzen wachsen auf Pflanzengefäßen, die zu modularen Systemen entwickelt und an die Wand befestigt werden, ohne auf Wurzelräume in Bodennähe angewiesen zu sein. Diese Systeme verfügen über eine künstliche Bewässerung.

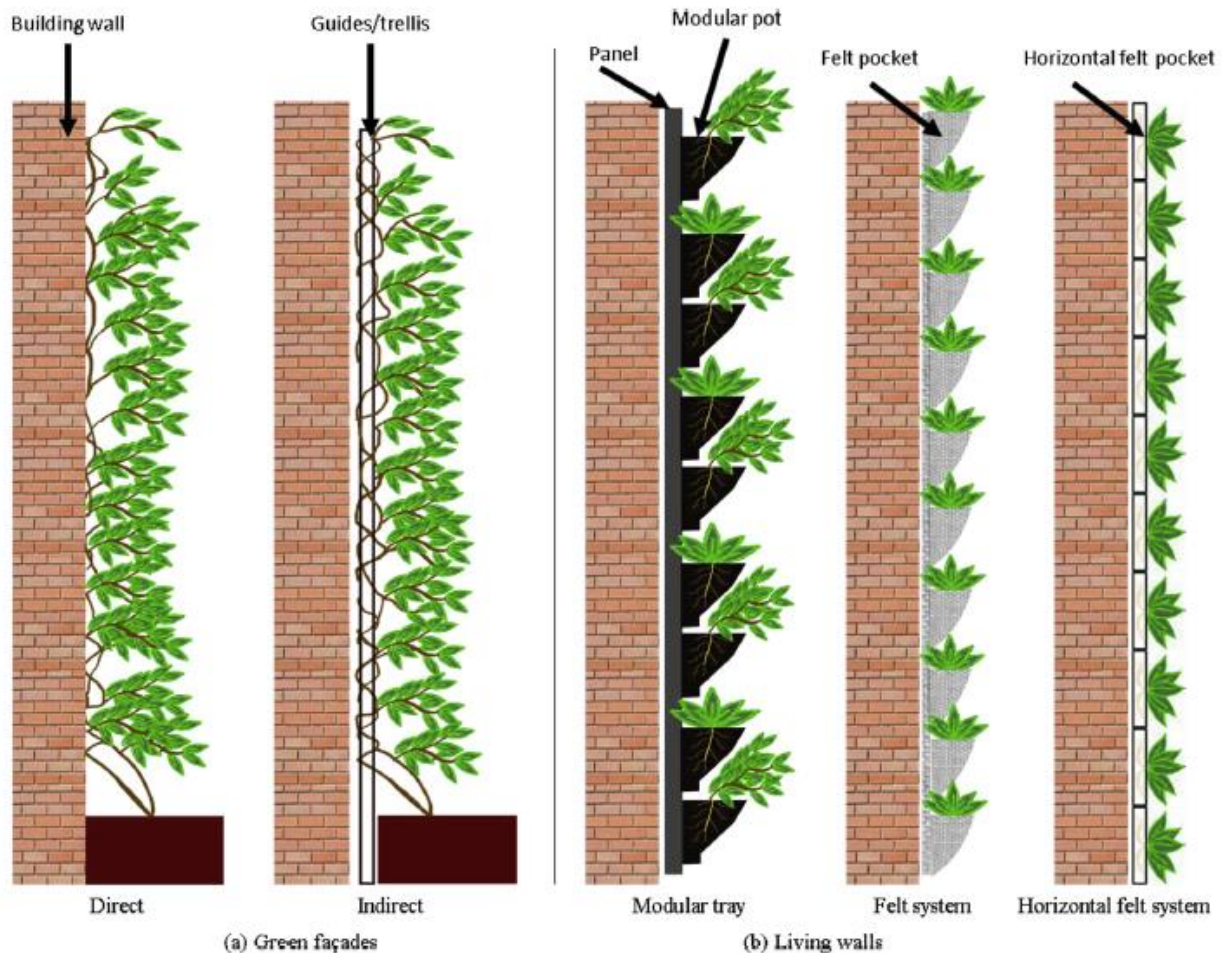


Abbildung 3-5: Grüne Fassade (links) und Living Wall (rechts) (Bustami et al., 2018)

3.5 Grauwasserreinigung in Fassadenbegrünung

Fassadenbegrünung bietet in dicht bebautem städtischen Gebiet viele Vorteile wie Kühlung, Verbesserung der Luftqualität und Ästhetik. Solche Anlagen sind jedoch große Wasserverbraucher. Als Alternative zu Trinkwasser kann GW verwendet werden.

Natürliche Abwasserbehandlungssysteme wie bepflanzte Bodenfilter haben sich bewährt, sie sind kostengünstig, effizient und benutzerfreundlich (Masi et al., 2016). Außerdem sind sie eine gute Alternative zu aufwändigen und somit für die Anwendung in kleineren Maßstäben nicht wirtschaftlichen Abwasserreinigungsmethoden wie zum Beispiel den Membranbelebungsreaktor, den Rotationstauchkörper oder die Biofiltration (Kadewa et al., 2010).

Die GW-Reinigung in Fassadenbegrünung funktioniert nach dem Prinzip des bepflanzten Bodenfilters. Die Hauptschadstoffentfernungsprozesse sind Filtration (physikalisch), Ionenaustausch (chemisch) und mikrobieller Stoffwechsel (biologisch). Zusätzlich tragen die Pflanzen durch die Aufnahme (Phytoextraktion und Phytovolatilisierung) von anorganischen Chemikalien zur Umwandlung und Abschwächung von organischen Chemikalien bei (Kadewa et al., 2010).

4. Material und Methoden

4.1 Methodik der Literaturrecherche

Das Ziel der Literaturrecherche war es, Studien zu finden, die sich mit der Thematik der GW-Reinigung in Fassadenbegrünungen beschäftigten, um einen Vergleich mit den Versuchen dieser Masterarbeit zu machen.

Das Hauptaugenmerk der Recherche lag bei folgenden Themen:

- Aufbau und Funktionsweise von fassadengebundenen Begrünungen zur Behandlung von GW
- Reinigung von GW und/oder Bewässerung von Fassadenbegrünungssystemen mit GW
- Betriebsfaktoren wie Filtermedien, Korngrößen, HLR und OLR

Die Literatursuche erfolgte durch folgende Medien:

- <https://www.scopus.com/>
- <https://scholar.google.com/>
- <https://webofknowledge.com/>
- <https://www.researchgate.net/>

Folgende Schlagwörter und Kombinationen wurden für die Internetrecherche verwendet:

greywater, gray- or greywater treatment, gray- or greywater recycling, living wall, green wall, wet wall, vertical greenery systems, treatment wetlands, constructed wetlands.

Die gefundene Literatur (überwiegend internationale Publikationen in Form von Papers) wurde auf relevante Informationen hin untersucht und aussortiert. Außerdem wurde durch Zitate von Autoren und Autorinnen auf weiterführende Fachliteratur hingewiesen. Dies trug zu einer Vertiefung bestimmter Themenbereiche bei.

4.2 Synthetisches Grauwasser

Das für diese Studie benötigte GW wurde künstlich hergestellt. Tabelle 4-1 zeigt Konzentrationswerte für synthetisches und echtes GW. Die Werte aus dem echten GW sind als wegweisende Zielkonzentrationen zu verstehen. Die chemische Zusammensetzung von dem für diese Studie hergestellten GW wurde in der Nähe der Zielkonzentrationen und innerhalb der Werte aus der angeführten Literatur gehalten.

Die Hauptbestandteile dieses Rezepts (siehe Anhang, Kapitel 12.1) sind gewöhnliche Reinigungsmittel, die im herkömmlichen Supermarkt zu finden sind. Die damit präparierte Mischung simuliert das gesamte in einem Haushalt anfallende GW. Lediglich auf Speisereste und Speiseöle wurde verzichtet, da diese relativ leicht über eine Vorfiltration beziehungsweise über einen Ölabscheider entfernt werden können.

Um auf die endgültige Rezeptur zu kommen, wurden drei unterschiedliche Basisrezepte (siehe Anhang) mit teilweise unterschiedlichen Konzentrationen gemischt und zur Analytik gebracht.

Das Basisrezept 1 wurde in drei unterschiedlichen Konzentrationen gemischt, wobei die Konzentrationen in C das Zweifache von B und das Vierfache von A betragen.

Alle Bestandteile wurden dosiert und für die Proben A, B und C getrennt. Anschließend wurden von jedem GW-Gemisch für die Analytik jeweils zwei 1-Liter Flaschen entnommen.

Die Analyseergebnisse für das Basisrezept 1 zeigten, dass die Werte für CSB, BSB sowie TOC weit über den erwünschten Werten waren. Das lag daran, dass zum Zeitpunkt der Mischung, die

SBR-Anlage (Sequencing-Batch-Reactor) nicht richtig funktioniert hat. Auch die Bestandteile des Rezepts waren zu hoch dosiert.

Um die Ergebnisse der ersten Untersuchung besser nachvollziehen zu können, wurden gemeinsam mit Proben des Basisrezepts 2 auch zwei Proben des Ablaufs der SBR-Anlage untersucht. Hier waren die CSB Werte noch immer etwas höher als erwünscht.

Basisrezept 3 wurde nur in einer Konzentration gemischt. Es wurden hier im Vergleich zu Basisrezept 1 und 2 Bestandteile reduziert. Auf Auslaufwasser aus der SBR-Anlage wurde verzichtet, Ammoniumchlorid (NH_4Cl) als Stickstoffquelle hinzugefügt.

Tabelle 4-1: Unterschiedliche Konzentrationen aus echtem und synthetisch hergestelltem GW

Quelle:	Echtes GW			Synthetisches GW					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CSB - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	13-700	93-1360	545		276.7	290	702-984	77.4	391-505
BSB₅ - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	39-466	13-650		215	146.7	192	28-688		58-75
$\text{NH}_4\text{-N}$ - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.03–25.40								
$\text{NO}_3\text{-N}$ - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.0–4.9								
$\text{PO}_4\text{-P}$ - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.5–68								
N_{ges} - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		1-23	25				25-45.2		
P_{ges} - $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		1-29	0.2		17.8		17.2-27		

1 - (Abed und Scholz, 2016); 2 - (DWA, 2017); 3 - (Morandi und Steinmetz, 2019); 4 - (Surendran und Wheatley, 1998); 5 - (Diaper et al., 2008); 6 - (Nazim und Meera, 2013); 7 - (Gross et al., 2007); 8 - (Comino et al., 2013); 9 - (Hourlier et al., 2010)

4.3 Anlagenbeschreibung

Die Versuchsanlage wurde indoor im Technikum des Instituts für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz der BOKU-Wien aufgebaut. Die Hauptbestandteile waren:

Grauwassertank: dieser befand sich auf einer höhergelegenen Ebene und diente als Speicher für das GW. Der Tank hatte folgende Abmessungen: 1 m Durchmesser und 1.45 m hoch (Höhe des Überlaufs) und somit ein Gesamtvolumen von circa 1140 L. Ein Rührwerk im Tank wirkte Absetzungen entgegen und sorgte für eine gute Durchmischung des GW.

Steuerungselemente: um das Rührwerk und die Beschickungen zu steuern sowie die Durchflussmenge und Durchflussrate zu messen (z.B. PC, magnetisch-induktives Durchflussmessgerät).

Pflanzen: die Auswahl der Pflanzen wurde vom Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB) übernommen. Es wurden drei unterschiedliche Pflanzen ausgewählt, welche die speziellen Anforderungen eines LW-Systemen erfüllen (niedrig wachsend und Staunässe beständig). Ausgewählt wurden die *Nephrolepis exaltata*, der *Philodendron hederaceum* und der *Chlorophytum comosum*

UV Wachstums Lampen: da die Anlage im Technikum stand, wurden UV-Wachstums Lampen für die Pflanzen benötigt.

Filtersubstrat: die Zusammensetzung des Substrats musste den besonderen technischen Ansprüchen eines LW-Systems entsprechen. Das Substrat durfte nicht zu schwer sein, um die statischen Anforderungen der Konstruktion zu erfüllen. Weiteres bedurfte es einer ausreichenden hydraulischen Leitfähigkeit und Strukturstabilität. Ebenso wichtig war die ökologische Verträglichkeit der eingesetzten Materialien sowie ausreichend pflanzenverfügbares Wasser, angemessene Platzverhältnisse und eine gute Durchlüftung des Wurzelraumes (Bruneder, 2020).

Das von IBLB ausgewählte Substrat bestand aus einer Mischung aus gleichen volumetrischen Anteilen von Bims, Zeolith, Perlith, Sand und Liapor. Die Substrateigenschaften sind in Tabelle 4-2 ersichtlich.

Tabelle 4-2: Eigenschaften des Filtersubstrats der Living Wall Module (Bruneder, 2020)

Einzelkomponenten		Substratmischung Eigenschaften		
	Korngröße mm	k_f -Wert	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Liapor	4 - 8	Wassersteighöhe	26.3	cm
gebrochener Blähton	0 - 8	Porenvolumen	44.83	%
Quarzsand	0.02 - 2	Wasserkapazität	29	%
Perlit	0 - 6	Luftkapazität	16.06	%
Zeolith	2 - 6	Schüttdichte trocken	777.24	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
		Schüttdichte nass	1075.83	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Zwei Living Wall Module (HF_LW und VF_LW): jedes Modul bestand aus drei Wannen (W1, W2 und W3) mit folgenden Abmessungen: 1,5 m lang, 0,2 m breit und 0,2 m hoch, vorgesehene Einstauhöhe 2 cm. Die Wände unterschieden sich durch die Durchströmungsrichtungen (HF_LW und VF_LW) (siehe Abbildung 4-1).

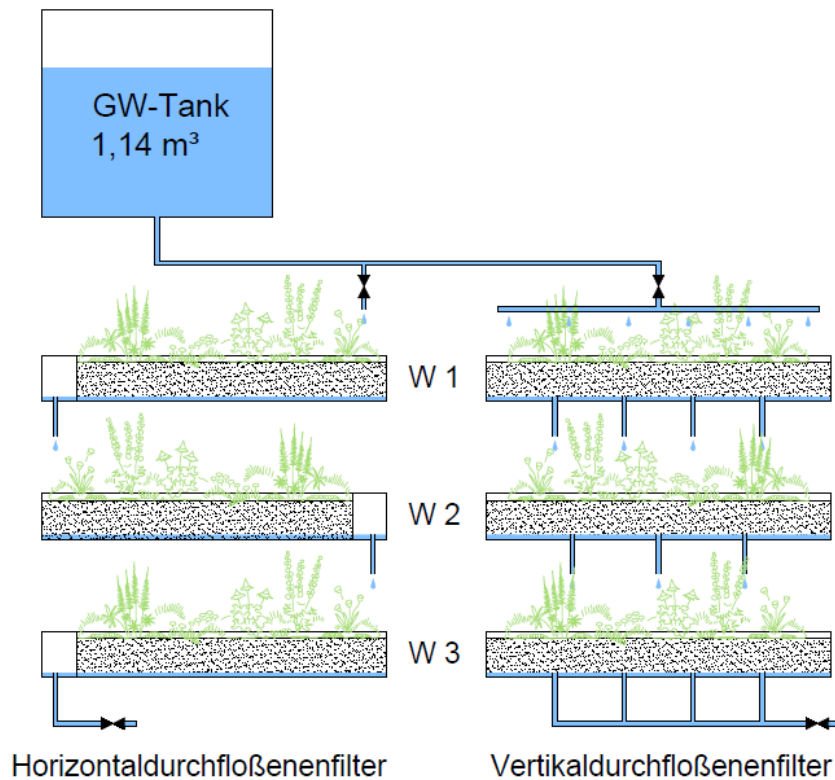


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Versuchsanlage

4.4 Versuchsprogramm, Beschickung und Probenahme

Die Einfahrphase fand zwischen KW 16 und 24 statt. In dieser Zeit wurden 8 Proben (Zufluss, HF_LW und VF_LW) genommen. Danach fing die zweite Phase des Versuches an, welche durch eine Pause zwischen KW 33 und 37 unterbrochen wurde, in der die Anlage nur teilweise beschickt wurde. Die zweite Phase des Versuches dauerte von KW 25 bis 48. In dieser Zeit wurden 16 Proben genommen (siehe Abbildung 4-2).

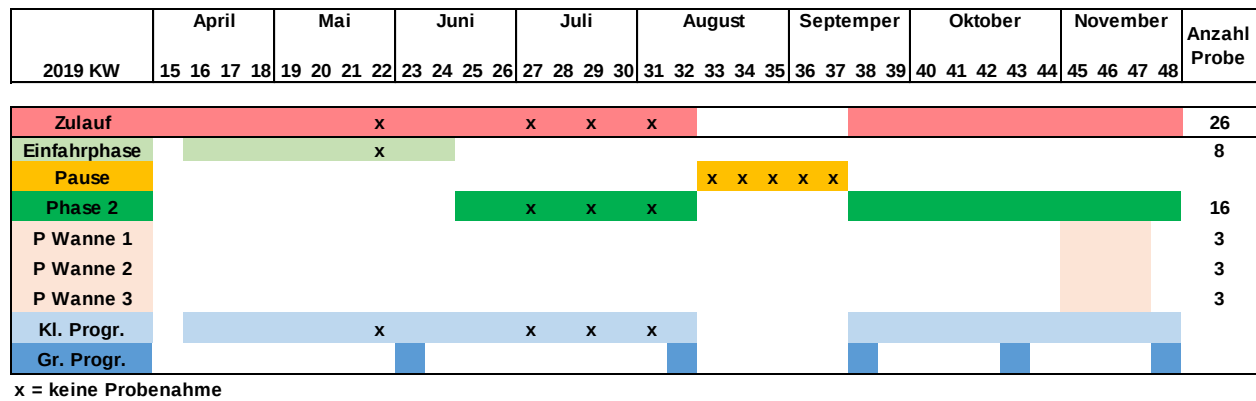


Abbildung 4-2: Versuchszeitplan

Der Grauwassertank wurde einmal pro Woche vollgefüllt. Dies sollte vermeiden, dass die Abnahme des Volumenstroms gegen Ende einer Beschickungswoche gegen null geht. Tags darauf fand die Probenahme statt. Die Proben wurden ins Labor gebracht. Die Analytik wurde in zwei unterschiedliche Programme unterteilt:

- Kleines Programm: dieses wurde häufiger durchgeführt. Es wurden nur die Konzentrationen von CSB, $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ untersucht.
- Großes Programm: hier wurden die Konzentrationen von CSB, BSB_5 , TOC, TN_b , $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ und P_{ges} untersucht.

Die Beschickung der Versuchswände fand intermittierend alle zwei Stunden statt und dauerte sieben Minuten. Die angestrebte Beschickungsmenge pro Module betrug $90 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, das entspricht einer HLR von $100 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Bei einer Konzentration von $545 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (CSB) und $218 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (BSB_5) (DWA, 2008) liegt die OLR bei $55 \text{ gCSB} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ und $22 \text{ gBSB}_5 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$.

4.5 Hydraulik

Der Füllstand eines offenen Behälters nimmt quadratisch mit der Zeit ab und entspricht somit einer Parabel, wobei der Scheitelpunkt dieser Parabel dem Zeitpunkt, bei dem der Behälter vollständig entleert ist, gleichkommt. Das bedeutet, am Anfang ist die Abnahme praktisch linear (je kleiner die Öffnung in Relation zum Behälterdurchmesser desto linearer) und wird am Ende hin immer flacher (Höfler, 2019).

Die Berechnungen zum Verlauf des Füllstands und zum Volumenstrom (Ausflussrate) wurden nach dem Torricellis Theorem gemacht. Folgende Formeln wurden dabei angewendet:

$$h(t) = \left(\sqrt{H} - \frac{A_a}{A} \sqrt{\frac{g}{2}} \cdot t \right)^2 \quad (4.1)$$

$$V = A_a \cdot \sqrt{2gh} \quad (4.2)$$

- $h(t)$ Abnahme des Füllstandes mit der Zeit
- H Höhe des Füllstandes
- A_a Austrittsquerschnitt
- A Behälterquerschnitt
- g Gravitationskonstante
- t Zeit
- V Volumenstrom

Um die angestrebte Beschickungsmenge zu erzielen, wurde der Tank wöchentlich mit 1140 L GW befüllt. Das war mehr als die theoretisch benötigte Menge für zwei Personen pro Woche. So konnte jedoch sichergestellt werden, dass die Anlage immer mit GW versorgt wurde.

4.6 Abflussverhalten

Beide Versuchswände wurden alle zwei Stunden jeweils sieben Minuten lang beschickt und anschließend wurde der Abfluss mit 15-sekundigen Abständen in kleinen Flaschen aufgefangen. Somit konnten Daten zum Abflussverhalten, zur Abflussrate sowie Dauer des Abflusses, der jeweiligen Wand gesammelt werden.

4.7 Mann-Whitney-U-Test

Um die Frage zu beantworten, ob es wesentliche Unterschiede zwischen dem HF_LW und VF_LW gibt, wurde der Mann-Whitney U-Test durchgeführt.

Der Mann-Whitney U-Test für unabhängige Stichproben ist ein Verfahren zur Auswertung eines Zwei-Gruppen Experiments, dessen Bedingungen sich in einer unabhängigen Variable unterscheiden. Der U-Test prüft, ob die Unterschiede in den zwei Gruppen bezüglich einer abhängigen Variable zufälligen oder systematischen Einflüssen unterliegen. Hierfür analysiert der U-Test die Messwerte nicht direkt, sondern die ihnen zugeordneten Rangplätze (Rasch et al., 2004).

Folgende Formeln wurden für die Berechnungen angewendet:

$$T_1 + T_2 = \frac{n(n+1)}{2} \quad (n = n_1 + n_2) \quad (4.3)$$

$$U = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - T_1 \quad (4.4)$$

$$U' = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - T_2 \quad (4.5)$$

$$Z = \frac{U - \frac{n_1 \cdot n_2}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}} \quad [-1,96; +1,96] \quad (4.6)$$

- T_1 und T_2 sind die Rangsummen
- n_1 und n_2 die Anzahl der Proben
- U und U' sind Prüfgrößen
- z-Werte sind Standardabweichungen: die sogenannten z-Werte erhält man, indem die Abweichung vom Mittel an der Standardabweichung relativiert wird (Bortz und Schuster, 2010).

5. Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 5-1 zeigt die bepflanzte Versuchsanlage während der Phase II. Links ist der HF_LW zu sehen. Zu- und Abfluss der Wannen sind abwechselnd rechts und links, dies ermöglicht die horizontale Fließrichtung. Rechts ist der VF_LF zu erkennen. Zu- und Abfluss der Wannen stehen versetzt übereinander, das Wasser fließt vertikal.



Abbildung 5-1: HF_LW (links) und VF_LW (rechts) am 18.09.2019

5.1 Ergebnisse der Literaturrecherche

Tabelle 5-1 zeigt eine Übersicht über Studien, die für diese Masterarbeit als Vergleich dienen.

Tabelle 5-1: Literaturübersicht

Land	Jahr	Titel	Autoren
England	2010	Comparison of grey water treatment performance by a cascading sand filter and a constructed wetland	Kadewa et al.
Indien	2016	Green walls for greywater treatment and recycling in dense urban areas: a case-study in Pune	Masi et al.
Spanien	2019	Long term decentralized greywater treatment for water reuse purposes in a tourist facility by vertical ecosystem	Zraunig et al.
Deutschland	2018	Development of a Living Wall System for Greywater Treatment	Aicher und Londong
Australien	2017	Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal	Prodanovic et al.
Australien	2018	Optimisation of lightweight green wall media for greywater treatment and reuse	Prodanovic et al.
Australien	2019	Designing green walls for greywater treatment: The role of plants and operational factors on nutrient removal	Prodanovic et al.

In der Tabelle 5-2 sind Eckdaten, wie Filtermedien, Korngrößen, HLR und OLR aus eben diesen Studien aufgelistet. Ebenfalls von Belang sind die in der Tabelle 5-3 dargestellten Untersuchungsergebnisse.

Hinsichtlich der Bauweise sind fast alle Anlagen aus Pflanzentrögen, die zu einem System zusammengefügt sind. Das Fassungsvermögen der Gefäße variiert zwischen 6 L und 630 L.

Große Schwankungen sind auch bei HLR und OLR beobachtbar. Der OLR-Wert stellt einen Zusammenhang zwischen der Belastung eines Konzentrationsparameters (wie CSB oder BSB₅) und der Filterfläche pro Tag her. In dieser Masterarbeit wurden beide Werte auch auf das Volumen bezogen, weil gerade dort wo die Fläche nur begrenzt zur Verfügung steht, wie es beim LW meistens der Fall ist, könnte die Tiefe der Wanne und somit das Gesamtvolumen des Filters ausschlaggebend für die Reinigungsleistung sein.

Da die Studien unterschiedliche Ziele verfolgten, wurden die Eckdaten und untersuchten Parameter aus differenzierten Blickwinkeln beziehungsweise mit abweichender Vollständigkeit dargestellt. Dies erschwert den direkten Vergleich. Die fehlenden Daten werden in Tabelle 5-2, Tabelle 5-3 und 5-4 durch Lücken ersichtlich.

Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 5-2: Auflistung der Eckdaten der Literaturrecherche mit Kurzbeschreibung, Filtermedium, Korngröße und Beschickung

	Kurzbeschreibung	Filtermedium	Korngröße	Beschickung
Kadewa et al., 2010	- 3 Wannen, als Horizontalfilter (Prototyp) - 3 Wannen als Vertikalfilter (VFPW)	Sand+feiner Kies (9:1)	<i>Sand:</i> d10 = 1 mm; d90 = 4 mm <i>feiner Kies:</i> 5-10 mm	<i>kontinuierlich frei fließendes System</i>
Masi et al., 2016	Vertikalfilter - 6 Töpfe in einer Spalte und 12 Töpfe in einer Reihe	LECA LECA+Kokosfaser 1:1 LECA+Sand 1:1	4 - 10 mm	<i>Stündlich mit 10L GW</i> 0.24 m ³ ·d ⁻¹
Zraunig et al., 2019	4 belüftete Horizontalfilter in Kaskadensystem	LECA 8/16		<i>stündliche Beschickung</i> 1: 0.75 m ³ ·d ⁻¹ 2: 1.008 m ³ ·d ⁻¹ 3: 1.4 m ³ ·d ⁻¹
Aicher und Londong, 2018	Biologischer Filter in Kombination mit einem LWS	Steinwolle Bimssteingranulat		<i>von 9-23h jede 2. Std dann jede Std für 1 min</i> 0.051 m ³ ·d ⁻¹
Prodanovic et al., 2017	24 PVC Säulen (Vertikalfilter) mit unterschiedliche Filtermedien	<u>Langsamfilter:</u> Kokosfaser Steinwolle Pflanzenschaum <u>Schnellfilter:</u> Perlit Vermiculit Growstone Blähton Flusssand	<i>Perlit, Vermiculit, Growstone, Flusssand:</i> 2-4.75 mm <i>Blähton:</i> 9.5 mm	<i>zweimal täglich jeweils 1.5 L oder 4.5 L</i> <i>normale Dosierung:</i> 0.003 m ³ ·d ⁻¹ <i>schnelle Dosierung:</i> 0.009 m ³ ·d ⁻¹
Prodanovic et al., 2018	18 PVC Säulen (VF) mit Filtermedium-Gemisch	Perlit : Kokosfaser 4:1 1:1 3:1 1:2 2:1 1:3		<i>zweimal täglich jeweils 1.5 L</i> 0.003 m ³ ·d ⁻¹
Prodanovic et al., 2019	3 vertikal verbundene Töpfe (jeweils ca. 200mm (B) × 200mm (T) × 150mm (H)) mit je einer Pflanze	Perlit : Kokosfaser 1:2		<i>Modifizierte Tropfbewässerung</i> <i>Standard:</i> 0.004 m ³ ·d ⁻¹ <i>Niedrig:</i> 0.002 m ³ ·d ⁻¹ <i>Hoch:</i> 0.008 m ³ ·d ⁻¹

Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 5-3: Betriebsfaktoren (HLR und OLR) der Literaturrecherche

	HLR	OLR			
	$L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$	$gCSB \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$	$gCSB \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$	$gBSB_5 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$	$gBSB_5 \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$
Kadewa et al., 2010	<i>Woche 1-17:</i> 80 <i>Woche 18-33:</i> 170 (Prototyp) 80 (VFPW)	<i>Woche 1-17:</i> 35 (± 14.7) (Prototyp) 10.6 (± 6.2) (VFPW) <i>Woche 18-33:</i> 47.8 (± 25.9) (Prototyp) 8.5 (± 1.6) (VFPW)	<i>Woche 1-17:</i> 175 (± 73.5) (Prototyp) 15.1 (± 8.9) (VFPW) <i>Woche 18-33:</i> 239 (± 129.5) (Prototyp) 12.1 (± 2.3) (VFPW)	<i>Woche 1-17:</i> 10.0 (± 3.4) (Prototyp) 3.1 (± 0.7) (VFPW) <i>Woche 18-33:</i> 14.4 (± 4.3) (Prototyp) 3.7 (± 0.9) (VFPW)	<i>Woche 1-17:</i> 50 (± 17) (Prototyp) 4.4 (± 1) (VFPW) <i>Woche 18-33:</i> 72 (± 21.5) (Prototyp) 5.3 (± 1.3) (VFPW)
Masi et al., 2016	330	LECA: 28.3 LECA+Kokosfaser: 16.3 LECA+Sand: 14.6			
Zraunig et al., 2019	1: 100 2: 140 3: 190	1: 15.9 2: 21 3: 34	39.8 52.5 85		
Prodanovic et al., 2017	<i>normale Dosierung:</i> 380 / 1910 <i>schnelle Dosierung:</i> 1150 / 5730				
Prodanovic et al., 2018	380	122			
Prodanovic et al., 2019	<i>Standard:</i> 30 <i>Niedrig:</i> 15 <i>Hoch:</i> 60				

Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 5-4: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der Parameter (CSB, BSB₅, TOC, TN_b, NH₄-N, NO₃-N und P_{ges}) der Literaturrecherche

	Szenarien		CSB	BSB ₅	TOC	TN _b mg·L ⁻¹	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P _{ges}
Kadewa et al., 2010	Woche 1-17	Zulauf	151	43.9	10.0				
		Ablauf	8	0.2	4.5				
	Woche 18-33	Reinigungsleistung (%)	95	100	55				
		Zulauf	119	42.6	14.7				
		Ablauf	21	0.2	8.5				
		Reinigungsleistung (%)	82	100	42				
Masi et al., 2016	LECA	Zulauf	84.9	39.7					
		Ablauf	69.4	29.9					
		Reinigungsleistung (%)	18	25					
	LECA+Kokosfaser	Zulauf	48.8	17.1	3.4				
		Ablauf	21.4	6.7	1.7				
		Reinigungsleistung (%)	56	61	50				
	LECA+Sand	Zulauf	43.9	18.6	3.5				
		Ablauf	27.7	11.0	1.1				
		Reinigungsleistung (%)	37	41	69				
Zraunig et al., 2019		Zulauf	158	116	39.0	10.4	4.88	0.02	0.34
		Ablauf	6	3.0	5.5	4.6	1.55	2.31	0.54
		Reinigungsleistung (%)	96	97	86	56	68		
Aicher und Londong, 2018	Bimssteingranulat	Zulauf	539	365		38.3	27.30	0.50	4.40
		Ablauf	181	106.0		23.4	10.4	2.5	3.2
		Reinigungsleistung (%)	66	71		39	62		27
	Steinwolle	Zulauf	539	365		38.3	27.30	0.50	4.40
		Ablauf	45	16.1		20.9	3.8	12.8	2.8
		Reinigungsleistung (%)	92	96		45	86		36
Prodanovic et al., 2017	Normale Dosierung	Reinigungsleistung (%)		70		50			20-40
	Schnelle Dosierung	Reinigungsleistung (%)		22-35					10-20
Prodanovic et al., 2018		Zulauf	320			6.5			3.80
		Ablauf	50			1.5			2.6
		Reinigungsleistung (%)	84			77			32
Prodanovic et al., 2019		Zulauf				5.2			3
		Ablauf				0.6			1.9
		Reinigungsleistung (%)				88			37

5.2 Versuchsdurchführung

5.2.1 Synthetisches Grauwasser

Tabelle 5-5 zeigt die Ergebnisse der Laboranalysen der Basisrezepte. Basisrezept 3 wurde nur mit einer Konzentration gemischt.

Tabelle 5-5: Analyseergebnisse der Basisrezepte

Basisrezepte und Mischungen		NH ₄ -N	CSB mg/l	P _{ges}
Basisrezept 1	A	7,1	793	1,59
	B	17	2440	3,04
	C	35	3540	5,69
Basisrezept 2	A	0,05	799	1,24
	B	0,1	866	1,23
	C	0,1	829	1,33
Basisrezept 3	A	12	524	0.89

Die Analyseergebnisse des Basisrezepts 3 zeigten Werte, die im Bereich des echten Grauwassers lagen (siehe Tabelle 4-1), daher wurde es als endgültiges Rezept für die restliche Versuchsperiode eingesetzt.

5.2.2 Hydraulik

Die Beschickung der Anlage lief über Gravitation, somit kam es innerhalb einer Beschickungswoche zu einer exponentiellen Abnahme des Füllstandes.

Der Durchfluss am Anfang der Beschickungswoche konnte beobachtet werden und betrug für den HF_LW 1,10 L·min⁻¹. Der ermittelte Wert nach 24 Stunden lag bei 0,97 L·min⁻¹. Nach 6 Tagen betrug der beobachtete Wert 0,51 L·min⁻¹ und am Ende der Woche nur noch 0,48 L·min⁻¹. Ein ähnlicher Verlauf gilt auch für den VF_LW.

Durch die Reduzierung des Durchflusses war auch mit einer Verminderung der Tagesmenge zu rechnen. Die Tagesmenge am ersten Tag nach der Befüllung betrug für den HF_LW 84,91 L und für den VF_LW 89,06 L, am letzten vollen Tag der Beschickungswoche waren es nur noch 46,73 L für den HF_LW und 49,16 L für den VF_LW.

Tabelle 5-6 und Tabelle 5-7 zeigen den errechneten Verlauf einer Beschickungswoche in Hinblick auf hydraulische Aspekte wie Volumenstrom, Durchfluss und Tagesmengen.

Tabelle 5-6: Beschickungsverlauf HF_LW einer Betriebswoche

Datum	Volumenstrom [L·min ⁻¹]	Σ-Durchfluss [L]	Tagesmenge [L]
17.04.2019	1.10	--	--
17.04.2019	1.06	45.32	45.32
18.04.2019	0.97	130.24	84.93
19.04.2019	0.88	207.55	77.31
20.04.2019	0.79	277.25	69.69
21.04.2019	0.70	339.32	62.08
22.04.2019	0.61	393.78	54.46
23.04.2019	0.52	440.62	46.84
24.04.2019	0.48	457.89	17.27

Tabelle 5-7: Beschickungsverlauf VF_LW einer Betriebswoche

Datum	Volumenstrom [L·min ⁻¹]	Σ-Durchfluss [L]	Tagesmenge [L]
17.04.2019	1.14	--	--
17.04.2019	1.11	39.26	39.26
18.04.2019	1.01	127.89	88.63
19.04.2019	0.92	208.60	80.71
20.04.2019	0.82	281.39	72.79
21.04.2019	0.73	346.26	64.87
22.04.2019	0.63	403.21	56.95
23.04.2019	0.54	452.25	49.04
24.04.2019	0.49	473.80	21.55

5.2.3 Abflussverhalten

Die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Abflusskurven beider Versuchswände kann Tabelle 5-8, Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 entnommen werden.

Tabelle 5-8: Vergleich Abflussverhalten HF_LW und VF_LW

VF_LW			HF_LW		
Abflusszeit mm:ss	Σ-Abfluss mL	%	Abflusszeit mm:ss	Σ-Abfluss mL	%
00:00	-		00:00	-	
00:32	-		00:19	-	
01:04	-		01:01	-	
01:41	0	0%	01:54	0	0%
02:56	755	10%	03:54	686	10%
04:11	1965	26%	05:39	1852	26%
05:56	3850	51%	07:39	3590	50%
07:41	5670	76%	10:24	5364	75%
13:29	6800	91%	14:22	6376	90%

Im HF_LW brauchte das GW 1 Minute und 54 Sekunden nach Beschickungsanfang bis zum Abflussbeginn (Tabelle 5-8), dieser stieg bis Q_{MAX} (16,8 ml/s nach 7 Minuten und 09 Sekunden) fast linear an, um dann wieder in ähnlicher Form abzustiegen. Das Ende des Abflussvorgangs war nach 61 Minuten und 54 Sekunden.

Im VF_LW konnte nach Abflussbeginn (1 Minute und 41 Sekunden) ein sehr rascher Anstieg des Abflusses beobachtet werden (Tabelle 5-8). Dieser steile Anstieg dauerte circa eine Minute an (2 Minuten und 56 Sekunden, 15 ml/s). Zwischen 2 Minuten und 56 Sekunden und 7 Minuten 11 Sekunden ($Q_{MAX} = 19$ ml/s bei 7 Minuten 11 Sekunden) nahm die Abflussrate nur noch langsam zu (siehe Abbildung 5-2). Nach Q_{MAX} fing die Abflussrate an, rasch zu sinken und versiegte komplett bei 56 Minuten und 56 Sekunden.

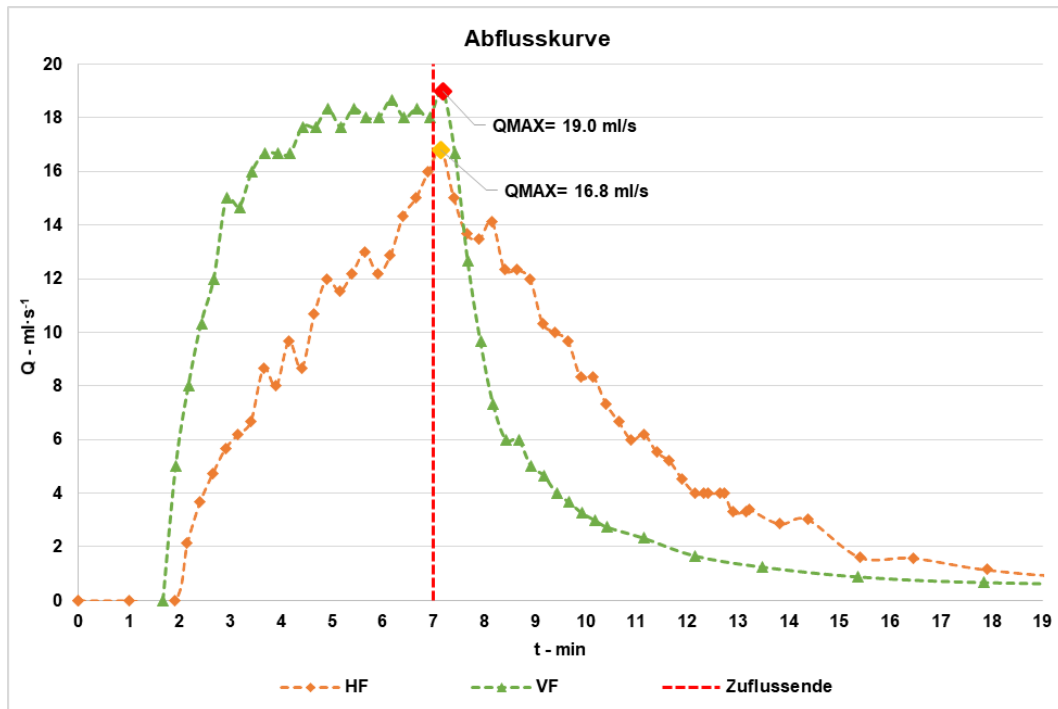


Abbildung 5-2: Abflusskurve für Horizontal- und Vertikalfilter

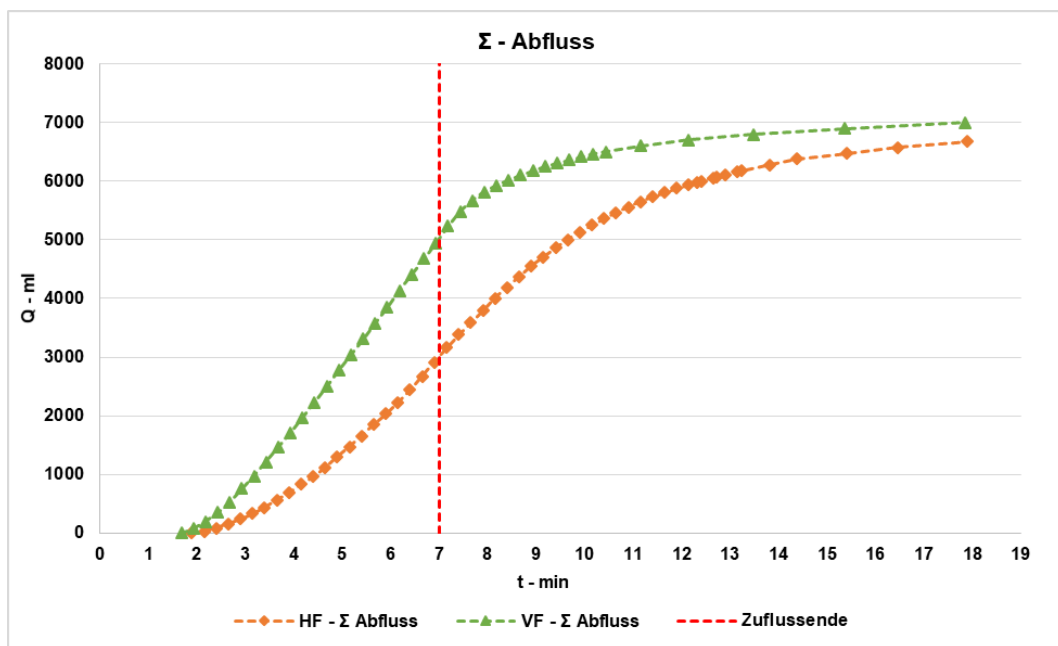


Abbildung 5-3: Abfluss Summendiagramm für beide Systeme (HF_LW und VF_LW)

5.2.4 Reinigungsleistung des Systems

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der Analytik zusammengefasst und anhand der folgenden Tabellen und Abbildungen erörtert.

Tabelle 5-9 zeigt statistische Parameter (Mittelwert, Standardabweichung sowie Minimal- und Maximal-Wert) aller untersuchten Werte ab Phase II, sprich ab 21.06.2019. Die Proben wurden aus dem Zulauf der Anlage und aus dem Abfluss beider Systeme nach einer 7 tägigen Beschickungsdauer genommen.

Tabelle 5-9: Statistische Parameter (Mittelwert, Standardabweichung, Minimal- und Maximal-Wert) aller untersuchten Werte ab Phase II

Parameter	Einheit	CSB		BSB ₅		TOC		TN _b		NH ₄ -N		NO ₃ -N		P _{ges}	
		mg·L ⁻¹	n	mg·L ⁻¹	n	mg·L ⁻¹	n	mg·L ⁻¹	n	mg·L ⁻¹	n	mg·L ⁻¹	n	mg·L ⁻¹	n
Zufluss	Mittelw.	466	16	223	16	116	3	15	3	8.3	16	0.66	16	0.42	4
	Standardabweichung	99	16	52	16	73	3	3	3	3.2	16	0.97	16	0.24	4
	Min	370	16	190	16	64	3	12	3	1.8	16	0.10	16	0.26	4
	Max	660	16	300	16	199	3	18	3	13.0	16	4.00	16	0.77	4
HF_LW	Mittelw.	125	16	49	16	44	3	9	3	3.9	16	0.55	16	0.27	4
	Standardabweichung	31	16	7	16	24	3	5	3	0.8	16	0.51	16	0.21	4
	Min	85	16	40	16	24	3	5	3	3.1	16	0.00	16	0.14	4
	Max	189	16	56	16	71	3	15	3	6.7	16	2.20	16	0.58	4
VF_LW	Mittelw.	110	16	30	16	37	3	10	3	3.2	16	1.64	16	0.27	4
	Standardabweichung	44	16	8	16	13	3	4	3	0.6	16	1.36	16	0.16	4
	Min	59	16	22	16	26	3	5	3	2.5	16	0.00	16	0.14	4
	Max	214	16	40	16	53	3	13	3	4.2	16	4.60	16	0.50	4

In Tabelle 5-10 wird die durchschnittliche Reinigungsleistung beider Versuchswände in Phase II dargestellt.

Tabelle 5-10: Durchschnittliche Reinigungsleistung in Phase II (HF_LW und VF_LW)

Reinigungsleistung [%]	CSB	BSB ₅	TOC	TN _b	NH ₄ -N	P
HF_LW	73%	78%	62%	43%	53%	37%
VF_LW	76%	87%	68%	36%	61%	37%

Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) und Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB₅):

In Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 wird der CSB-Abbau sowohl in mg·L⁻¹ als auch prozentualer Form dargestellt. Hier ist die Entwicklung der Abbauleistung während des gesamten Versuchszeitraums ersichtlich. Gegen Ende der Einfahrphase stabilisierten sich die CSB-Konzentrationswerte und die Schwankungen waren nicht mehr so ausgeprägt wie in den ersten Versuchsmonaten. In Abbildung 5-6 werden die Zu- und Ablaufkonzentrationen des BSB₅ dargestellt. Im gesamten Versuchszeitraum wurden nur bei fünf Proben die BSB₅ Werte untersucht.

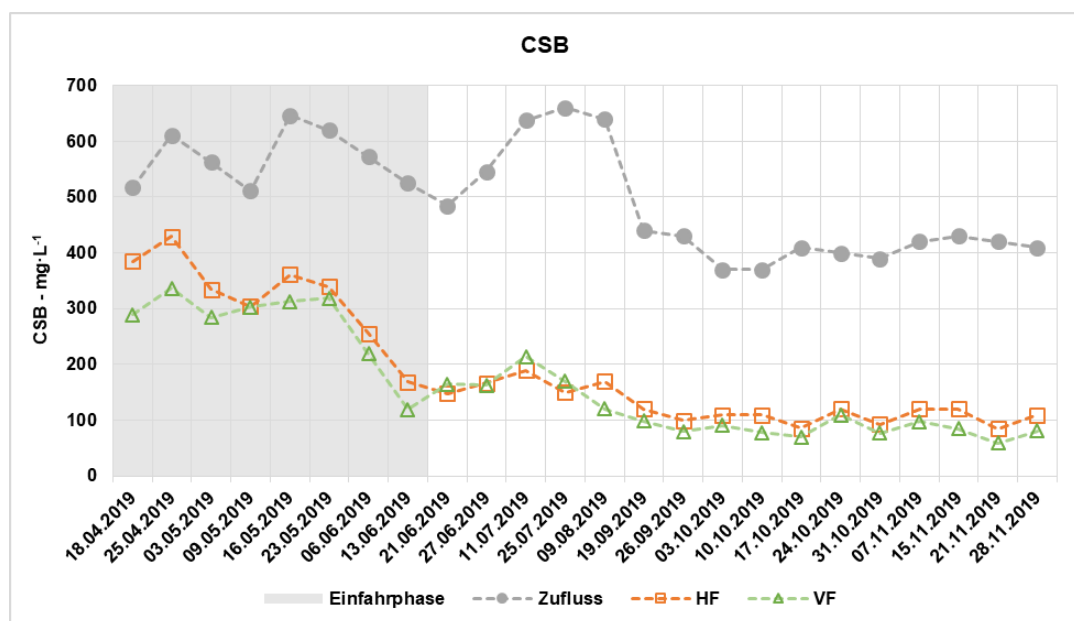


Abbildung 5-4: CSB Zu- und Ablaufkonzentrationen

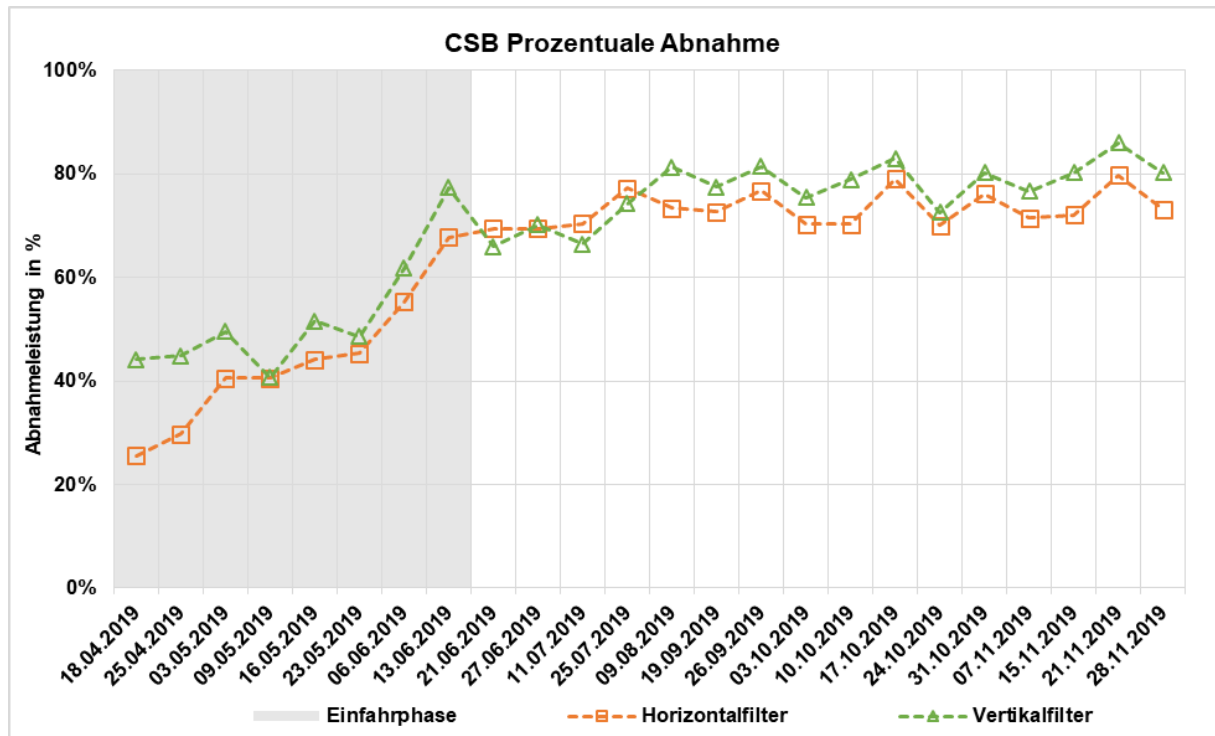
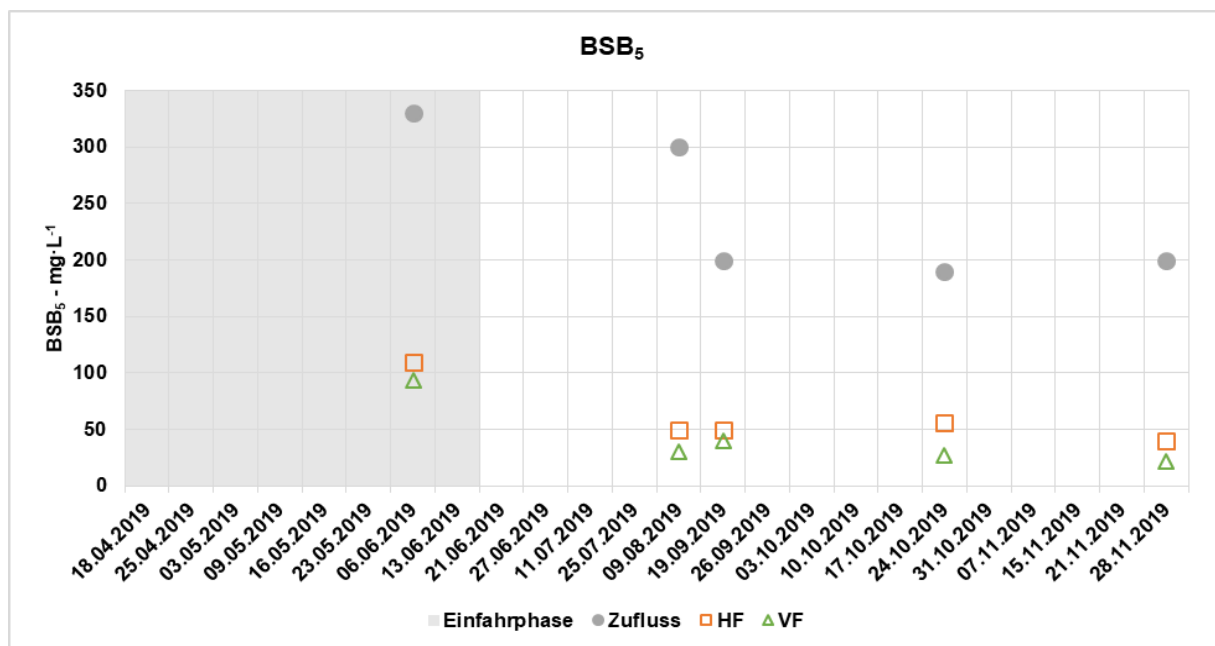


Abbildung 5-5: Prozentuale CSB Abnahme im HF_LW und VF_LW

Abbildung 5-6: BSB₅ Zu- und Ablaufkonzentrationen

Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC):

TOC ist ein sehr wichtiger Summenparameter für die Beurteilung der organischen Belastung eines Wassers (Gujer, 2007). Die in Abbildung 5-7 ersichtlichen Werte zeigen eine starke Reduzierung der Zuflusskonzentrationen gegen Ende der Versuchsperiode, dementsprechend gering sind auch die Werte für den HF_LW und VF_LW. Der VF_LW erreichte am Ende der Versuche einen Konzentrationswert von 26 mg·L⁻¹ und ist somit knapp über der österreichischen Emissionsbegrenzung von 25 mg·L⁻¹ (BGBl. Nr. 186/1996).

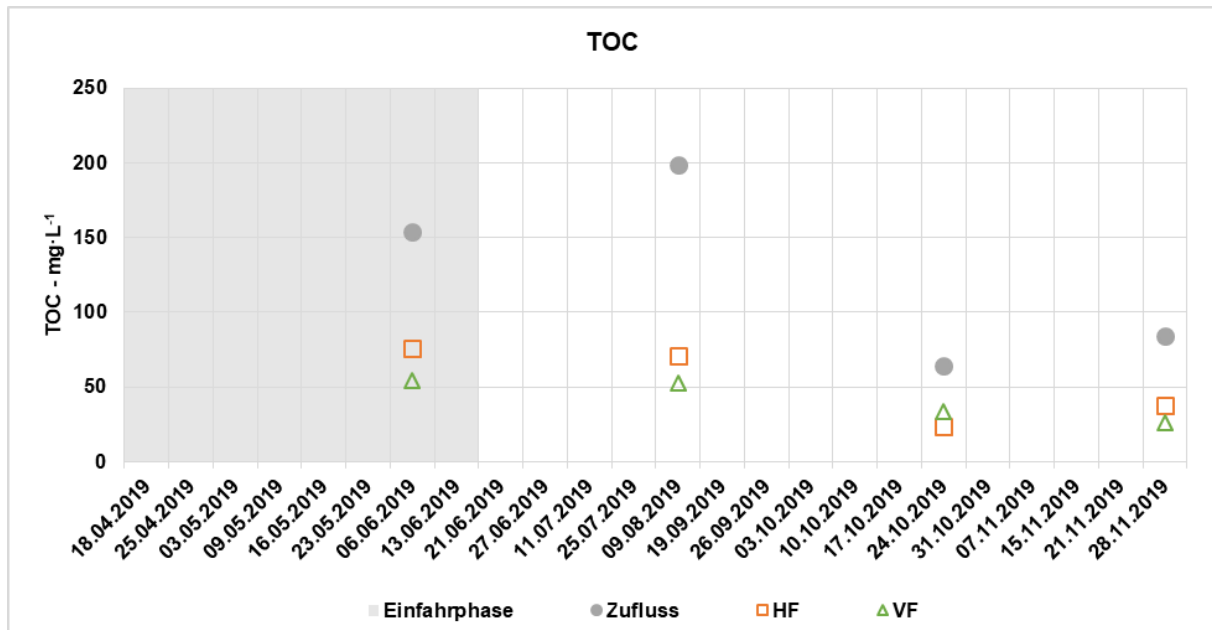


Abbildung 5-7: TOC Zu- und Ablaufkonzentrationen

Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) und Nitrat-Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$):

Die stickstoffbasierten Parameter zeigen, dass der Nitrifikationsprozess gut funktionierte (siehe Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9). Die Ergebnisse zeigen auch, dass vor allem im VF_LW, wo aerobe Verhältnissen herrschten, die Abbauprozesse stets besser verliefen als im HF_LW.

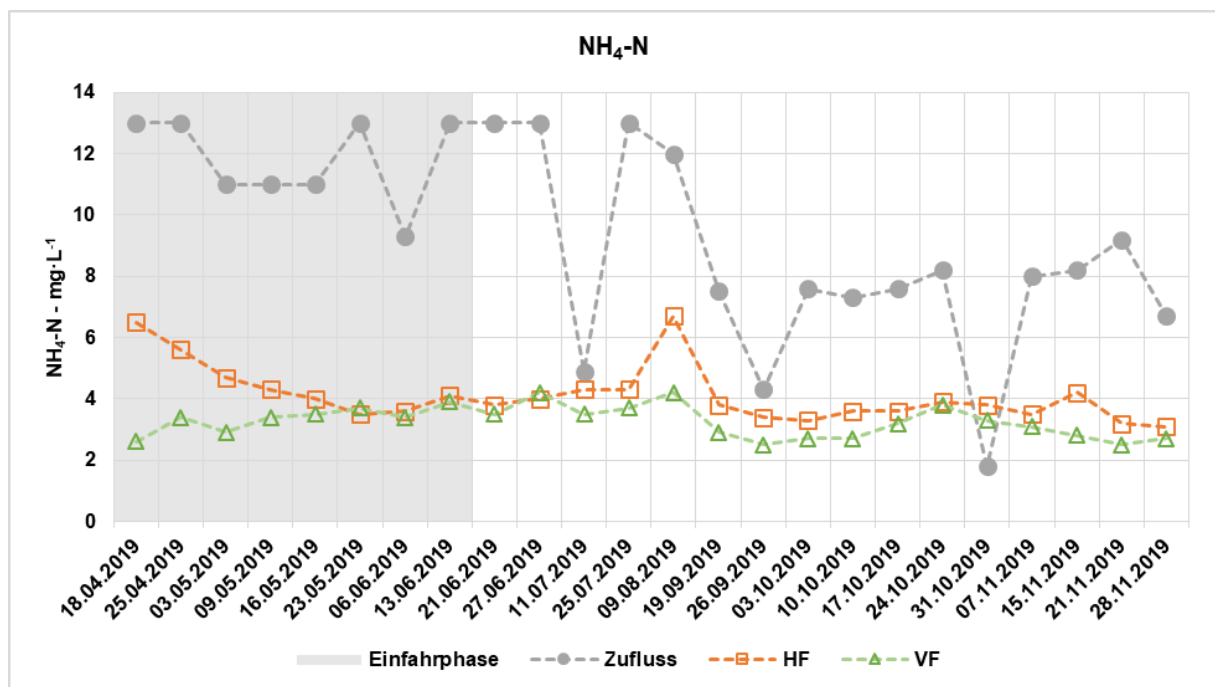


Abbildung 5-8: $\text{NH}_4\text{-N}$ Zu- und Ablaufkonzentrationen

In Abbildung 5-9 wird eine geringe Konzentrationen von $\text{NO}_3\text{-N}$ im HF_LW ersichtlich. Ob hier Denitrifikationsprozesse stattfanden, kann dennoch nicht mit Sicherheit behauptet werden.

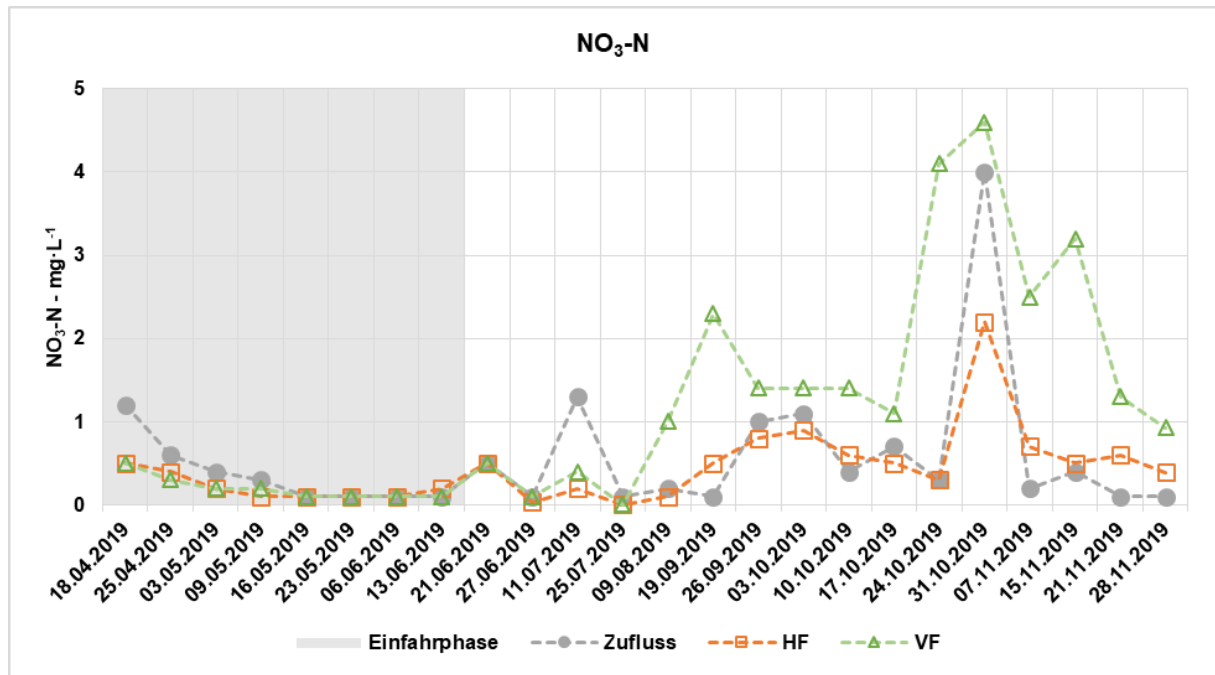


Abbildung 5-9: $\text{NO}_3\text{-N}$ Zu- und Ablaufkonzentrationen

Gesamter gebundener Stickstoff (TN_b):

Die Ergebnisse der Analysedaten zeigen, dass die TN_b Werte des Zuflusses und des Abflusses des HF_LW einen ähnlichen Verlauf hatten, wobei die Kennzeichen im HF_LW ständig niedriger lagen als die im Zufluss. Bei den Konzentrationswerten des VF_LW kam es am 24.10. zu einem höheren Wert als beim Zufluss (siehe Abbildung 5-10).

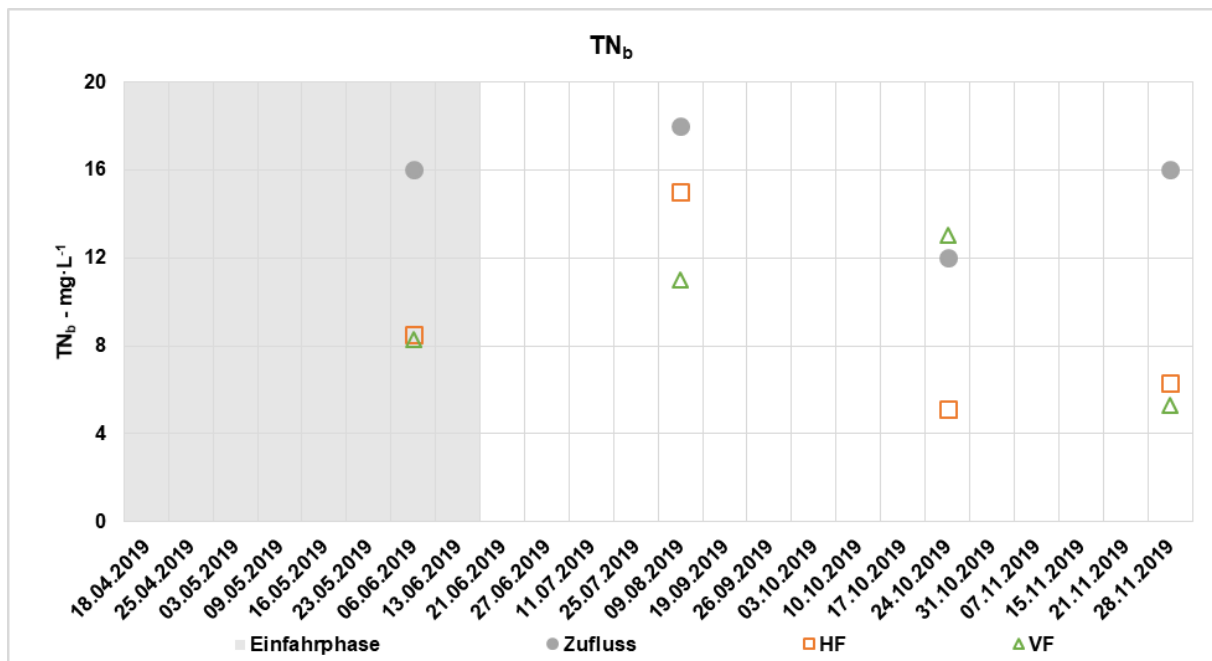
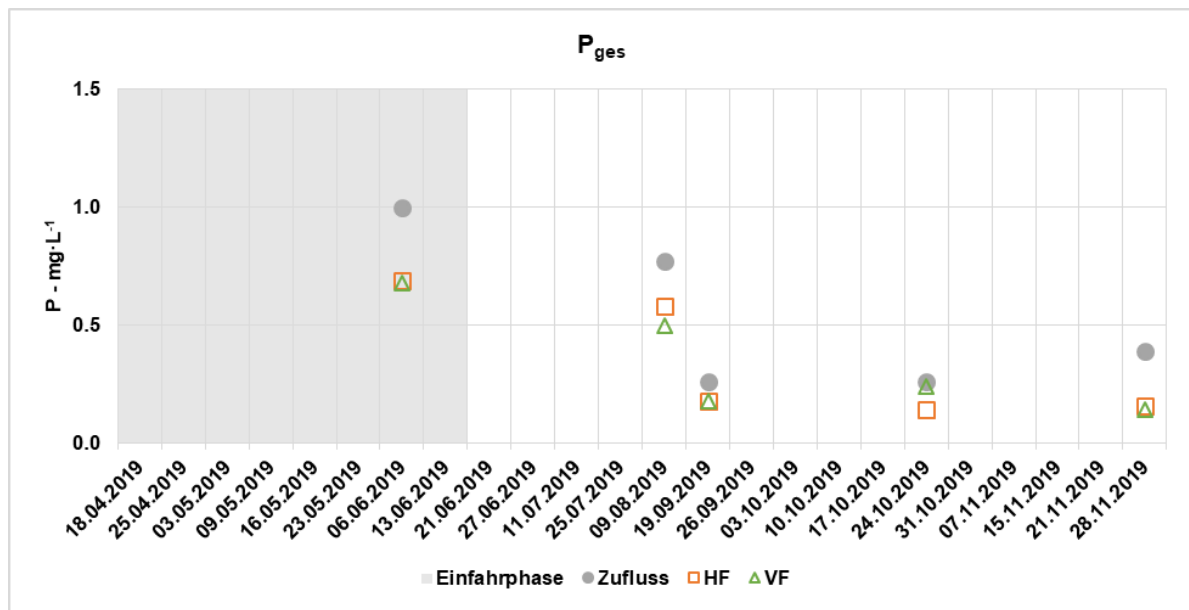


Abbildung 5-10: TN_b Zu- und Ablaufkonzentrationen

Gesamtposphor (P_{ges}):

Die Phosphorelimination in einem bepflanzten Filtermedium findet über die Sorptionskapazität des Filtermediums und Assimilation durch die Pflanzen statt (Fowdar et al., 2017).

Abbildung 5-11: P_{ges} Zu- und Ablaufkonzentrationen

Die Ergebnisse in Abbildung 5-11 zeigen eine leichte Reduzierung der Konzentrationswerte im Auslauf der Anlage im Vergleich zu den Werten des Zuflusses.

Da der Phosphor-Eintrag in der Anlage sehr gering ist, kann der Grund für die sehr geringe Schwankung der Werte in der Messtoleranz liegen.

5.2.5 Vergleich zwischen Einfahrphase und Phase II

Die Messergebnisse von CSB zeigen, dass die Schwankungen der Konzentrationswerte in den Abläufen der Wände in Phase II kleiner werden (siehe Abbildung 5-13). Die Reinigungsleistung und somit der Abbau erreichte im Schnitt 73% für den HF_LW und 76% für den VF_LW in Phase II (siehe Abbildung 5-12). Der BSB₅ Abbau in Phase II stieg im Vergleich zur Einfahrphase ebenfalls stark an und erreichte im VF_LW knapp 90%.

Der NH₄-N Abbau lag zwischen 62% und 72% in der Einfahrphase und 53% und 61% in Phase II (siehe Abbildung 5-12). Die Verringerung der Abbauleistung in Phase II liegt womöglich am geringeren NH₄-N Eintrag (siehe Abbildung 5-14). Auffallend ist der starke Anstieg von NO₃-N im VF_LW in Phase II (siehe Abbildung 5-15). Dies deutet auf das Stattfinden eines Nitrifikationsprozesses hin.

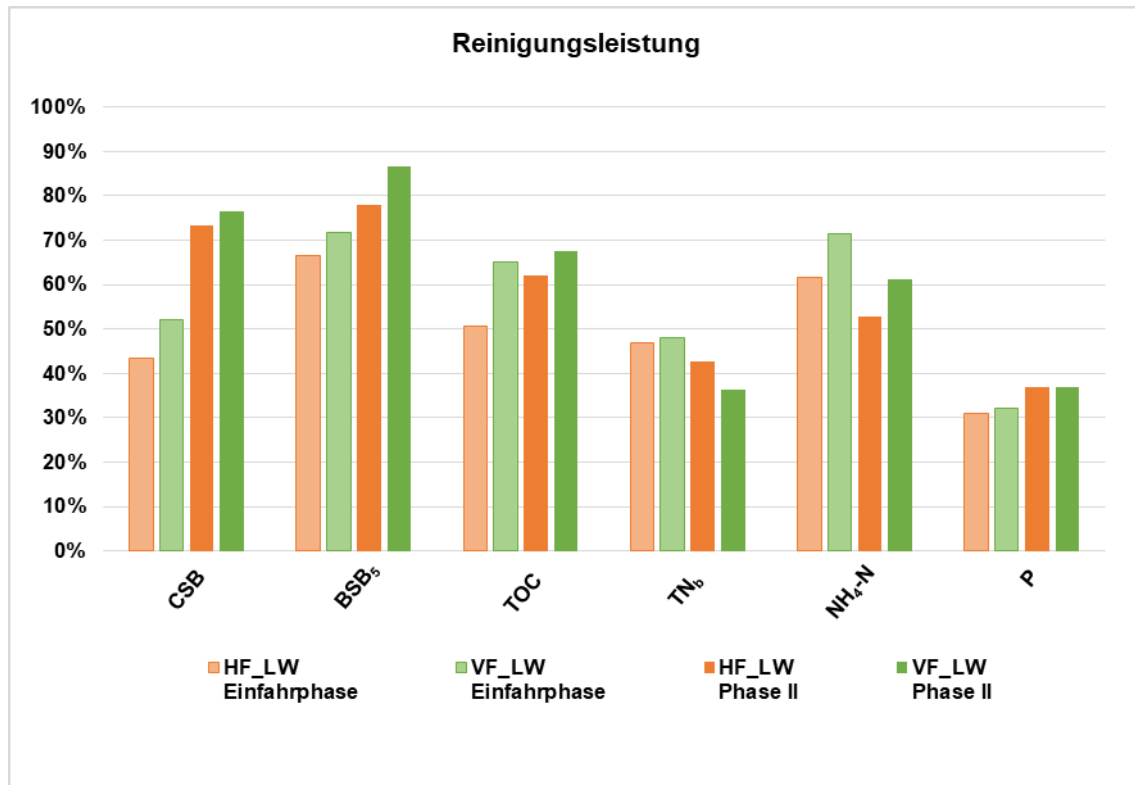


Abbildung 5-12: Reinigungsleistung in der Einfahrphase und Phase II

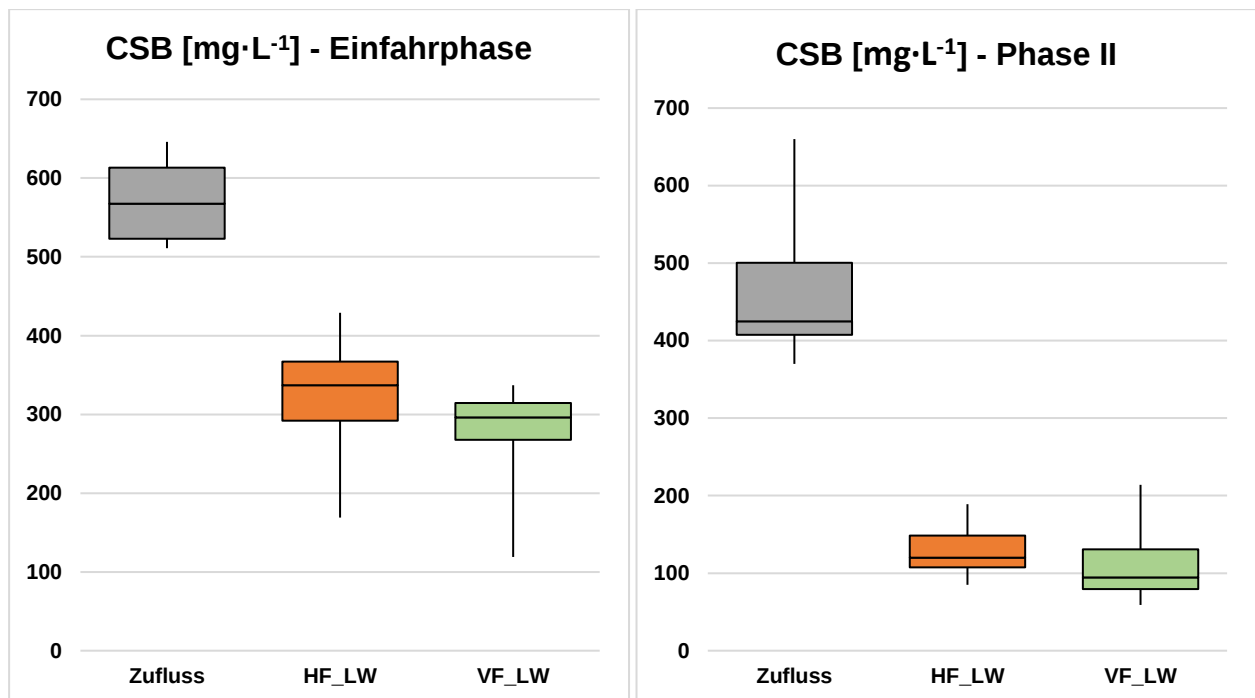


Abbildung 5-13: Vergleich der CSB Zu- und Ablaufkonzentrationen

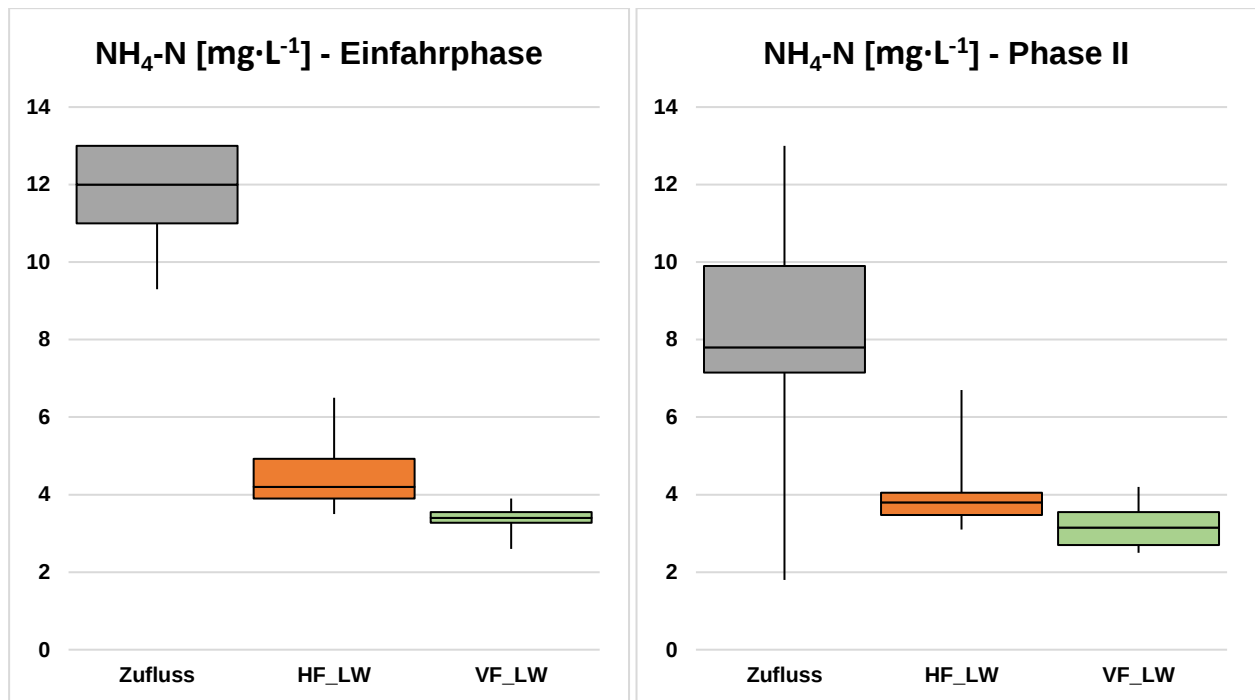


Abbildung 5-14: Vergleich der NH₄-N Zu- und Ablaufkonzentrationen

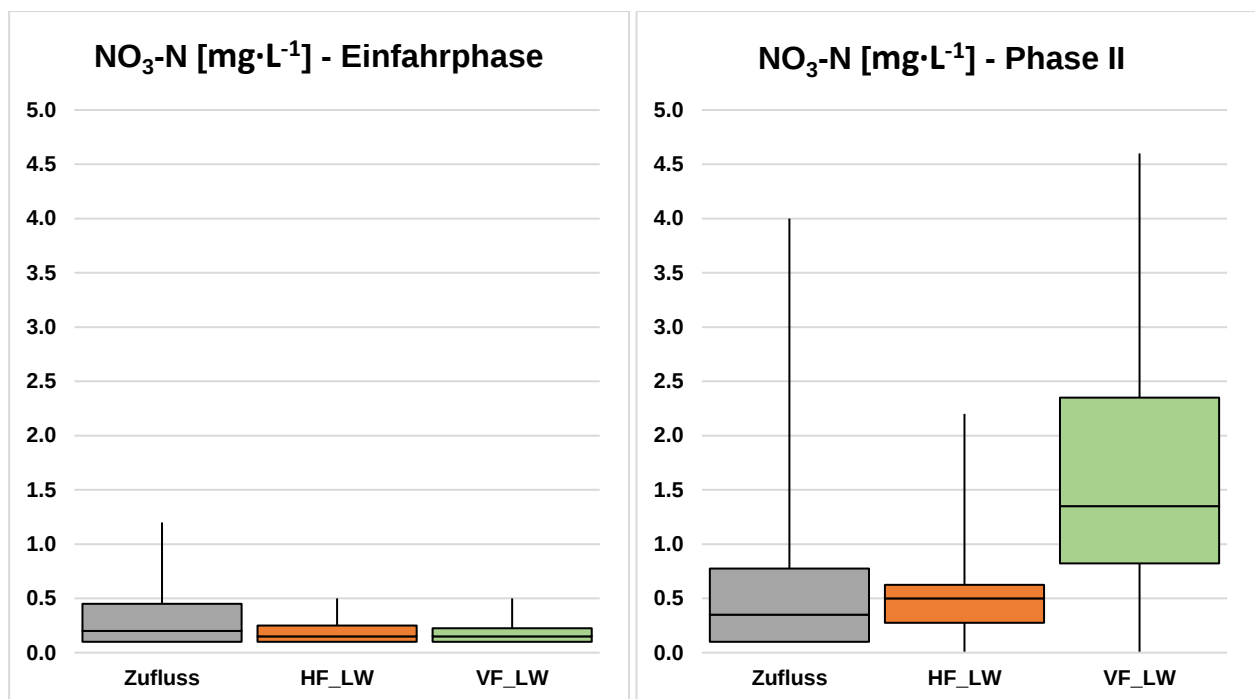


Abbildung 5-15: Vergleich der NO₃-N Zu- Ablaufkonzentrationen

5.2.6 Analyse der einzelnen Wannen

Am Ende der Phase II wurde eine zusätzliche Messung durchgeführt. Hierfür wurde der Abfluss der einzelnen Wannen (von oben nach unten, W-1 bis W-3) beider Anlagen entnommen und analysiert. Untersucht wurden nur die Konzentrationswerte für CSB, NH₄-N und NO₃-N, da diese einen ausreichenden Einblick über Abbauprozesse in der Anlage liefern.

Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB):

Der CSB-Abbau verlief in beiden Versuchswänden sehr ähnlich. Die Verringerung der Werte gegenüber jenen des Zuflusses in den W-1 betrug zwischen 43% und 50%, in den W-2 zwischen

64% und 74% und den W-3 zwischen 71% und 86% (siehe Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12 sowie Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17).

Tabelle 5-11: CSB Konzentrationsverlauf für den HF_LW im Laufe der drei Versuchswochen

Parameter	CSB			
Einheit	mg·L ⁻¹			
Datum	Zufluss	HF_LW W-1	HF_LW W-2	HF_LW W-3
07.11.2019	420	240	140	120
15.11.2019	430	220	140	120
21.11.2019	420	230	120	85

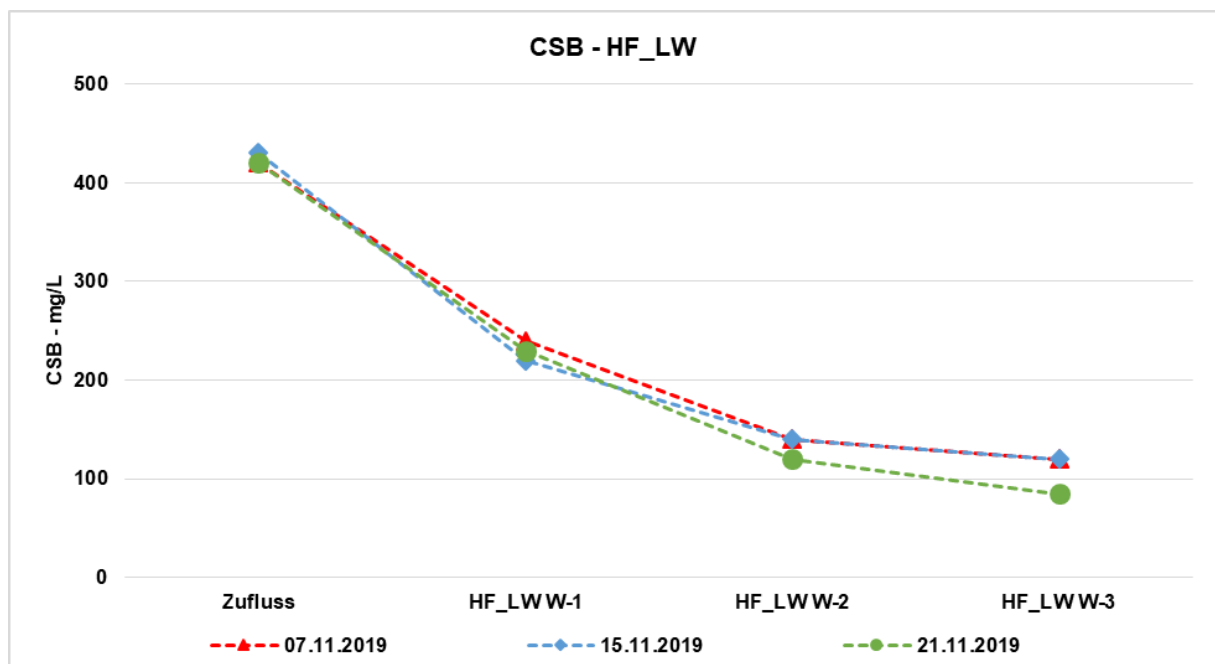


Abbildung 5-16: CSB Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im HF_LW

Tabelle 5-12: CSB Konzentrationsverlauf für den VF_LW im Laufe der drei Versuchswochen

Parameter	CSB			
Einheit	mg·L ⁻¹			
Datum	Zufluss	VF_LW W-1	VF_LW W-2	VF_LW W-3
07.11.2019	420	230	150	98
15.11.2019	430	230	130	85
21.11.2019	420	210	110	59

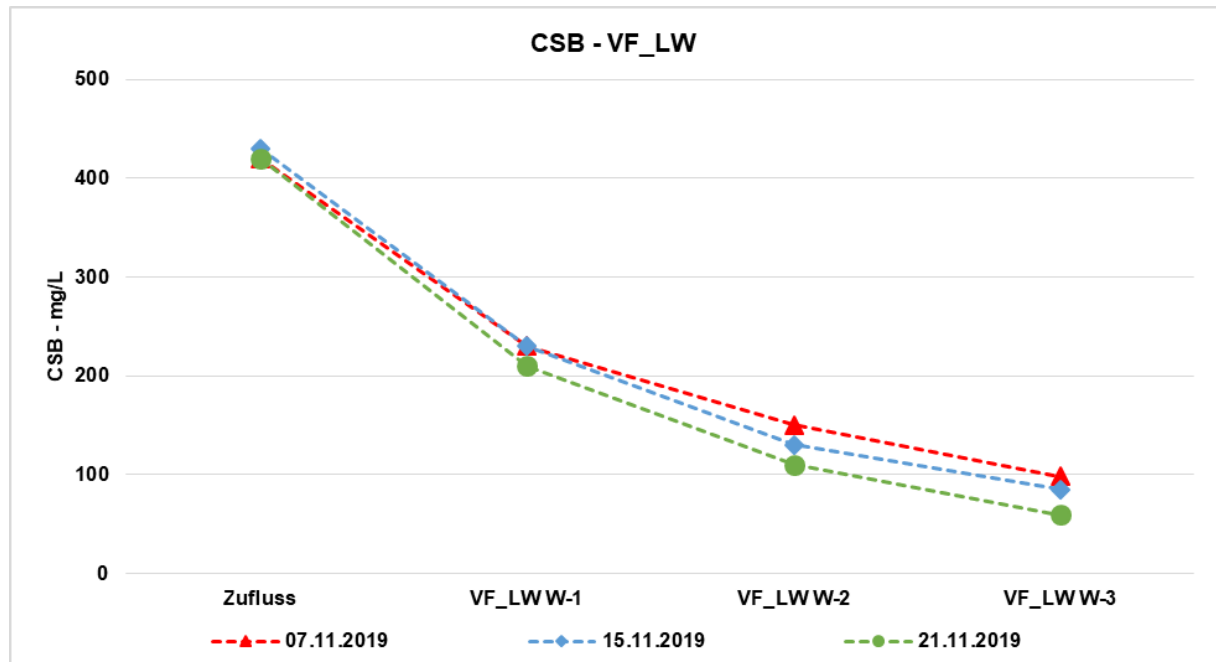


Abbildung 5-17: CSB Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im VF_LW

Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$):

Der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Abbau verlief ebenfalls in den beiden Versuchswänden ähnlich. Am 15.11.2019 betrug der Abbau im HF_LW W-3 im Vergleich zum Zuflusswert nur 49%. Am selben Tag betrug die Abbaurate im VF_LW W-3 66%. Darüber hinaus betrugen die maximalen Abbauraten im HF_LW 65% und im VF_LW 73% (siehe Tabelle 5-13 und Tabelle 5-14 sowie Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19).

Tabelle 5-13: $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentrationsverlauf für den HF_LW im Laufe der drei Versuchswochen

Parameter	$\text{NH}_4\text{-N}$			
Einheit	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
Datum	Zufluss	HF_LW W-1	HF_LW W-2	HF_LW W-3
07.11.2019	8	4.8	3.5	3.1
15.11.2019	8.2	5.8	4.5	4.2
21.11.2019	9.2	5.3	3.8	3.2

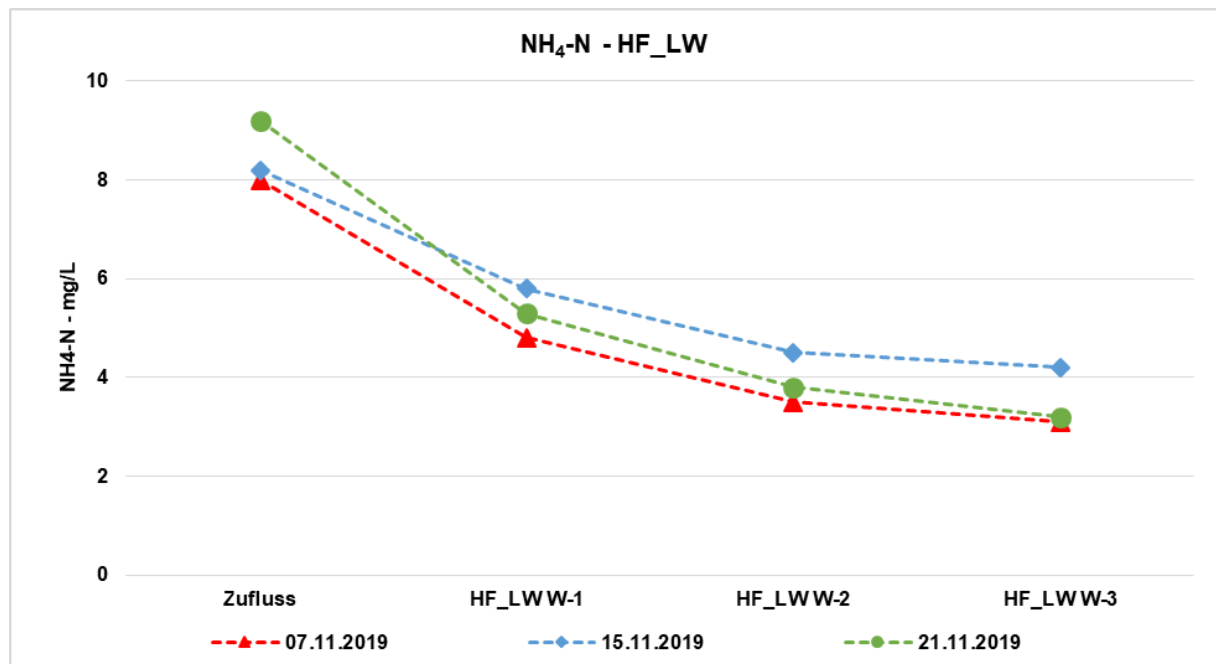


Abbildung 5-18: NH₄-N Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im HF_LW

Tabelle 5-14: NH₄-N Konzentrationsverlauf für den VF_LW im Laufe der drei Versuchswochen

Parameter	NH ₄ -N			
Einheit	mg·L ⁻¹			
Datum	Zufluss	VF_LW W-1	VF_LW W-2	VF_LW W-3
07.11.2019	8	5.9	4.3	3.1
15.11.2019	8.2	5.9	4.3	2.8
21.11.2019	9.2	5.5	3.8	2.5

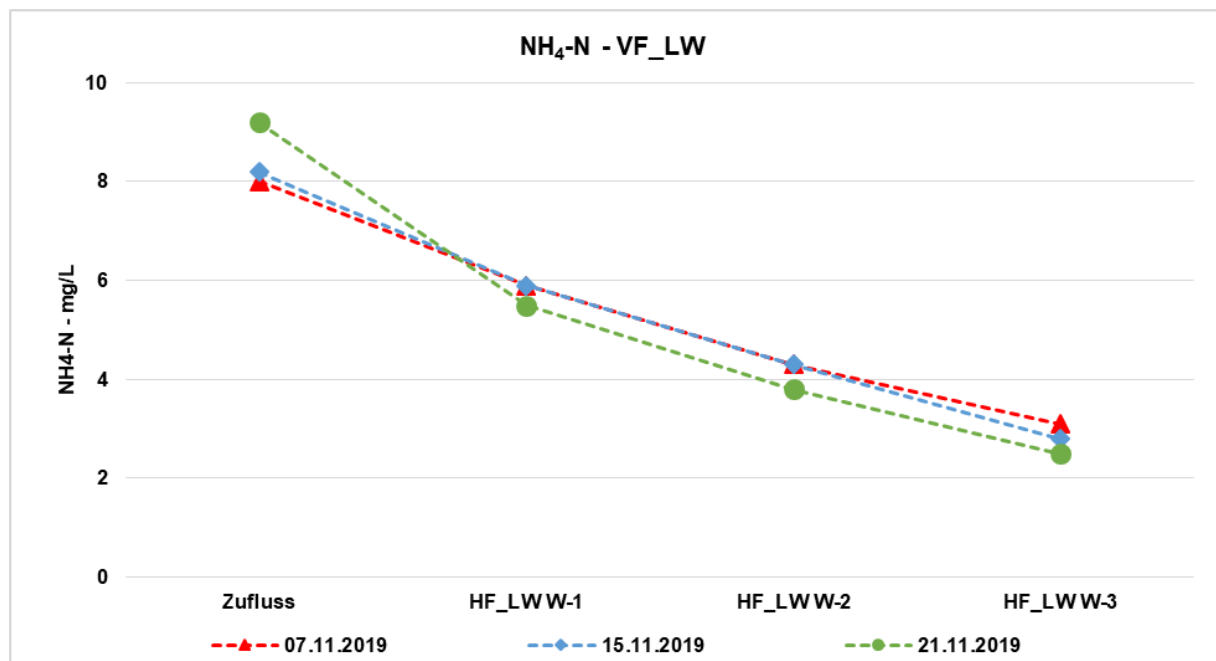


Abbildung 5-19: NH₄-N Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im VF_LW

Nitrat-Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$):

Die Werte für $\text{NO}_3\text{-N}$ stiegen in beiden Filterkörpern in Relation zu den Zuflusswerten an, wobei der Anstieg im HF_LW sehr klein ist. Der Anstieg im VF_LW zeigt, dass in allen drei Wannen, Nitrifikation stattfand (siehe Tabelle 5-15 und Tabelle 5-16).

Bemerkenswert ist, dass der $\text{NO}_3\text{-N}$ Abbauverlauf nicht wie bei CSB und $\text{NH}_4\text{-N}$ nahezu linear von Wanne zu Wanne verlief (siehe Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21).

Tabelle 5-15: $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentrationsverlauf für den HF_LW im Laufe der drei Versuchswochen

Parameter	$\text{NO}_3\text{-N}$			
Einheit	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
Datum	Zufluss	HF_LW W-1	HF_LW W-2	HF_LW W-3
07.11.2019	0.2	0.9	0.6	0.7
15.11.2019	0.4	1.2	0.8	0.5
21.11.2019	0.1	0.6	0.5	0.6

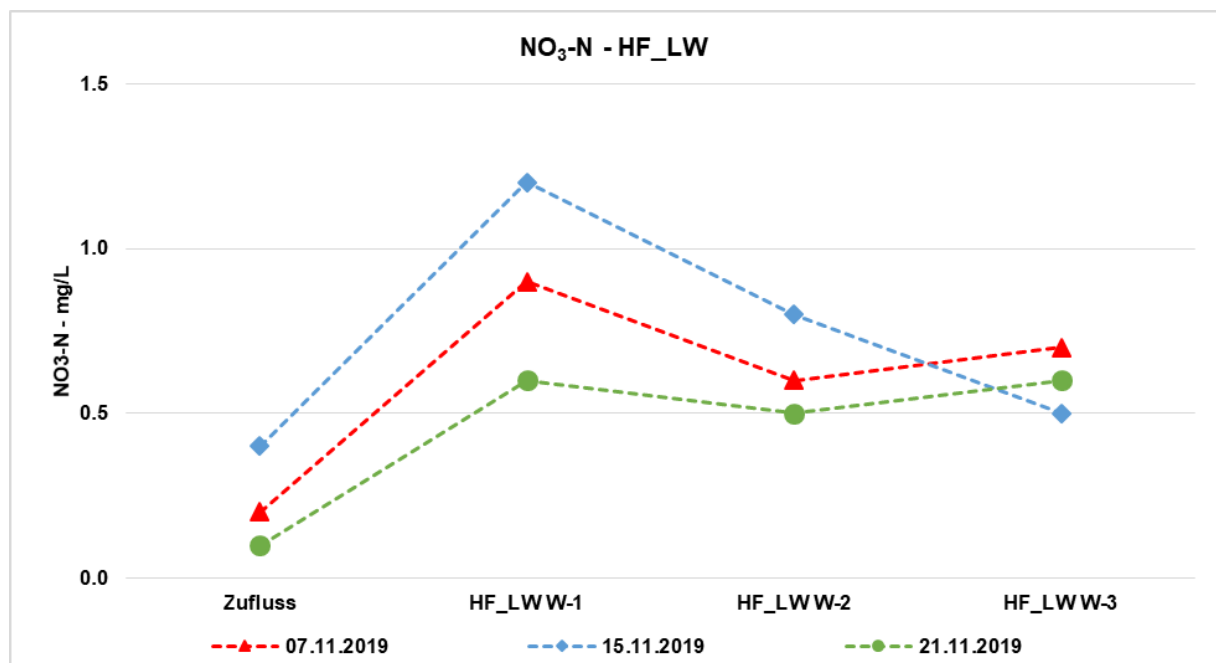
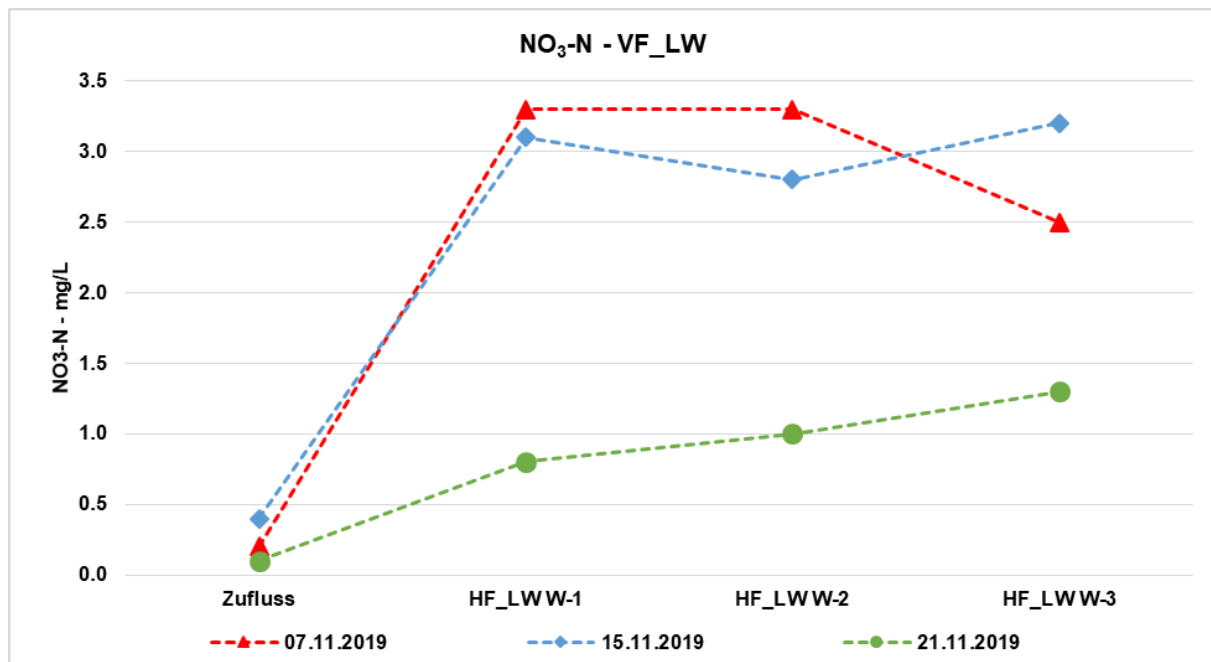


Abbildung 5-20: $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im HF_LW

Tabelle 5-16: $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentrationsverlauf für den VF_LW im Laufe der drei Versuchswochen

Parameter	$\text{NO}_3\text{-N}$			
Einheit	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
Datum	Zufluss	VF_LW W-1	VF_LW W-2	VF_LW W-3
07.11.2019	0.2	3.3	3.3	2.5
15.11.2019	0.4	3.1	2.8	3.2
21.11.2019	0.1	0.8	1.0	1.3

Abbildung 5-21: NO₃-N Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im VF_LW

5.3 Statistische Auswertung mittels Mann-Whitney-U-Test

Da für die Werte von CSB, NH₄-N und NO₃-N am meisten Daten vorhanden waren, wurden diese für den Test ausgewählt. Es wurden nur die Werte der Phase II herangezogen.

Die Nullhypothese H_0 und die Alternativhypothese H_A lauteten:

- H_0 die mittleren Ränge beider Gruppen sind gleich
- H_A die mittleren Ränge beider Gruppen sind nicht gleich

Tabelle 5-17 zeigt die Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests mittels R-Studio. Für CSB ist dieser Wert größer als das Signifikanzniveau 0.05, das bedeutet für diese Gruppe besteht kein signifikanter Unterschied und H_0 wird beibehalten. Anders für NH₄-N und NO₃-N, hier ist der p-Wert kleiner als 0.05, die H_0 wird verworfen.

Dieses Ergebnis gibt noch keinen Aufschluss darüber, welche der beide Wände eine bessere Abbauleistung ermöglicht. Hierfür wurde noch zusätzlich der Mittelwert der Proben herangezogen. Hier wird erkennbar, dass im VF_LW der NH₄-N Abbau im Schnitt größer war als im HF_LW bei gleichzeitiger Erhöhung des NO₃-N Wertes, was auf einen funktionierenden Nitrifikationsprozess hindeutet.

Tabelle 5-17: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test (p-Wert)

	CSB		NH ₄ -N		NO ₃ -N	
p-Wert	0.06676		0.005171		0.005175	
	HF_LW	VF_LW	HF_LW	VF_LW	HF_LW	VF_LW
Mittelwerte	mg·L ⁻¹		mg·L ⁻¹		mg·L ⁻¹	
	125	110	3.9	3.2	0.55	1.64

6. Diskussion

Das Hauptaugenmerk der Diskussion liegt auf der HLR, OLR (beide sowohl auf die Fläche als auch auf das Volumen bezogen), der Reinigungsleistung (in % ausgedrückt), den Grenzwerten zur Wiedernutzung von Wasser sowie der österreichischen Emissionsbegrenzung.

Der Einfluss der Betriebsfaktoren wie HLR und OLR auf die Reinigungseffizienz wurde noch nicht vollständig geklärt. Bei LW ist es wünschenswert so viel GW wie möglich auf so wenig Fläche wie notwendig zu behandeln. Eine zu hohe HLR bedeutet auch eine erhöhte OLR bei niedriger Aufenthaltsdauer. Das führt dazu, dass die Reinigungsleistung nachlässt (Boano et al., 2020). Hier ist es eine Herausforderung die Balance zwischen HLR, OLR und der erwünschten Reinigungsleistung zu finden.

Gerade dort wo die Fläche nur begrenzt zur Verfügung steht, wie es beim LW meistens der Fall ist, könnte die Tiefe der Wanne und somit das Gesamtvolumen des Filters ausschlaggebend für die Reinigungsleistung sein. Um die Studien besser miteinander vergleichen zu können, wurde hier sowohl die HLR als auch die OLR auf das Filtervolumen erweitert und nicht wie gewöhnlich nur auf die Filterfläche bezogen.

In Tabelle 6-1 sind die Parameter HLR und OLR aus der Versuchsanlage in der Phase II der Zusammenfassung derselben Faktoren aus der Literaturrecherche gegenübergestellt. Für HLR und OLR wurde der durchschnittliche Wert ($70 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$) aus einer Beschickungswoche genommen.

Der Vergleich in Tabelle 6-1 zeigt, dass das mittlere HLR-Verhältnis, Versuchsanlage:Zusammenfassung aus der Literaturrecherche, bei rund 1:3 ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) und 1:4 ($\text{L} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) liegt. Das mittlere OLR-Verhältnis liegt auf die Flächen bezogen bei rund 1:1 (CSB) und 2:1 (BSB₅) und auf das Volumen bezogen bei über 2:1 (CSB, BSB₅).

Die höhere OLR (bezogen auf das Volumen) in der Versuchsanlage resultiert aus der erhöhten HLR beziehungsweise der höheren Zulaufkonzentrationen im Vergleich zur Zusammenfassung der Literaturrecherche. Die Zulaufkonzentrationen wurden so ausgewählt, um so nah wie möglich an Werten der echten GW-Konzentrationen (siehe Tabelle 4-1) zu bleiben.

Um die Betriebsfaktoren HLR und OLR in der Versuchsanlage zu senken, müsste die Anlage entweder um eine oder mehrere Wannen erweitert oder die Beschickungsmenge reduziert werden.

In Tabelle 6-2 werden die Reinigungsleistungen der Versuchsanlage jenen der Zusammenfassung der Literatur gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass beide Anlagenteile gut funktionierten und ähnliche Ergebnisse lieferten wie die Versuche aus der Literaturrecherche.

Eine Nitrifikation fand jedenfalls statt, nur nicht im selben Ausmaß wie in der Zusammenfassung der Literaturrecherche. Im HF_LW herrschen überwiegend anaerobe Verhältnisse und daher war der $\text{NH}_4\text{-N}$ Abbau wie erwartet niedriger als im VF_LW. Der $\text{NH}_4\text{-N}$ Abbau im VF_LW war vergleichsweise relativ niedrig. Dies kann auf die höhere HLR und OLR beziehungsweise auf das Abflussverhalten und die kurze Aufenthaltsdauer des GW in der Anlage zurückgeführt werden (siehe Tabelle 5-8).

Diese Vergleiche zeigen, dass die Beschickungsmenge in der Versuchsanlage im Schnitt geringer war als in den Vergleichsstudien bei gleichzeitig höherer organischer Belastung. Durch die Gegenüberstellung der Reinigungsleistung wird klar, dass die Anlage trotz höherer OLR gut funktionierte.

Der Vergleich zwischen den Auslaufkonzentrationen aus der Versuchsanlage und den Grenzwerten für die Wiedernutzung von Wasser aus Kapitel 3.2.1 sowie der österreichischen Emissionsbegrenzung ist in Tabelle 6-3 aufgelistet. Die Versuchsanlage erfüllt in einigen Ländern die Voraussetzungen für die Wiedernutzung nicht. Die CSB und BSB₅-Werte konnten nicht eingehalten werden. Die österreichische Emissionsbegrenzung für CSB und BSB₅ wurden

ebenfalls überschritten. Auch hier kann allgemein festgehalten werden, dass der VF_LW im Schnitt eine bessere Reinigungsleistung hatte als das HF_LW.

Tabelle 6-1: Gegenüberstellung der statistischen Parameter der Betriebsfaktoren (HLR und OLR) aus der Versuchsanlage in Phase II und aus der Zusammenfassung der Literaturrecherche

		VA Phase II	Zfg. Literatur	VA Phase II	Zfg. Literatur	VA Phase II	Zfg. Literatur	VA Phase II	Zfg. Literatur
		Mittelwert		Standardabweichung		Min		Max	
HLR	$L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$	78*	216	-	300	-	15	-	1146
	$L \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$	389*	1520	-	2169	-	114	-	5730
OLR	$gCSB \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$	36	30	8	31	29	4	51	122
	$gBSB_5 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$	17	8	4	6	15	2	23	19
	$gCSB \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$	181	88	38	112	144	6	257	369
	$gBSB_5 \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$	87	35	20	37	74	3	117	94

* hier handelt es sich um den durchschnittlichen Tageswert einer Beschickungswoche

Tabelle 6-2: Gegenüberstellung der Reinigungsleistungen aus der Versuchsanlage und der Literaturrecherche

	VA Phase II			VA Phase II			VA Phase II			VA Phase II		
	HF_LW	VF_LW	Zfg. Literatur	HF_LW	VF_LW	Zfg. Literatur	HF_LW	VF_LW	Zfg. Literatur	HF_LW	VF_LW	Zfg. Literatur
	Mittelwert			Standardabweichung			Min			Max		
CSB	73%	77%	70%	3%	6%	28%	69%	66%	18%	80%	86%	96%
BSB ₅	77%	86%	65%	6%	5%	31%	71%	80%	22%	83%	90%	99%
TOC	61%	63%	60%	5%	14%	17%	55%	48%	42%	64%	74%	86%
TN _b	45%	53%	60%	25%	20%	20%	17%	39%	39%	61%	67%	88%
NH ₄ -N	51%	61%	72%	16%	12%	13%	12%	29%	62%	71%	73%	86%
P _{ges}	40%	34%	29%	15%	23%	11%	25%	8%	10%	59%	64%	40%

Tabelle 6-3: Gegenüberstellung Auslaufkonzentrationen Versuchsanlage, Grenzwerte für die Wiedernutzung von Wasser und österreichische Emissionsbegrenzung (Sanz und Gawlik, 2014; Vuppaladadiyam et al., 2019; BGBl. Nr. 186/1996)

	Parameter	CSB	BSB ₅	N	P	TOC
	Einheit	mg·L ⁻¹				
Grenzwerte für die Wiedernutzung	Zypern	70	10-70	15	2-10	-
	Deutschland	-	20	-	-	-
	Frankreich	60	-	-	-	-
	Griechenland	-	10-25	30	1-2	-
	Italien	100	20	15	2	-
	Spanien	-	-	10	2	-
	Indien	<250	<30	<50	-	-
	China	<15	10-20	15-20	1-5	-
	Australien	20	-	-	-	-
	Japan	-	<20	-	-	-
	Jordan	100-500	30-300	50-70	30	-
	Slowenien	200	30	10	1	-
	USA	-	<10	-	-	-
	Kanada	<150	<50	-	-	-
Emissionsgrenzen	Österreich	90	25	-	2	25
VA Phase II	HF_LW	125	49	9	0,27	44
	VF_LW	110	30	10	0,27	38

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigen, dass die Reinigung von GW in LW-Systemen funktionieren kann, unabhängig von dessen hydraulischer Konfiguration (vertikal oder horizontaldurchflossen). Es konnte nicht durch Zahlen belegt werden, welche der beiden Anlagenteile der bessere war. Der VF_LW schnitt in Puncto Nitrifikation besser ab als der HF_LW, wie Kapitel 5.3 zu entnehmen ist. In anderen Bereichen konnten keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden.

Aus Kapitel 5.2.6 kann festgehalten werden, dass die Reinigungsstrecke in Bezug auf HLR und OLR zu kurz war. Um die Reinigungsleistung zu verbessern, könnten in zukünftigen Versuchen niedrigere HLR und OLR angewendet werden. Dies kann unter anderem bei gleichbleibender GW-Rezeptur und Beschickung durch den Einbau einer vierten Wanne erreicht werden.

Die Beschickung der Versuchsanlage wurde durch Zeitsteuerung bestimmt. Durch diese Art der Steuerung kommt es zu keiner kontinuierlichen Beschickungsmenge. Je geringer der Füllstand ist, desto weniger GW fließt (siehe Kapitel 5.2.2). Um dieses Problem zu lösen, könnte die Steuerung nicht über Zeit sondern über Menge laufen, um eine gleichbleibende Dosis an GW pro Beschickung zu erreichen.

Der Vergleich mit anderen Studien in Kapitel 6 hat gezeigt, dass die Versuchsanlage ähnliche Reinigungsleistungen bei geringerer HLR und höherer OLR erzielte. Das verstärkt die oben genannte Erwägung einer Änderung der HLR und OLR für zukünftige Versuche. Auch die Gegenüberstellung mit Grenzwerten für Wiedernutzung von Wasser und mit der österreichischen Emissionsbegrenzung zeigt (siehe Tabelle 6-3), dass die Anlage teilweise noch optimiert werden sollte.

Das Potenzial der dezentralen GW-Reinigung in LW-Systemen ist längst nicht ausgeschöpft: Kläranlagenentlastung, Recyceln von Wasser und weiteren Ressourcen wie Stickstoff oder Phosphor, Verbesserung des Mikroklimas. Es besteht Bedarf an weiterer Forschung, die auf einheitlichen Kriterien und Methoden basiert, damit eine Vergleichbarkeit einfacher vonstattengeht.

Weitere Punkte, die nicht Gegenstand dieser Arbeit waren, wie zum Beispiel die Umsetzung an bestehenden Gebäuden, die Wirtschaftlichkeit, die Koppelung mit einer Trockentrenntoilette als Gelbwasserreinigungsanlage könnten auch für weitere Untersuchung von Interesse sein.

8. Zusammenfassung

Der erste Schritt dieser Masterarbeit war die Durchführung einer Literaturrecherche zur Identifikation von potenziellen vergleichbaren Studien zum Thema GW-Reinigung in Fassadenbegrünungen. Insgesamt kamen sieben Studien in die engere Auswahl. Diese Versuche verfolgten sehr vielfältige Ziele. Die Outputs und deren Darstellungen waren ebenso unterschiedlich. Dies erschwerte eine Gegenüberstellung der Ergebnisse. Ein direkter Vergleich zwischen HF_LW und VF_LW, wie in dieser Masterarbeit, konnte nicht gefunden werden.

Gleich zu Beginn dieser Arbeit wurden die unterschiedlichen Herangehensweisen zur Herstellung von GW aus der Literaturrecherche untersucht.

Das Hauptziel dieser Arbeit war die Sammlung von genügend Daten, um einen Vergleich, sowohl mit anderen Studien als auch beider Anlagenteile (HF_LW und VF_LW) machen zu können. Um das zu erreichen, wurde eine Versuchsanlage gebaut und betreut. Innerhalb von 225 Tagen wurden insgesamt 26 Proben des Zuflusses sowie je 24 Proben des HF_LW und VF_LW genommen. Die Ergebnisse der Proben gaben Einblicke in die systembedingten Reinigungsprozesse:

- Es konnte beobachtet werden, dass vor allem in Phase II Nitrifikation stattgefunden hat. In dieser Phase waren die $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentrationswerte im VF_LW ständig höher als die des Zuflusses. Dieser Zustand zeigte sich auch gegen Ende der Phase II im HF_LW. Ob Denitrifikation stattfand kann nicht mit Sicherheit behauptet werden.
- Weitere Abbauvorgänge waren auch in Bezug auf CSB und BSB_5 beobachtbar. Die Abbauleistung beim CSB lag im Schnitt bei 73% für den HF_LW und 76% für den VF_LW. Beim BSB_5 lag die Abbauleistung bei 78% für den HF_LW und 87% für den VF_LW.

Ein weiteres Ziel war es, am Ende der Versuche festzustellen, ob sich HF_LW und VF_LW voneinander unterscheiden. Hierfür wurde ein statischer Test angewendet, der Mann-Whitney-U-Test. Es wurden nur Daten von CSB, $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ aus Phase II berücksichtigt. Die Auswertung ergab:

- Für CSB besteht kein signifikanter Unterschied zwischen HF_LW und VF_LW.
- Für $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ konnte ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Konzentrationen festgestellt werden.

Welche der beiden Anlagenteile die bessere Reinigungsleistung aufweist, wird erst durch die Betrachtung der Mittelwerte erkannt. Hier lag der VF_LW im Schnitt vorne.

9. Literatur

- Abed, S.N.; Scholz, M. (2016). *Chemical simulation of greywater*. In: Environmental Technology, 37:13, S. 1631-1646. DOI: 10.1080/09593330.2015.1123301
- Aicher, A.; Londong, J. (2018). *Development of a Living Wall System for Greywater Treatment*. 15th International Specialized Conferences on Small Water and Wastewater Systems
- BMLFUW (2010). *Studie - Wasserverbrauch und Wasserbedarf - Teil1: Literaturstudie zum Wasserverbrauch - Einflussfaktoren, Entwicklung und Prognosen*. [Zugriff am: 18. März 2019]. Verfügbar unter: <https://www.bmnt.gv.at/dam/jcr:00070937-0320-4544-b6a4-320325dcfd86/Wasserverbrauch%20Wasserbedarf%20Literaturstudie.pdf>
- BMLFUW (2012). *Wasserverbrauch und Wasserbedarf - Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch*. [Zugriff am: 04. November 2019]. Verfügbar unter: <https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:5d05561a-53a5-47ad-b0b2-2df5d9bae05e/Wasserverbrauch%20und%20Wasserbedarf.pdf>,
- Boano, F.; Caruso, A.; Costamagna, E.; Ridolfi, L.; Fiore, S.; Demichelis, F.; Galvão, A.; Pissoneiro, J.; Rizzo, A.; Masi, F. (2020). *A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits*. In: Science of the Total Environment, 711, S. 134731-134756. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134731
- Bortz, J.; Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, 7. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-12769-4
- Bruneder, M. (2020). *Untersuchung der Eigenschaften von Substratkomponenten für Fassadenbegrünungen unter besonderer Berücksichtigung der Bewässerung mit Grauwasser und der ökologischen Verträglichkeit einzelner Bestandteile*. Diplomarbeit / Masterarbeit - Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB), BOKU-Universität für Bodenkultur
- BGBI. Nr. 186/1996. *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen (AAEV)*. [Zugriff am: 03. September 2019]. Verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010977>
- Bustami, R.A.; Belusko, M.; Ward, J.; Beecham, S. (2018). *Vertical greenery systems: A systematic review of research trends*. In: Building and Environment, 146. S.226-237. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.09.045
- Comino, E.; Riggio, V.; Rosso, M. (2013). *Grey water treated by an hybrid constructed wetland pilot plant under several stress conditions*. In: Ecological Engineering, 53, S. 120-125. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.11.014
- Diaper, C.; Toifl, M.; Storey, M. (2008). *Greywater technology testing protocol*. In: Water for a Healthy Country Flagship Report series. [Zugriff am: 17. November 2019]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/237506644_Greywater_Technology_Testing_Protocol
- Dotro, G.; Langergraber, G.; Molle, P.; Nivala, J.; Puigagut, J.; Stein, O.; Sperling, M. von; Dotro, G. (2017). *Treatment wetlands*. Biological wastewater treatment series. ISBN: 9781780408774 DOI: 10.2166/9781780408774
- DWA (2008). *Neuartige Sanitärsysteme*. DWA-Themen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA). ISBN: 978-3-941089-37-2
- DWA (2017). *Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen*. DWA-Regelwerke. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA). ISBN: 978-3-88721-525-5

- Fowdar, H.S.; Hatt, B.E.; Breen, P.; Cook, P.L.M.; Deletic, A. (2017). *Designing living walls for greywater treatment*. In: Water Research, 110, S. 218-232. DOI: 10.1016/j.watres.2016.12.018
- Friedler, E. (2004) *Quality of Individual Domestic Greywater Streams and its Implication for On-Site Treatment and Reuse Possibilities*. In: Environmental Technology, 25:9, S. 997-1008. DOI: 10.1080/09593330.2004.9619393
- Geller, G.; Höner, G. (2003). *Anwenderhandbuch Pflanzenkläranlagen: praktisches Qualitätsmanagement bei Planung, Bau und Betrieb*. Engineering online library. ISBN: 978-3-642-18502-1
- Ghaitidak, D.M.; Yadav, K.D. (2013). *Characteristics and treatment of greywater - a review*. In: Environmental Science and Pollution Research 20, S. 2795–2809. DOI: 10.1007/s11356-013-1533-0
- Grafton, R.Q.; Ward, M.B.; To, H.; Kompas, T. (2011). *Determinants of residential water consumption: Evidence and analysis from a 10-country household survey*. In: Water Resources Research, 47, W08537, S. 1-14. DOI: 10.1029/2010WR009685
- Gross, A.; Maimon, A.; Alfiya, Y.; Friedler, E. (2015). *Greywater Reuse*. Taylor & Francis Group. ISBN-13: 978-1-4822-5505-8
- Gross, A.; Shmueli, O.; Ronen, Z.; Raveh, E. (2007). *Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW) - a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households*. In: Chemosphere, 66, S. 916-923. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.06.006
- Gujer, W. (2007). *Siedlungswasserwirtschaft. 3., bearbeitete Auflage*. Springer-Verlag. ISBN-10 3-540-34329-6
- GIZ (2011). *Technology review of constructed wetlands*. [Zugriff am: 09. November 2019]. Verfügbar unter: https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-930-giz2011-en-technology-review-constructed-wetlands.pdf
- Höfler, A. (2019). *Ausströmen von Flüssigkeiten (Torricelli's Theorem)*. [Zugriff am: 25. Juni 2020]. Online Verfügbar unter: <https://www.tec-science.com/de/mechanik/gase-und-fluessigkeiten/ausstromen-ausflussgeschwindigkeit-fluessigkeiten-torricelli-theorem/>
- 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*. Environmental Technology, 31, S. 215-223. DOI: 10.1080/09593330903431547
- Kadewa, W.W.; Le Corre, K.; Pidou, M.; Jeffrey, P.J.; Jefferson, B. (2010). *Comparison of grey water treatment performance by a cascading sand filter and a constructed wetland*. In: Water Science & Technology-WST, 62:7, S. 1471–1478. DOI: 10.2166/wst.2010.395
- MA 22 (2013): *Leitfaden Fassadenbegrünung*. [Zugriff am: 16. Jänner 2020]. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/fassadenbegruenung-leitfaden.pdf>
- MA 22 (2015): *Urban Heat Islands - Strategieplan Wien*. [Zugriff am: 09. Juni 2020]. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/uhi-strategieplan.pdf>
- Masi, F.; Bresciani, R.; Rizzo, A.; Edathoot, A.; Patwardhan, N.; Panse, D.; Langergraber, G. (2016). *Green walls for greywater treatment and recycling in dense urban areas: a case-study in Pune*. In: Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, 06:2, S. 342–347. ISSN: 2043-9083
- Morandi, C.; Steinmetz, H. (2019). *How does greywater separation impact the operation of conventional wastewater treatment plants?* In: Water Science and Technology, 79:8, S. 1605-1615. DOI: 10.2166/wst.2019.165
- Morel, A.; Diener, S. (2006). *Greywater management in Low and Middle-income Countries, Review of different treatment systems for households or neighbourhoods*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). ISBN: 3-906484-37-8

- Nazim, F.; Meera, V. (2013). *Treatment of Synthetic Greywater Using 5% and 10% Garbage Enzyme Solution*. In: Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol. 3, No. 4, S. 111-117. ISSN 2277-5056
- OECD (2014): *Die OECD in Zahlen und Fakten*. [Zugriff am: 07. November 2019] Verfügbar unter: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/factbook-2014-de.pdf?expires=1609846533&id=id&accname=guest&checksum=07789F6A2D77ADA226F8F4C8ECABD9B8>
- ÖVGW (2005): *Nutzwasserverwendung - Richtlinie für die Verwendung von Nutzwasser in Gebäuden, ausgenommen industrielle Anwendung - ÖVGW W 86*
- Pradhan, S.; Al-Ghamdi, S.G.; Mackey, H.R. (2019). *Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges*. In: Science of the Total Environment, S. 330–344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.226
- Prodanovic, V.; Hatt, B.; McCarthy, D.; Zhang, K.; Deletic, A. (2017). *Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal*. In: Ecological Engineering, 102, S. 625-635. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.02.045
- Prodanovic, V.; Zhang, K.; Hatt, B.; McCarthy, D.; Deletic, A. (2018). *Optimisation of lightweight green wall media for greywater treatment and reuse*. In: Building and Environment, 131, S. 99-107. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.01.015
- Prodanovic, V.; McCarthy, D.; Hatt, B.; Deletic, A. (2019). *Designing green walls for greywater treatment: The role of plants and operational factors on nutrient removal*. In: Ecological Engineering, 130, S. 184-195. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.02.019
- Rasch, B.; Friese, M.; Hofmann, W.; Naumann, E. (2004). *Quantitative Methoden - Band 2*. Springer-Verlag. ISBN 978-3-662-09632-1
- Sanz, L.A., Gawlik, B.M. (2014). *Water Reuse in Europe - Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation*. JRC Science and Policy Reports. ISBN: 978-92-79-44399-2. DOI: 10.2788/29234
- Surendran, S.; Wheatley, A.D. (1998). *Grey-Water Reclamation for Non-Potable Re-Use*. In: Water and Environment Journal, 12, S. 406-413. DOI: 10.1111/j.1747-6593.1998.tb00209.x
- UBA (2014). *Wassersparen in Privathaushalten: sinnvoll, ausgereizt, übertrieben? Fakten, Hintergründe, Empfehlungen*. [Zugriff am: 30. Oktober 2019]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wassersparen-in-privathaushalten-sinnvoll>
- Vuppaladadiyam, A.K.; Merayo, N.; Prinsen, P.; Luque, R.; Blanco, A.; Zhao, M. (2019). *A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios*. In: Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 18, S. 77-99. DOI: 10.1007/s11157-018-9487-9
- WHO (2006). *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. [Zugriff am: 11. November 2019] Verfügbar unter: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/78265/9241546824_eng.pdf;jsessionid=EC58C6118FC15E0B2F2E8FCEC9E3F847?sequence=1
- Zraunig, A.; Estelrich, M.; Gattringer, H.; Kissner, J.; Langergraber, G.; Radtke, M.; Rodriguez-Roda, I.; Buttiglieri, G. (2019). *Long term decentralized greywater treatment for water reuse purposes in a tourist facility by vertical ecosystem*. In: Ecological Engineering 138, S. 138-147. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.003

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Weltweiter Pro-Kopf-Wassergebrauch (UBA, 2014; Grafton et al., 2011; BMLFUW, 2010, 2012).....	3
Abbildung 3-2: Abwasser Teilströme bezogen auf die Menge in verschiedenen Ländern (Gross et al., 2015; BMLFUW, 2010)	6
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines HF (Morel und Diener, 2006).....	8
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung eines VF (Morel und Diener, 2006)	9
Abbildung 3-5: Grüne Fassade (links) und Living Wall (rechts) (Bustami et al., 2018)	10
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Versuchsanlage	13
Abbildung 4-2: Versuchszeitplan	14
Abbildung 5-1: HF_LW (links) und VF_LW (rechts) am 18.09.2019.....	16
Abbildung 5-2: Abflusskurve für Horizontal- und Vertikalfilter	23
Abbildung 5-3: Abfluss Summendiagramm für beide Systeme (HF_LW und VF_LW)	23
Abbildung 5-4: CSB Zu- und Ablaufkonzentrationen.....	24
Abbildung 5-5: Prozentuale CSB Abnahme im HF_LW und VF_LW.....	25
Abbildung 5-6: BSB ₅ Zu- und Ablaufkonzentrationen.....	25
Abbildung 5-7: TOC Zu- und Ablaufkonzentrationen	26
Abbildung 5-8: NH ₄ -N Zu- und Ablaufkonzentrationen.....	26
Abbildung 5-9: NO ₃ -N Zu- und Ablaufkonzentrationen.....	27
Abbildung 5-10: TN _b Zu- und Ablaufkonzentrationen	27
Abbildung 5-11: P _{ges} Zu- und Ablaufkonzentrationen	28
Abbildung 5-12: Reinigungsleistung in der Einfahrphase und Phase II.....	29
Abbildung 5-13: Vergleich der CSB Zu- und Ablaufkonzentrationen.....	29
Abbildung 5-14: Vergleich der NH ₄ -N Zu- und Ablaufkonzentrationen	30
Abbildung 5-15: Vergleich der NO ₃ -N Zu- Ablaufkonzentrationen.....	30
Abbildung 5-16: CSB Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im HF_LW	31
Abbildung 5-17: CSB Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im VF_LW	32
Abbildung 5-18: NH ₄ -N Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im HF_LW	33
Abbildung 5-19: NH ₄ -N Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im VF_LW	33
Abbildung 5-20: NO ₃ -N Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im HF_LW	34
Abbildung 5-21: NO ₃ -N Konzentrationsverlauf der einzelnen Wannen im VF_LW	35
Abbildung 12-1: Cremeseife, Conditioner, Zahnpasta, Duschgel und Badreiniger (von links nach rechts)	46
Abbildung 12-2: Geschirrspülmittel, Geschirrspültabs, Regeneriersalz (Geschirrspüler), Waschmittel und Weichspüler (von links nach rechts)	46
Abbildung 12-3: HF_LW (links) und VF_LW (rechts) am 15.03.2019.....	48
Abbildung 12-4: HF_LW (links) und VF_LW (rechts) am 03.07.2019.....	48

11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Beschaffenheit von GW (DWA, 2008).....	4
Tabelle 3-2: GW Eigenschaften in unterschiedlichen Ländern (Morel und Diener, 2006; Ghaitidak und Yadav, 2013).....	5
Tabelle 3-3: Grenzwerte für die Wiedernutzung von Wasser in verschiedenen Ländern (Sanz und Gawlik, 2014; Vuppaladadiyam et al., 2019).....	7
Tabelle 4-1: Unterschiedliche Konzentrationen aus echtem und synthetisch hergestelltem GW	12
Tabelle 4-2: Eigenschaften des Filtersubstrats der Living Wall Module (Bruneder, 2020).....	13
Tabelle 5-1: Literaturübersicht.....	16
Tabelle 5-2: Auflistung der Eckdaten der Literaturrecherche mit Kurzbeschreibung, Filtermedium, Korngröße und Beschickung	18
Tabelle 5-3: Betriebsfaktoren (HLR und OLR) der Literaturrecherche	19
Tabelle 5-4: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der Parameter (CSB, BSB ₅ , TOC, TN _b , NH ₄ -N, NO ₃ -N und P _{ges}) der Literaturrecherche	20
Tabelle 5-5: Analyseergebnisse der Basisrezepte	21
Tabelle 5-6: Beschickungsverlauf HF_LW einer Betriebswoche	21
Tabelle 5-7: Beschickungsverlauf VF_LW einer Betriebswoche	22
Tabelle 5-8: Vergleich Abflussverhalten HF_LW und VF_LW	22
Tabelle 5-9: Statistische Parameter (Mittelwert, Standardabweichung, Minimal- und Maximal-Wert) aller untersuchten Werte ab Phase II	24
Tabelle 5-10: Durchschnittliche Reinigungsleistung in Phase II (HF_LW und VF_LW)	24
Tabelle 5-11: CSB Konzentrationsverlauf für den HF_LW im Laufe der drei Versuchswochen.	31
Tabelle 5-12: CSB Konzentrationsverlauf für den VF_LW im Laufe der drei Versuchswochen.	31
Tabelle 5-13: NH ₄ -N Konzentrationsverlauf für den HF_LW im Laufe der drei Versuchswochen	32
Tabelle 5-14: NH ₄ -N Konzentrationsverlauf für den VF_LW im Laufe der drei Versuchswochen	33
Tabelle 5-15: NO ₃ -N Konzentrationsverlauf für den HF_LW im Laufe der drei Versuchswochen	34
Tabelle 5-16: NO ₃ -N Konzentrationsverlauf für den VF_LW im Laufe der drei Versuchswochen	34
Tabelle 5-17: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test (p-Wert).....	35
Tabelle 6-1: Gegenüberstellung der statistischen Parameter der Betriebsfaktoren (HLR und OLR) aus der Versuchsanlage in Phase II und aus der Zusammenfassung der Literaturrecherche ...	37
Tabelle 6-2: Gegenüberstellung der Reinigungsleistungen aus der Versuchsanlage und der Literaturrecherche	37
Tabelle 6-3: Gegenüberstellung Auslaufkonzentrationen Versuchsanlage, Grenzwerte für die Wiedernutzung von Wasser und österreichische Emissionsbegrenzung (Sanz und Gawlik, 2014; Vuppaladadiyam et al., 2019; BGBl. Nr. 186/1996)	37
Tabelle 12-1: Basisrezept 1.....	47

Tabelle 12-2: Basisrezept 2.....	47
Tabelle 12-3: Basisrezept 3.....	47
Tabelle 12-4: Gesamte Analytik des Zu- und Ablaufs der Anlage	49

12. Anhang

12.1 Synthetisches Grauwasser – Herstellungsablauf und Rezepte

Die Herstellung des synthetischen GW erfolgte in einer nicht sterilen Umgebung (Wassertechnikum, BOKU). Die Zutaten waren konventionelle Reinigungsmittel aus dem naheliegenden Supermarkt, wie sie auch in den meisten Haushalten zu finden sind.

Die benötigten Reinigungsmittel wurden mit einer Küchenwaage abgewogen und auf die gewünschte Menge dosiert.

Folgende Reinigungsmittel wurden verwendet:

- Für GW aus Badezimmer:



Abbildung 12-1: Cremeseife, Conditioner, Zahnpasta, Duschgel und Badreiniger (von links nach rechts)

- Für GW aus Küche und Waschküche:



Abbildung 12-2: Geschirrspülmittel, Geschirrspültabs, Regeneriersalz (Geschirrspüler), Waschmittel und Weichspüler (von links nach rechts)

Anschließend wurde das Konzentrat in den GW-Tank geleert und dieser dann auf 1140 L mit Leitungswasser aufgefüllt.

Tabelle 12-1, 12-2 und 12-3 zeigen die Basisrezepte 1, 2 und 3 wobei in Tabelle 12-3 das Rezept, das für die Versuchsperiode eingesetzt wurde, aufgelistet wird.

Tabelle 12-1: Basisrezept 1

Bestandteile	A	B	C
Abwasser (Abfluss SBR*-Anlage)	12.50 mL·L ⁻¹	25.00 mL·L ⁻¹	50.00 mL·L ⁻¹
Putzmittel (Badreiniger)	0.25 mL·L ⁻¹	0.50 mL·L ⁻¹	1.00 mL·L ⁻¹
Geschirrspülmittel	0.13 mL·L ⁻¹	0.25 mL·L ⁻¹	0.50 mL·L ⁻¹
Geschirr-Reiniger-Tabs	0.13 g·L ⁻¹	0.25 g·L ⁻¹	0.50 g·L ⁻¹
Regeneriersalz	0.13 g·L ⁻¹	0.25 g·L ⁻¹	0.50 g·L ⁻¹
Flüssiges Waschmittel	0.50 mL·L ⁻¹	1.00 mL·L ⁻¹	2.00 mL·L ⁻¹
Weichspüler	0.25 mL·L ⁻¹	0.50 mL·L ⁻¹	1.00 mL·L ⁻¹
Shampoo + Duschgel	0.50 mL·L ⁻¹	1.00 mL·L ⁻¹	2.00 mL·L ⁻¹
Conditioner	0.25 mL·L ⁻¹	0.50 mL·L ⁻¹	1.00 mL·L ⁻¹
Zahnpasta	0.06 g·L ⁻¹	0.13 g·L ⁻¹	0.25 g·L ⁻¹
Handspülmittel	0.25 mL·L ⁻¹	0.50 mL·L ⁻¹	1.00 mL·L ⁻¹

* SBR = Sequencing-Batch-Reactor

Tabelle 12-2: Basisrezept 2

Bestandteile	A	B	C
Abwasser (Abfluss SBR-Anlage)	0.00 mL·L ⁻¹	3.13 mL·L ⁻¹	4.13 mL·L ⁻¹
Putzmittel (Badreiniger)	0.15 mL·L ⁻¹	0.30 mL·L ⁻¹	0.60 mL·L ⁻¹
Geschirrspülmittel	0.13 mL·L ⁻¹	0.25 mL·L ⁻¹	0.50 mL·L ⁻¹
Geschirr-Reiniger-Tabs*	0.13 g·L ⁻¹	0.25 g·L ⁻¹	0.50 g·L ⁻¹
Regeneriersalz	0.13 g·L ⁻¹	0.25 g·L ⁻¹	0.50 g·L ⁻¹
Flüssiges Waschmittel	0.40 mL·L ⁻¹	0.80 mL·L ⁻¹	1.60 mL·L ⁻¹
Weichspüler	0.21 mL·L ⁻¹	0.42 mL·L ⁻¹	0.84 mL·L ⁻¹
Shampoo + Duschgel	0.50 mL·L ⁻¹	1.00 mL·L ⁻¹	2.00 mL·L ⁻¹
Conditioner	0.21 mL·L ⁻¹	0.42 mL·L ⁻¹	0.84 mL·L ⁻¹
Zahnpasta	0.03 g·L ⁻¹	0.06 g·L ⁻¹	0.12 g·L ⁻¹
Handspülmittel	0.23 mL·L ⁻¹	0.46 mL·L ⁻¹	0.92 mL·L ⁻¹

Tabelle 12-3: Basisrezept 3

Bestandteile	Konzentration	Menge
Ammoniumchlorid	0.029 g·L ⁻¹	33 g
Putzmittel	0.100 mL·L ⁻¹	120 g
Geschirrspülmittel	0.125 mL·L ⁻¹	151 g
Geschirr-Reiniger-Tabs	0.130 g·L ⁻¹	7 Stück
Regeneriersalz	0.100 g·L ⁻¹	114 g
Flüssiges Waschmittel	0.300 mL·L ⁻¹	354 g
Weichspüler	0.150 mL·L ⁻¹	167 g
Shampoo + Duschgel	0.500 mL·L ⁻¹	630 g
Conditioner	0.150 mL·L ⁻¹	183 g
Zahnpasta	0.030 g·L ⁻¹	34 g
Handspülmittel	0.100 mL·L ⁻¹	130 g
Leitungswasser	-	Ca. 1138 L

12.2 Anlagenbilder

In Abbildung 12-3 ist die Versuchsanlage am Anfang der Versuchsreihe ohne Pflanzung zu sehen. Abbildung 12-4 zeigt die Versuchsanlage in der Woche der Bepflanzung.



Abbildung 12-3: HF_LW (links) und VF_LW (rechts) am 15.03.2019



Abbildung 12-4: HF_LW (links) und VF_LW (rechts) am 03.07.2019

12.3 Zu- und Ablauf Analytik

Tabelle 12-4: Gesamte Analytik des Zu- und Ablaufs der Anlage

Datum	Zulaufkonzentrationen - mg·L ⁻¹							Ablaufkonzentrationen HF_LW - mg·L ⁻¹							Ablaufkonzentrationen VF_LW - mg·L ⁻¹						
	CSB	BSB ₅	TOC	TN _b	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P _{ges}	CSB	BSB ₅	TOC	TN _b	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P _{ges}	CSB	BSB ₅	TOC	TN _b	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P _{ges}
10.04.2019	524				12		0.89														
17.04.2019	446				8.8	0.1															
18.04.2019	517				13	1.2		385				6.5	0.5		289				2.6	0.5	
25.04.2019	611				13	0.6		429				5.6	0.4		337				3.4	0.3	
03.05.2019	563				11	0.4		335				4.7	0.2		284				2.9	0.2	
09.05.2019	511				11	0.3		304				4.3	0.1		303				3.4	0.2	
16.05.2019	646				11	0.1		361				4	0.1		313				3.5	0.1	
23.05.2019	620				13	0.1		339				3.5	0.1		319				3.7	0.1	
06.06.2019	572	330	154	16	9.3	0.1	1	256	110	76.2	8.5	3.6	0.1	0.69	219	93	53.9	8.3	3.4	0.1	0.68
13.06.2019	525				13	0.1		169				4.1	0.2		119				3.9	0.1	
21.06.2019	485				13	0.5		148				3.8	0.5		165				3.5	0.5	
27.06.2019	546				13	0.1		167				4	0.03		163				4.2	0.1	
11.07.2019	638				4.9	1.3		189				4.3	0.2		214				3.5	0.4	
25.07.2019	660				13	0.1		150				4.3	0		170				3.7	0	
09.08.2019	640	300	199	18	12	0.2	0.77	170	50	70.7	15	6.7	0.1	0.58	120	30	52.5	11	4.2	1	0.5
19.09.2019	440	200			7.5	0.1	0.26	120	50			3.8	0.5	0.18	99	40			2.9	2.3	0.18
26.09.2019	430				4.3	1		100				3.4	0.8		80				2.5	1.4	
03.10.2019	370				7.6	1.1		110				3.3	0.9		91				2.7	1.4	
10.10.2019	370				7.3	0.4		110				3.6	0.6		78				2.7	1.4	
17.10.2019	410				7.6	0.7		86				3.6	0.5		70				3.2	1.1	
24.10.2019	400	190	64.4	12	8.2	0.3	0.26	120	56	23.9	5.1	3.9	0.3	0.14	110	27	33.5	13	3.8	4.1	0.24
31.10.2019	390				1.8	4		93				3.8	2.2		77				3.3	4.6	
07.11.2019	420				8	0.2		120				3.5	0.7		98				3.1	2.5	
15.11.2019	430				8.2	0.4		120				4.2	0.5		85				2.8	3.2	
21.11.2019	420				9.2	0.1		85				3.2	0.6		59				2.5	1.3	
28.11.2019	410	200	84.1	16	6.7	0.1	0.39	110	40	37.5	6.3	3.1	0.39	0.16	81	22	26.4	5.3	2.7	0.93	0.14

13. Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Guilherme Ribeiro
Email: guilherme.ribeiro@students.boku.ac.at
Geburtsdatum: 04.05.1984
Nationalität Brasilien

Ausbildung

seit Oktober 2017 **Masterstudium der Kulturtechnik und Wasserwirtschaft** an der Universität für Bodenkultur Wien

2013 – 2017 **Bakkalaureat-Studium der Kulturtechnik und Wasserwirtschaft** an der Universität für Bodenkultur Wien

2002 – 2004 **Bakkalaureat-Studium - Soziologie, Anthropologie und Politikwissenschaft** an der *Universidade Federal de S.C.- Brasilien* (nicht abgeschlossen)

1998 – 2001 **Colégio Universitário** (vgl. Gymnasium, Oberstufe mit Matura)

1995 – 1998 **Colégio de Aplicacao** (vgl. Gymnasium, Unterstufe/Oberstufe)

Beruflicher Werdegang

seit August 2016 **Projektmitarbeiter bei DI Kraner ZT GmbH**

2013 –2014 **Bildungskarenz**

2009 –2013 **Jugendarbeiter beim Verein Wiener Jugendzentren**

2008 –2009 **Parkbetreuer beim Verein Wiener Kinderfreunde**

2006 –2008 **Kursleiter für Capoeira-Angola Kurse**

2002 – 2004 **Kaufmännische Bürotätigkeiten an der Universidade Federal de Santa Catarina** (Geringfügige Beschäftigung)

Persönliche Fähigkeiten und Kompetenzen

Muttersprache:	Portugiesisch
Fremdsprachen- kenntnisse:	• Deutsch (in Wort und Schrift) • Englisch (in Wort und Schrift) • Spanisch (in Wort und Schrift)
Computerkennt- nisse:	MS Office, AUTOCAD, RFEM, Adobe-Premiere, ArcGIS (Grundkenntnisse)
Führerschein:	Klasse B
Persönliche Interessen:	• Schifahren • Wandern/Hochtouren • Reisen (mit selbst umgebauten VW-T5)

14. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Masterarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

Weiters versichere ich, dass ich diese Masterarbeit weder im Inland noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Wien, 04.03.2021,

Guilherme Ribeiro