

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN,
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT LSFM

OPTIMIERUNG EINER WANDBEGRÜNUNG MIT INTEGRIERTER GRAUWASSERAUFBEREITUNG

Bachelorarbeit

von

Attenhofer Mariline

Bachelorstudiengang 2020

Abgabedatum 01.02.2024

Umweltingenieurswesen

Fachkorrektoren:

Grau, Maximilian
ZHAW Life Sciences und Facility Management
Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

Nikita Krähenbühl
ZHAW Life Sciences und Facility Management
Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

Impressum

Autoren:

Attenhofer Mariline
Bachelorstudiengang Umweltingenieurwesen

Zitiervorschlag:

Attenhofer, M., (2024, unveröffentlicht). Optimierung einer Wandbegrünung mit integrierter Grauwasseraufbereitung. Bachelorarbeit. Wädenswil: Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften

Institut Umwelt und Natürliche Ressourcen (IUNR)

Grüntalstrasse 14, Postfach
CH-8820 Wädenswil

Schlagworte: Grauwasseranlage, naturbasierte Grauwasseraufbereitung, Wandbegrünung mit integrierter Grauwasseraufbereitung

Keywords: Greywater system, nature-based greywater treatment, wall greening with integrated greywater treatment

Abstract

Bei dieser Arbeit wurde eine Wandbegrünung mit integriertem Grauwasser Rezyklier-System untersucht. Das Rezyklieren von Grauwasser ist aus verschiedenen Gründen sinnvoll. In der Schweiz würde so der Trinkwasserbedarf um bis zu zwei Drittel sinken und die Kreislaufwirtschaft würde auf diese Weise gefördert werden. In anderen Regionen kann die Grauwasserbehandlung aus weiteren Gründen von Vorteil sein zum Beispiel bei Wasserknappheit oder auch bei fehlender Wasserversorgungs- oder Abwasserentsorgungsinfrastruktur. Damit dieses Grauwasseraufbereitungssystem in Betrieb genommen werden kann, wurden verschiedene Versuche mit 4 unterschiedlichen Anlagen durchgeführt. Bearbeitet wurden die Themen: Anordnung der Module, Einfluss der Durchflussgeschwindigkeit, Einfluss der Anfangskonzentration auf die Abbaurate und auf die Abbaudauer, Veränderungen bei einem diskontinuierlichen Betrieb, Unterschiede von künstlichem und reellem Grauwasser und die Grenzwerte von Grauwasser.

Ein essenzieller Unterschied der Systeme war, dass einige mit künstlichem Grauwasser laufen, während eine Pilot-Anlage reales Grauwasser eines Mehrfamilienhauses aufbereitete. Aus den Resultaten ging hervor, dass eine geringere Durchflussrate zu einer höheren CSB-Abbaurrate führt. Die Temperatur und die Anfangskonzentration haben keinen oder nur einen geringen Einfluss auf den CSB-Abbau. Für die Parameter CSB, Sauerstoffsättigung und pH waren die Konzentrationen nach höchstens 48 Stunden Aufbereitungszeit unter den Grenzwerten verschiedener Richtlinien. Bei der Trübung und dem Ammoniumgehalt sind die Konzentrationen auch nach der Aufbereitung über vorgeschriebenen Grenzwerten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Hintergrund	1
1.1.1	Grauwasser.....	1
1.1.2	Wandbegrünung.....	1
1.2	Grauwasseraufbereitung.....	2
1.2.1	Grauwasseraufbereitungsmethoden	2
1.2.2	Tropfkörperfilter.....	3
1.2.3	Grenzwerte/ wichtige Parameter.....	5
1.3	Forschungsfragen	7
2	Material und Methoden	8
2.1	Anlagen.....	8
2.1.1	Aufbau	8
2.1.2	Übersicht	9
2.1.3	Substrat und Pflanzen.....	10
2.1.4	Künstliches Grauwasser.....	11
2.2	Probenahme	12
2.3	Änderungen verschiedener Betriebsparameter.....	12
2.3.1	Anordnung der Module	12
2.3.2	Durchflussgeschwindigkeit.....	12
2.3.3	Einfluss der Anfangskonzentration auf den CSB-Abbau.....	12
2.3.4	Einfluss der Temperatur auf die Abbaurate	13
2.3.5	Diskontinuierlicher Betrieb.....	13
2.4	Analysen	13
2.5	Datenanalyse	14
3	Ergebnisse und Diskussion	16
3.1	Anordnung der Module.....	16
3.2	Durchflussgeschwindigkeit.....	16
3.3	Einfluss der Anfangskonzentration auf den CSB- Abbau.....	17
3.4	Einfluss der Temperatur auf die Abbaurate	19
3.5	Diskontinuierlicher Betrieb.....	20
3.6	Felz 2 Ergebnisse	21
3.7	Felz 2 ORL, HLR und HRT	23
3.8	Felz 2 Ergebnisse mit Grenzwerten	24
4	Schlussfolgerung.....	29

5	Quellen	30
	Abbildungsverzeichnis.....	33
	Tabellenverzeichnis.....	34
	Anhang	35

Liste mit Abkürzungen

BSB5	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
HLR	Hydraulic loading rate
HRT	Hydraulic retention time
n	Anzahl Versuche
NH ₄	Ammonium
NO ₃	Nitrat
NO ₂	Nitrit
N/W/S/O	Nord/West/Süd/Ost
OLR	Organic loading rate
r	pearson Korrelationskoeffizient
r ²	Bestimmtheitsmass
SAK 254	Spektraler Absorptionskoeffizient bei einer Wellenlänge von 254 nm
TN	Total-Stickstoff
TP	Total-Phosphor

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

1.1.1 Grauwasser

Grauwasser ist leicht verschmutztes Abwasser, welches fäkalienfrei ist. Es stammt aus Duschen, Bädern, Waschmaschine, Geschirrspüler und der Küchenspüle. In der Schweiz wird pro Person und Tag 142 Liter Wasser verbraucht. 66 % des daraus anfallenden Abwassers wird als Grauwasser bezeichnet (Carina Doll et al., 2021). Die Zusammensetzung des Grauwassers variiert von Haushalt zu Haushalt. Die Art von Seifen und Putzmittel welche verwendet werden, aber auch die Art zu Kochen spielt eine Rolle (Morel & Diener Stefan, 2006).

Da die Kontamination von Grauwasser durch Pathogene und Stickstoff gering ist, benötigt die Aufbereitung von Grauwasser weniger Energie, hat somit tiefere Betriebskosten und ist daher eine naheliegende Technologie, um Wasser zu rezyklieren (Boano et al., 2020; Li et al., 2009). Rezykliertes Wasser eignet sich ideal für verschiedene Zwecke, darunter die Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen, Reinigungszwecke wie Strassen- oder Autowäsche, sowie gebäudetechnische Anwendungen wie Toilettenspülung und Waschmaschinenbetrieb. Darüber hinaus trägt es zur Anreicherung des Grundwassers bei. Je nach Aufbereitungsgrad kann das Wasser auch als Trinkwasser wiederverwendet werden (BUWAL, 2003; Jens Haberkamp et al., 2021). Für diese Verwendungszwecke würde ansonsten hochwertiges Wasser verwendet werden, welches folgendermassen gespart werden kann. In der Schweiz würde so der Trinkwasserbedarf um bis zu zwei Drittel sinken und die Kreislaufwirtschaft würde auf diese Weise gefördert werden. In anderen Regionen kann die Grauwasserbehandlung aus weiteren Gründen von Vorteil sein zum Beispiel bei Wasserknappheit oder auch bei fehlender Wasserversorgungs- oder Abwasserentsorgungsinfrastruktur. Weitere Einsatzmöglichkeiten gibt es bei Handwaschstationen in Hüttensiedlungen, Flüchtlingslagern oder für Waschbecken in Zügen und Flugzeugen, welche Wasser ohne vorhandene Infrastruktur benötigen (Carina Doll et al., 2021; Li et al., 2009).

1.1.2 Wandbegrünung

Die Forschung zu Grünflächen in städtischen Gebieten hat seit dem 20. Jahrhundert erheblich zugenommen. Zahlreiche Studien belegen die Bedeutung von Grünflächen in Städten. Besonders gewinnen vertikale Begrünungssysteme und Gründächer zunehmend an Bedeutung (Mohammad Mehdi Sadeghian, 2016).

Fassadenbegrünungen erweisen sich als äusserst vorteilhaft für städtische Umgebungen. Sie haben positive Auswirkungen auf die Umwelt, Wirtschaft und das soziale Wohlbefinden in urbanen Gebieten. Die Urbanisierung führt zu einer Veränderung des natürlichen Strahlungsenergiegleichgewichts, was zu städtischen Wärmeinseln führt, also einem Anstieg der Stadttemperaturen. Dies stellt eine ernsthafte Bedrohung dar und erhöht Sterblichkeit und Morbidität. Fassadenbegrünungen senken die Oberflächentemperatur und reduzieren somit das Wärmeinsel-Phänomen (Susca et al., 2022).

Wandbegrünungen spenden nicht nur Schatten, sondern ermöglichen auch Wasserverdunstung, welche kühlend wirkt und die Umgebungstemperatur senkt. Studien zeigen, dass der Energieverbrauch für Kühlung und Heizung von Gebäuden, durch Fassadenbegrünung erheblich

gesenkt werden kann. Luftreinigung, Beitrag zur Starkregenbewältigung und Förderung der Biodiversität sind weitere ökologische Vorteile (Koch et al., 2020).

Ökonomisch zeigen sich Vorteile in Form von reduzierten Entwässerungskosten, verlängerten Gebäudelebensdauern und geringeren Wartungskosten. Grüne Wände können zu erheblichen Energieeinsparungen führen. Soziale Vorteile umfassen Erholungsräume, soziale Interaktion, ästhetische Verbesserung, Stressreduktion und Lärminderung (Mohammad Mehdi Sadeghian, 2016).

Zusammenfassend haben Wandbegrünungen vielfältige positive Eigenschaften und sind bedeutende, nachhaltige Elemente in städtischen Gebieten. Ihre Integration trägt zur Umweltfreundlichkeit, wirtschaftlichen Aufwertung und sozialen Bereicherung von Städten bei (Mohammad Mehdi Sadeghian, 2016).

1.2 Grauwasseraufbereitung

1.2.1 Grauwasseraufbereitungsmethoden

Es gibt verschiedene naturbasierte Technologien sogenannte «nature-based solutions», um Grauwasser aufzubereiten. Diese Technologien können, wie in der Tabelle 1 beschrieben, traditionelle Pflanzenkläranlagen aber auch neue, integrierte Technologien wie Dachbegrünungen und Wandbegrünungen sein.

Bei der Grauwasseraufbereitung muss auf einige Punkte geachtet werden, damit die Wiederverwendung ohne Gefahr getätigt werden kann: Die Hygiene muss gewährleistet sein. Zudem müssen rechtliche Rahmenbedingungen eingehalten werden, was im Kapitel 1.2.3 näher beschrieben wird. Um einen stabilen Betrieb gewährleisten zu können, muss die Technologie überwacht werden und vor einer möglichen Fehlfunktion warnen. Dafür können zum Beispiel Online-Sensoren benutzt werden. Ein wichtiger Punkt ist zudem, dass das gesamte Abwassersystem angeschaut wird. Einen reduzierten Durchfluss und erhöhte Konzentration von Feststoffen kann zu Komplikationen in der Kanalisation führen (Carina Doll et al., 2021).

Tabelle 1: verschiedene Arten von natürlichen Grauwasseraufbereitungssystemen (Boano et al., 2020; Dalahmeh et al., 2011)

	BESCHREIBUNG	METHODE	KENNWERTE
PFLANZENKLÄRANLAGEN	Die häufigsten Systeme sind horizontale oder vertikale unterirdische Ströme.	<ul style="list-style-type: none"> • Biologischer Abbau durch Mikroorganismen • Immobilisierung von Schadstoffen durch verschiedene Materialien wie Boden, pflanzenwurzeln können Schadstoffe binden • Filtration durch Substrate wie zum Beispiel Sand oder Kies • Die Pflanzen des Systems nehmen Nährstoffe auf und bauen bestimmte Substanzen ab • Je nach Anlage kann auch das Sonnenlicht und der Luftaustausch einen Reinigungseffekt haben (Boano et al., 2020) 	vertikal: HLR: bis 1000 L/m ² /d OLR: 20g CSB/ m ² /d horizontal: HLR: bis 50 L/m ² /d OLR: bis 20g CSB/ m ² /d
VERTIKAL- ODER DACH-BEGRÜNUNG	Vegetationsflächen auf Dächern oder an Innen- oder Aussenwänden angebracht, Wandgebundene Systeme mit Gefässen für Pflanzen und Substrate	<ul style="list-style-type: none"> • Biologischer Abbau durch Mikroorganismen (Boano et al., 2020) 	Dach: OLR: 20g CSB/ m ² /d Fassade: HLR: bis 500 L/ m ² /d OLR: bis 160 CSB/ m ² /d

1.2.2 Tropfkörperfilter

Für die Grauwasseraufbereitung wird eine Technologie angewendet, welche normalerweise für Abwasser, beziehungsweise in Kläranlagen angewendet wird. Der eingesetzte Filter heisst Tropffilter (engl. Trickling filter). Tropfkörperfilter sind weitverbreitete, aerobe, festbett Behandlungssysteme. Wasser wird kontinuierlich über ein Medium getropft, oder gesprayed, welches aus verschiedenen Materialien bestehen kann. Das gängigste Design bestand jahrelang einfach aus einem Bett aus Steinen, welche einen Durchmesser von 25-100 mm aufweisen, wie dies in der Abbildung 1 zu sehen ist. Das Bett verfügte über eine Tiefe von 1 bis 3 m, wo das Abwasser hindurchfloss. Es können aber auch Materialien wie zum Beispiel: Gestein, Kies, kleingemachte PVC Flaschen oder Plastik verwendet werden. Wichtig ist, dass der Filter ein hohes Oberflächen-Volumen-Verhältnis bietet. Durch Mikroorganismen, welche auf der Oberfläche des Mediums wachsen, entsteht ein Biofilm. Durch diesen wird organisches Material aus dem Abwasser adsorbiert und zersetzt. Durch eine aktive oder passive Belüftung werden aerobe Bedingungen geschaffen, um eine ausreichende Aufbereitung zu garantieren, aber auch um unangenehme Gerüche zu vermeiden (Elizabeth Tille et al., 2014; United States Environmental Protection Agency, 2000).

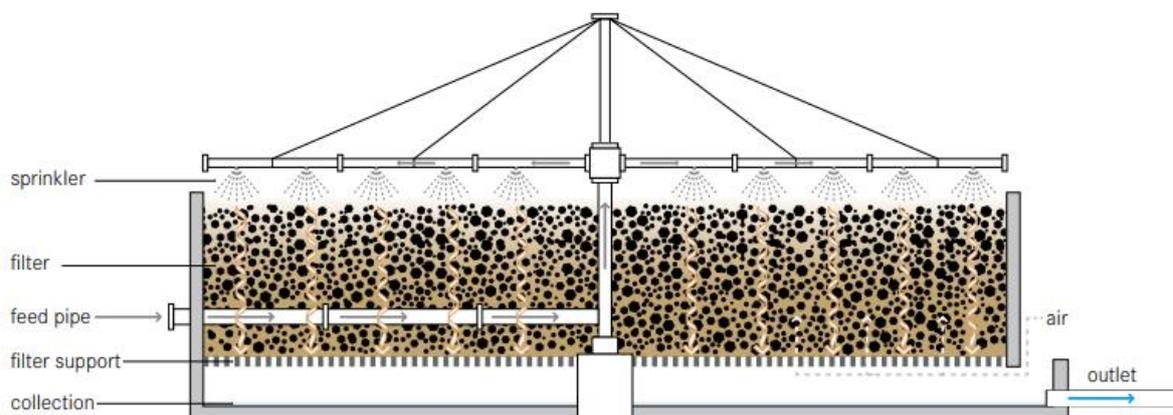


Abbildung 1: Herkömmlicher Tropfkörperfilter (Elizabeth Tille et al., 2014)

Obwohl sich Steinkörperfilter viele Jahre lang bewährt haben, haben sie gewisse Einschränkungen. Unter hohen organischen Belastungen können die Schleimschichten so stark wachsen, dass sie die Hohlräume zwischen den Steinen verstopfen und das System zum Überlaufen bringen. Auch ist das Volumen der Hohlräume in einem Steinkörperfilter begrenzt, was die Luftzirkulation und die Sauerstoffversorgung für die Mikroben einschränkt.

Um diese Einschränkungen zu überwinden, sind andere Materialien für Tropfkörperfilter beliebt geworden. Dazu gehören Module aus gewellten Kunststoffplatten und Kunststoffringen. Diese Materialien bieten grössere Oberflächen für Schleimschichten und erhöhen die Hohlräume für eine bessere Luftzirkulation. Sie sind auch viel leichter als Steine und ermöglichen daher höhere Tropfkörperfilter, ohne strukturelle Probleme zu verursachen.

Die Sauerstoffversorgung erfolgt in der Regel bei Steinkörperfiltern durch natürliche Luftzirkulation. Tiefere synthetische Medienfilter können mit Zwangsluftzufuhr ausgestattet sein (als biologischer belüfteter Filter oder BAF bezeichnet). Sie können mit einer aeroben Zone oben und einer anoxischen Zone unten entworfen sein, um die Denitrifikation zu fördern (Davis, 2002). In der Tabelle 2 sind zwei beispielhafte Tropfkörperfilter mit ihren Kennwerten aufgelistet.

Tabelle 2: Kennwerte von verschiedenen Tropfkörperfilter

	OLR [$g_{CSB}/m^2/d$]	HLR [$L/m^2/d$]	HRT [d]	CSB-ABBAURATE [%]
VERTIKALER TROPFKÖRPER MIT HORIZONTALER STRÖMUNG MIT MEHREREN BODENSCHICHTEN (ZHANG ET AL., 2015)	275.25	660	43.2	90.9
SCHÜTTBETT-TROPFKÖRPERFILTER (FORBIS-STOKES ET AL., 2018)	230	170	7-15	-

1.2.3 Grenzwerte/ wichtige Parameter

Derzeit gibt es in der Schweiz keine Richtlinie für die Wiederverwendung von Grauwasser (Carina Doll et al., 2021). Für diese Arbeit wurden die Grenzwerte für Toilettenspülung von verschiedenen Ländern und die schweizerische Gewässerschutzverordnung genommen, um einen Vergleich zu schaffen. Diese Grenzwerte sind in der Tabelle 3 zu sehen.

Jedoch gibt es auch noch weitere Parameter, welche bei der Grauwasseraufbereitung relevant sind. Die wichtigsten chemischen Parameter umfassen pH-Wert, Alkalinität, elektrische Leitfähigkeit, Natriumadsorptionsverhältnis (SAR), biologischen und chemischen Sauerstoffbedarf (BSB₅, CSB), Nährstoffgehalt vor allem Stickstoff und Phosphor sowie problematische Substanzen wie Schwermetalle, Desinfektionsmittel, Bleichmittel, Tenside oder organische Schadstoffe in Reinigungsmitteln.

pH-Wert und Alkalinität sind zwei Schlüsselparameter, die den Säure-Base-Haushalt des Wassers beeinflussen. Ein optimaler pH-Wert von 6,5–8,4 erleichtert die Behandlung und minimiert negative Auswirkungen auf den Boden und Pflanzen bei der Wiederverwendung. Allerdings kann hohe Alkalinität in Verbindung mit hohem pH-Wert problematisch sein, insbesondere wenn sie durch alkalische Reinigungsmittel verursacht wird.

Die elektrische Leitfähigkeit (EC) ist ein Mass für die Salzkonzentration im Wasser. Während niedrige EC-Werte in Grauwasser normalerweise unbedenklich sind, kann ein hoher EC-Wert bei der Bewässerung zu Ertragsverlusten führen, insbesondere wenn das Wasser für empfindliche Pflanzen verwendet wird. Das Natriumadsorptionsverhältnis (SAR) ist ein weiterer wichtiger Parameter, der das Verhältnis von Natrium zu Calcium und Magnesium im Wasser angibt und Auswirkungen auf die Bodenstruktur hat.

Der biologische und chemische Sauerstoffbedarf (BSB₅, CSB) misst die organische Verschmutzung im Wasser. Hohe BSB₅- und CSB-Konzentrationen können zu Sauerstoffmangel führen, der sich negativ auf das aquatische Leben auswirkt. Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor sind ebenfalls von Bedeutung, da sie das Wachstum von Pflanzen fördern, aber auch zu Umweltproblemen wie Algenwachstum führen können (Morel & Diener Stefan, 2006).

Tabelle 3: Grenzwerte zu Ab- und Grau-Wasser von verschiedenen Richtlinien

PARAMETER	DEUTSCHLAND: MERKBLATT DWA- M277 (NUTZKLASSE C1) (DWA, 2017)	DEUTSCHLAND: MERKBLATT DWA- M277 (NUTZKLASSE C2)(DWA, 2017)	KANADA: GUIDELINES FOR DOMESTIC RECLAIMED WATER FOR USE IN TOILET AND URINAL FLUSHING (MINISTER OF HEALTH CANADA, 2010)	SINGAPUR: TECHNICAL GUIDE FOR GREYWATER RECYCLING FOR TOILET FLUSHING (PUBLIC UTILITIES BOARD, 2014)	SCHWEIZ: GEWÄSSERSCHUTZVER ORDNUNG GSCHV 814.201 (FEDLEX, 1998)
ANWENDUNGSBEREICH DES AUFBEREITETEN GRAUWASSERS	Toilettenspülung privat	Toilettenspülung privat Bewässerung privat, Rasen, Zierpflanzen Bewässerung Nutzpflanzen (Verzehr) Textilwäsche privat	Toilettenspülung privat	Toilettenspülung Generelles waschen Bewässerung → nicht für Nutzpflanzen Verzehr) geeignet	Ökologische Ziele für Gewässer Aufbereitetes Abwasser von- weniger als 10,000 Einwohner
TRÜBUNG	-	<2NTU	<5NTU	<2NTU	-
BSB₅	-	<5 mg/L	≤ 20 mg/L	<5 mg/L	< 20 mg/L
CSB	-	-	-	-	< 60 mg/L
NH₄					< 2 mg/L
NO₂					< 0.3 mg/L
TP	-	-	-	-	0.8 mg/L
TN	-	-	-	-	so viel wie möglich Abbauen
O₂- SÄTTIGUNG	>50 %	>50 %	-	-	-
PH	6.5-9.5	6.5-9.5	-	6-9	-
GUS	-	-	≤ 20 mg/L	-	< 20 mg/L

Es gibt bei den meisten Richtlinien auch Grenzwerte für hygienische Parameter, wie zum Beispiel E.coli oder P.aeruginosa. Diese wurden in der Tabelle 3 Tabelle 3 nicht aufgeführt, da diese Parameter in dieser Arbeit nicht analysiert wurden. Jedoch sind auch diese Parameter sehr wichtig für ein risikofreies Wiederverwenden von Grauwasser, da Grauwasser aufgrund von Kontamination und Krankheitserreger ein Gesundheitsrisiko darstellt (Morel & Diener Stefan, 2006).

1.3 Forschungsfragen

Hat die Anordnung der Module der Grauwasseraufbereitungsanlage einen Einfluss auf die CSB-Abbauraten?

Hat die Durchflussgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Abbauraten?

Hat die Anfangskonzentration oder Beladung einen Einfluss auf die Abbauraten und/ oder die Abbaudauer?

Ändert sich die Abbauraten, wenn der Betrieb diskontinuierlich ist?

Sind die Abbauraten der Parameter von reellem Grauwasser vergleichbar mit künstlichem Grauwasser?

Werden die Grenzwerte erreicht? Und wenn ja, nach welcher Zeit werden Sie erreicht?

2 Material und Methoden

2.1 Anlagen

2.1.1 Aufbau

Die Module der Grauwasserrecyclinganlage bestehen aus einer Primär- und Sekundärstruktur. Die Primärstruktur wird an der Fassade angebracht, während die Sekundärstruktur mit einem Rahmen, einer Hinterschicht für die Wasseraufbereitung, sowie einer anbringbaren Vorderseite mit Pflanzenträger auf der Primärstruktur montiert wird. Die Vorderseite ist als geneigte Waben-Hexagon-Struktur gestaltet, um die Stabilität zu erhöhen und das Substrat für die Pflanzen zu halten. Je nach angewandtem Wandbegrünungssystem können zusätzliche Schichten hinzugefügt werden, um die gewünschte Funktionalität zu erreichen.

Die intensive Wandbegrünung integriert ein Bewässerungssystem für die bepflanzte Wand. Mittels Pumpe wird das Grauwasser aus einem Tank (Greywater treatment Tank in Abbildung 2) in den Grauwasserfilter gepumpt, welcher sich in der Hinterschicht der Wandbegrünung befindet (weiss mit schwarzer Schraffierung). Dadurch, dass der Biofilter und die Pflanzen nur durch ein Gitter und einen Filz getrennt sind, können die Pflanzen das Wasser aufnehmen. Das überschüssige, oder abfließende Wasser von der Wandbegrünung wird zurück zum Wassertank geleitet.

Die Grauwasserbehandlung erfolgt im Batch-Modus. Das Grauwasser des Gebäudes wird in einem Puffertank gesammelt. Das Grauwasser wird dann in den Behandlungstank gepumpt, bis das gewünschte Batch-Volumen erreicht ist. Danach wird kein zusätzliches Grauwasser mehr hinzugefügt. Das im Behandlungstank enthaltene Grauwasser wird kontinuierlich in einem geschlossenen Kreislauf über die Hinterschicht der Wandbegrünung gepumpt, bis die gewünschte Ablaufqualität erreicht ist. Die Behandlungszeit beträgt in dieser Arbeit 24 bis 48 Stunden. Nach der Behandlung des Grauwassers wird es in einen Lagertank gepumpt, um im Gebäude wiederverwendet zu werden, beispielsweise für die Toilettenspülung. Der Puffertank muss möglicherweise das Volumen des Grauwassers enthalten, das innerhalb eines Tages produziert wird, um die potenziell benötigte Behandlungszeit zu erreichen (Nadine Antenen et al., 2022).

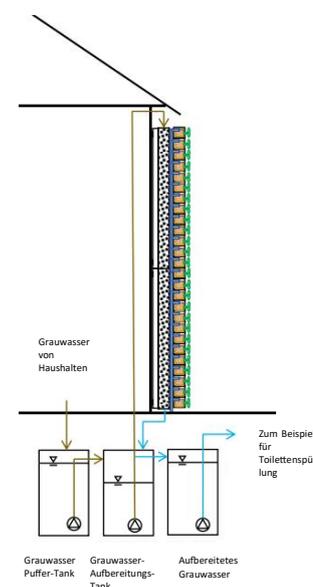


Abbildung 2: Aufbau des Grauwassersystem im Batchbetrieb (Nadine Antenen et al., 2022)

2.1.2 Übersicht

Tabelle 4: Übersicht der Grauwasseraufbereitungsanlagen dieses Projekts

	ANZAHL SYSTEME/MODULE	ART DES GRAUWASSERS	STANDORT	ZIEL DER ANLAGE	
ZHAW DRAUSSEN	8 Systeme mit je 2 Module / 4 Systeme mit je 4 Modulen	Künstliches Grauwasser	Draussen	Diese Anlagen waren die Prototypen, mit welchen schon frühere Experimente gemacht wurden. Die Systeme sind jeweils gegen jede Himmelsrichtung ausgerichtet.	
HORIZONTAL	1 System mit 4 Modulen	Künstliches Grauwasser	Draussen	Anhand dieser Anlagen wurde analysiert, ob die Aufstellung der Module einen Einfluss hat auf die Leistung.	
VERTIKAL	1 System mit 4 Modulen	Künstliches Grauwasser	Draussen		
FELZ 2	1 System mit 4 Modulen	Reales Grauwasser	Draussen	Diese Anlage hatte das Ziel die Performance des Systems mit realen Bedingungen zu testen.	

Es wurde mit den vier verschiedenen Anlagen gearbeitet, welche in der Tabelle 4: Übersicht der Grauwasseraufbereitungsanlagen dieses Projekts zu sehen sind.

Auf dem Areal der ZHAW in Wädenswil befand sich eine Anlage mit 16 Modulen. Es sind jeweils 4 Module pro Seite installiert, wobei jede Seite in eine andere Himmelsrichtung zeigt. Die Anlage steht im Freien und ist somit den Witterungsbedingungen wie Schnee und Regen ausgesetzt. Bei den ersten Versuchen mit einer doppelten Konzentration wurden jeweils 2 Module pro 40-Liter-Tank angeschlossen. Für die Versuche mit Zeitintervallen wurden 4 Module zusammengeschlossen, und es wurden 80 Liter verwendet.

In der ZHAW Wädenswil befinden sich zusätzlich zwei kleinere Anlagen, die sich in einem überdachten und beheizten Raum befinden. Beide Anlagen bestehen aus jeweils 4 Modulen. Der Unterschied liegt in der Anordnung der Module. Bei einer Anlage sind die Module horizontal angeordnet, wie in der Abbildung 4 zu sehen ist. Ein wesentlicher Aspekt dieser Anordnung ist, dass das zu behandelnde Wasser pro Durchgang nur durch ein Modul fließt. Dadurch beträgt die Durchflussgeschwindigkeit durch das Modul einen Viertel der Durchflussgeschwindigkeit des Gesamtsystems. Bei der Aufstellung des Versuches wurde darauf geachtet, dass die Durchflussgeschwindigkeiten jeweils dieselben sind für jedes Modul.

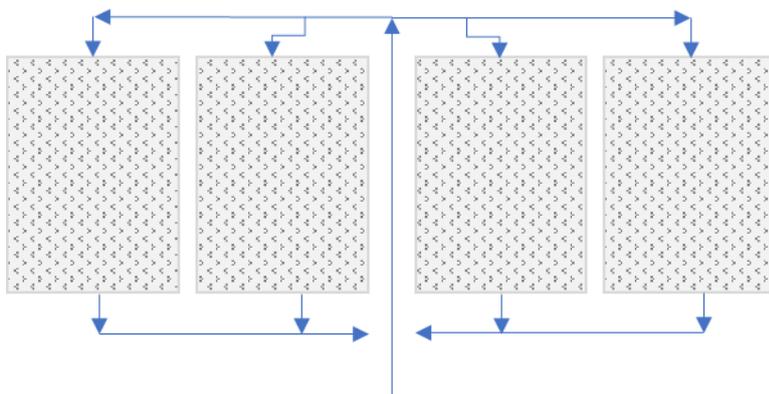


Abbildung 4: Aufstellung der horizontalen Aufstellung

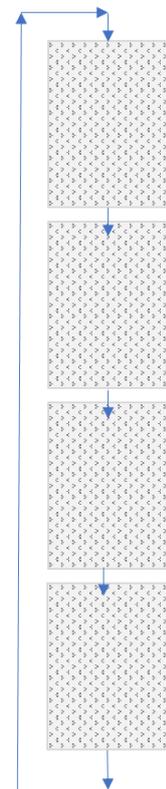


Abbildung 3: Aufstellung der vertikalen Aufstellung

Die vertikale Aufstellung (siehe Abbildung 3) ist etwas einfacher. Die Durchflussgeschwindigkeit des Gesamtsystems und durch jedes Modul ist dieselbe. Das Wasser fließt von einem Modul ins nächste und durchquert damit alle 4 Module pro Zyklus.

Die Grauwasseraufbereitungsanlage für das Felz 2 Gebäude in Zürich ist die einzige Anlage, welche reales Grauwasser bezieht, und zeigt somit auf, ob die Aufbereitungsmethode nicht nur mit künstlichem Grauwasser funktionieren würde. Die Anlage besteht auch aus 4 Modulen und die Batchgrösse ist jeweils 80 Liter.

2.1.3 Substrat und Pflanzen

Als Substrat wurde das Filtermedium: Hel-x (HXF13KLL+ Weiss) verwendet (siehe Abbildung 5). Die Biocarrier sind ein biologisches Filtermedium, welches mit $955 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ eine sehr grosse Besiedlungsoberfläche bietet. Dank seiner grossen geschützten Oberfläche ($806 \text{ m}^2 / \text{m}^3$) bietet es eine

sehr hohe biologische Filterung im Vergleich mit anderen Bioringen (Hel-x biocarrier, 2015).

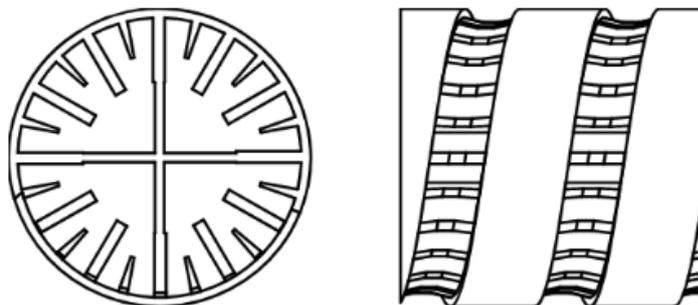


Abbildung 5: Substrat Hel-x (HXF13KLL)(Hel-x biocarrier, 2015)

Die Auswahl der Pflanzen für die Wandbegrünung hat für die Grauwasseraufbereitung keinen Einfluss und wird in dieser Arbeit deshalb nicht berücksichtigt.

2.1.4 Künstliches Grauwasser

Für die Versuche an der ZHAW Wädenswil wurde künstliches Grauwasser mit den in der Tabelle 5 aufgereihten Stoffen verwendet. Es wurde zuerst ein konzentriertes Gemisch hergestellt. Dafür wurden die Inhaltsstoffe eingewogen, mit destilliertem Wasser aufgefüllt und für etwa 10 Minuten mit einem Magnetrührer gemischt. Vor dem Zugeben der konzentrierten Lösung zum Tank wurde das Konzentrat nochmals mit einem Rührstab umgerührt, damit sich, die sich abgesetzten Feststoffe, bestmöglich verteilen und die Anfangskonzentration möglichst gleichbleibend ist.

Tabelle 5: Konzentration von Inhaltsstoffen in dem künstlichen Grauwasser

INHALTSSTOFFE	mg/L
Schwarzkopf Schauma Fresh It Up!	7.5
Dentalux Complex 7 Total Care Plus	5
Nivea Fresh Pure Deodorant	5
Cien Almond handwash	7.5
Ariel Color Liquid laundry detergent	75
Confort Concentrate Pure Sensitive	50
Pril 5+ Kraft Gel Ultra Plus	75
M-Classic Apfelessig	75
M-Budget Pflanzenöl	75
Patissier Maisstärke	75
Cellulose microcrystalline. CAS-No: 9004-34-6	50
Sigma-Aldrich, Urea. CAS-No.: 57-13-6	5
Nature First Apotheke & Drogerie, Milchsaeure	20
Carl ROTH, Kaliumdihydrogenphosphat ≥98%. CAS-No: 7778-77-0	1
ddH2O	500

2.2 Probenahme

Die initiale Probenahme in jedem Experiment erfolgte entweder unmittelbar nach Zugabe des künstlichen Grauwassers und dem Mischen oder im Fall der Grauwasseraufbereitungsanlage auf dem Felz 2 Areal, nach dem Einleiten von unbehandeltem Grauwasser. Zusätzliche Proben wurden nach 6, 24 und gegebenenfalls 48 Stunden entnommen. Die Proben wurden in vorgespülte 50 mL Falcon-Tubes gefüllt und umgehend bei -20°C eingefroren. Bei den Proben von Felz 2 war das Einfrieren der Proben nicht möglich. Die Proben wurden in 250 mL Flaschen abgefüllt, bei 4°C gelagert und jeweils innerhalb von höchstens 5 Tagen gemessen.

2.3 Änderungen verschiedener Betriebsparameter

2.3.1 Anordnung der Module

Im Kapitel 2.1.2 wurden die verschiedenen Anlagen aufgeführt. Es gab 2 Anlagen, welche sehr ähnlich waren. Beide haben 4 Module, sind an geheizten Orten und haben somit weniger Einflüsse von aussen. Was die beiden Anlagen differenziert, ist die Anordnung der Module. Während bei der einen Anlage die Module horizontal aufeinander folgen, sind die Module bei der zweiten Anlage übereinander.

Bei beiden Anlagen wurden jeweils dieselben Tests durchgeführt, um zu sehen, ob ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Aufstellungen zu sehen ist. Dabei wurden Versuche mit den Durchflussraten 2 L/min und 8 L/min, mit der jeweils selben Konzentration getestet.

2.3.2 Durchflussgeschwindigkeit

Bei den horizontalen und vertikalen Anlagen wurden verschiedene Durchflussgeschwindigkeiten analysiert. Es wurden die Durchflussraten 2 L/min, 8 L/min und 16 L/min getestet und miteinander verglichen.

2.3.3 Einfluss der Anfangskonzentration auf den CSB-Abbau

Für diesen Versuch wurde die, in vier Himmelsrichtungen ausgerichtete Grauwasseraufbereitungsanlage verwendet. Dabei wurden jeweils drei Versuche gestartet mit einfacher und mit doppelter Konzentration. Die Daten mit einfacher Konzentration wurden nicht im Rahmen dieser Arbeit generiert, sondern von der Projektgruppe des Gesamtprojekts übernommen.

Für einen weiteren Vergleich wurden auch Daten aus anderen Experimenten herangezogen und unabhängig von der Anlage und dem Versuch verglichen. Mit denselben zwei Datensätzen wurden weitere Fragestellungen behandelt: Hat die Anfangskonzentration einen Einfluss auf die Abbaudauer? Das bedeutet, wird in den ersten 6 Stunden prozentual mehr oder weniger CSB abgebaut im Vergleich zum gesamten Abbau? Und wird in den letzten 24 Stunden prozentual gleich viel abgebaut?

2.3.4 Einfluss der Temperatur auf die Abbauraten

Um zu sehen, ob die Temperatur einen Einfluss hat auf die Abbauraten, wurden alle Daten genommen und die Korrelation zu der CSB-Abbauraten evaluiert.

2.3.5 Diskontinuierlicher Betrieb

Für diesen Versuch wurden Zeitschaltuhren verwendet, um einen diskontinuierlichen Betrieb zu testen. Alle anderen Versuche liefen im kontinuierlichen Betrieb. An der Nordwand lief die Pumpe jeweils 1,5 Stunden und war 0,5 Stunden ausgeschaltet, was bedeutet, dass die Pumpe 75% der Zeit aktiv war. An der Westwand wurde nichts verändert, und die Pumpe lief kontinuierlich. An der Südwand betrug die Laufzeit der Pumpe nur 25%, das heisst, sie war 0,5 Stunden aktiv und 1,5 Stunden ausgeschaltet. An der Ostwand wurde die Pumpe jeweils 1 Stunde eingeschaltet und 1 Stunde ausgeschaltet, was einer Laufzeit von 50% entspricht.

2.4 Analysen

Der pH-Wert, die Leitfähigkeit und der Sauerstoffgehalt wurden direkt bei der Probenahme mithilfe von Sonden erfasst, welche in der Tabelle 6 aufgelistet sind. Die Trübung wurde vor Ort gemessen. Aus organisatorischen Gründen konnte dies bei den Proben des Felz 2 Gebäudes nicht durchgeführt werden. In diesem Fall wurden diese Parameter im Labor innerhalb von maximal 5 Tagen gemessen. Die Temperatur wurde ebenfalls mit den Sonden erfasst, und der Durchschnitt der Ergebnisse aller drei Sonden wurde verwendet. Im Felz 2 wurde die Temperatur stündlich über die gesamte Dauer aufgezeichnet, und Durchschnittswerte für die jeweiligen Tage wurden für die Datenanalyse verwendet.

Die übrigen Analysen wurden mithilfe von Hach-Lange-Tests durchgeführt. Dabei wurden die entsprechenden Anleitungen des Herstellers (siehe Tabelle 6) befolgt. Bei den Ammoniummessungen wurden die Proben aus Felz 2 vor der Messung verdünnt, wobei die Verdünnung jeweils mit destilliertem Wasser erfolgte. Die Analyse des SAK 254 wurde im Labor mittels eines Fotometers mit der Wellenlänge 254 gemessen. Dafür wurde die Küvette jeweils 3-mal mit der Probe vorgespült und danach gemessen.

Tabelle 6: Analysen-Geräte/-Tests

PARAMETER	PRODUKTNUMMER	MESSBEREICH
PH, GELÖSTER SAUERSTOFF, LEITFÄHIGKEIT, TEMPERATUR TRÜBUNG	Hach HQ40D Multimeter	-
	Hach 2100Q Portable Turbidimeter	-
CSB	Hach-Lange LCK314, LCK114,	15-150mg/L, 150-1000 mg/L
TP	Hach-Lange LCK350	2,0-20,0 mg/L
TN	Hach-Lange LCK138	1-16 mg/L
AMMONIUM	Hach-Lange LCK304	0.015-2.0 mg/L
NITRAT	Hach-Lange LCK339	0.23-13.5 mg/L
NITRIT	Hach-Lange LCK341	0.015-0.6 mg/L

2.5 Datenanalyse

Die Datenanalyse wurde mittels der Software Excel (Version 2312) durchgeführt. Für die Analyse wurden verschiedene Formeln verwendet wobei die wichtigsten in der Tabelle 7 aufgelistet wurden.

Tabelle 7: Die wichtigsten Formeln der Datenanalyse

	FORMEL	AUSSAGE
ABBAURATE [%]	$\frac{C_0 - C_t}{C_0} * 100 = \frac{\text{Anfangskonzentration} - \text{Konzentration bei Zeit } t}{\text{Anfangskonzentration}} * 100$	Welcher Prozentsatz des Analyten in der Zeit t abgebaut wurde
R	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	Zeigt den linearen Zusammenhang zweier Variablen auf Geringe/schwache Korrelation $ r = 0.10$ mittlere / moderate Korrelation $ r = 0.30$ grosse / starke Korrelation $ r = 0.50$ (Hemmerich, 2015)
R²	$r^2 = \frac{SQE}{SQT} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$	Zeigt auf, wie gut die abhängige Variable mit der unabhängigen Variable vorhergesagt werden kann
OLR	$\text{OLR [gCSB/(L*d)]} = \frac{\text{CSB-Konzentration} \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right] * \text{Menge Grauwasser [L]}}{\frac{1000\text{mg}}{\text{g}} * \text{Volumen des Filters [L]} * \text{Anzahl Module} * 2\text{d}}$	Die organische Belastungsrate (OLR) wird definiert als die Menge an organischen Substanzen, die pro Volumeneinheit des Filters pro Tag zugeführt wird (Gautam et al., 2022).
HLR	$\frac{\text{Durchflussgeschwindigkeit} \left[\frac{\text{L}}{\text{min}}\right] * 60 \left[\frac{\text{min}}{\text{h}}\right] * 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{d}}\right]}{\text{Fläche des Filters [m}^2\text{]} * \text{Anzahl Module}}$	Die hydraulische Belastungsrate bedeutet die Menge an Abwasser, die dem Filter zugeführt wird (John Wiesman, 2007).
HRT	$\frac{\text{Fläche des Filters [m}^2\text{]} * \text{Anzahl Module} * \text{Anzahl Zirkulationen} \left[\frac{1}{\text{d}}\right] * 2 [\text{d}]}{\text{Durchflussgeschwindigkeit} \left[\frac{\text{L}}{\text{min}}\right]}$	Verweildauer des Grauwassers im Filter

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Rohdaten, welche in diesem Kapitel dargestellt wurden, sind im Anhang zu finden.

3.1 Anordnung der Module

Die Abbildung 6 verdeutlicht, dass die horizontale Anordnung tendenziell höhere Abbauraten innerhalb von 24 Stunden aufweist. Diese Abbildung unterstreicht zudem, wie im Kapitel 2.3.2 erwähnt, dass eine geringere Durchflussrate zu einer höheren Abbauraten führt. Im Kapitel 2.1.2 wurde erläutert, dass bei der horizontalen Anordnung die Durchflussgeschwindigkeit pro Modul lediglich ein Viertel der Durchflussgeschwindigkeit des gesamten Systems beträgt. Diese Reduzierung könnte sich positiv auf die Abbauraten in der horizontalen Anordnung auswirken. Daher liegt es nahe, den Versuch mit horizontaler Anordnung und einer Durchflussrate von 8 Litern pro Minute mit dem Versuch mit vertikaler Anordnung und einer Durchflussrate von 2 Litern pro Minute zu vergleichen, da die Durchflussgeschwindigkeit pro Modul in beiden Fällen gleich ist. Auch in diesem Vergleich zeigt sich, dass die horizontale Anordnung etwas bessere Resultate liefert, ohne dass hierfür eine eindeutige Erklärung vorliegt. Da die Ergebnisse jedoch ähnlich sind, könnte es sein, dass die Anzahl der Module, in diesem Fall 4, keine entscheidende Rolle spielt. Eine definitive Bestätigung, ob dies auch bei einer höheren Modulanzahl der Fall ist, bleibt jedoch aus.

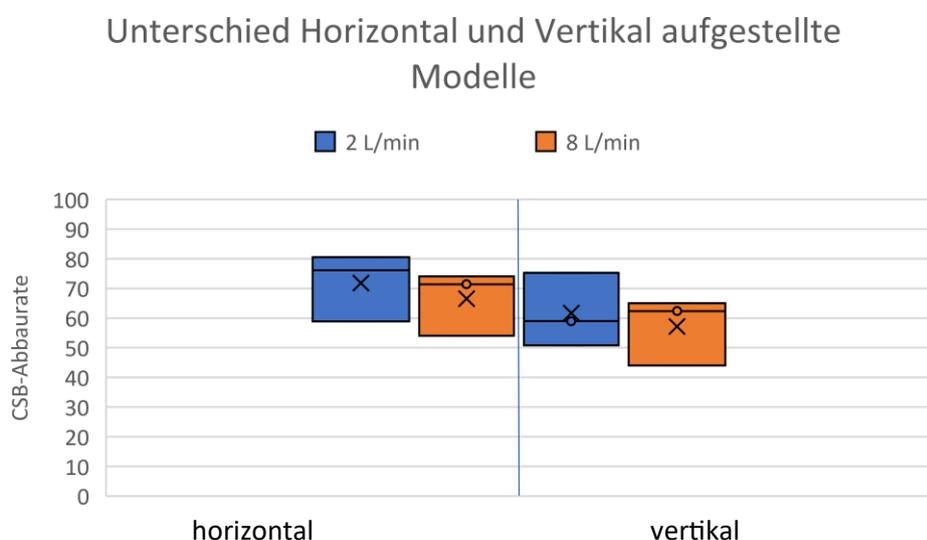


Abbildung 6: Unterschied zwischen horizontaler und vertikaler Aufreihung der Module bei 2 L/min und 8 L/min

3.2 Durchflussgeschwindigkeit

Wie in der Abbildung 7 zu sehen ist, variiert die Abbauraten auch unter denselben Durchflussraten stark. Die Datenmenge mit einer Durchflussrate von 16 L/min ist kleiner also $n = 2$, während die Anzahl Proben bei 2 L/min $n = 6$ und bei 8 L/min $n = 9$ sind und sagt deshalb weniger aus. Der Median der

Abbauraten mit einer Durchflussrate von 2 L/min ist höher und deutet somit, wie schon im Kapitel 3.1 erwähnt, auf einen besseren Abbau von CSB, innerhalb von 24 Stunden, bei tieferer Durchflussrate hin.

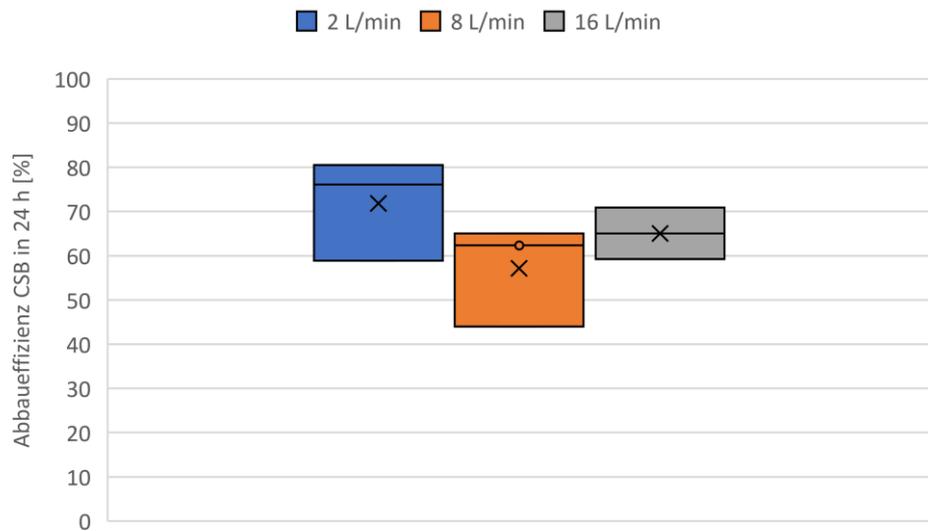


Abbildung 7: Einfluss der Durchflussrate auf die Abbauraten

3.3 Einfluss der Anfangskonzentration auf den CSB- Abbau

Die Daten, welche in der Abbildung 8 zu sehen sind, sind zum einen mit der doppelten Konzentration des künstlichen Grauwassers (siehe 2.1.4) in der Anlage ZHAW draussen und andererseits Daten von dem Excel: experimental_plan_labtrials, welches von der Projektgruppe zur Verfügung gestellt wurde. Diese Daten stammen von einem Versuch mit derselben Anlage, jedoch einige Monate zuvor und nicht von derselben Person ausgeführt. Wie in der Abbildung 8 zu sehen ist, hat die Anfangskonzentration keinerlei Einfluss auf die CSB-Abbauraten mit einem Korrelationskoeffizienten von $r=0.01$. Diese Erkenntnis stimmt mit den Analysen von (Kishimoto et al., 2014) überein.

In der Abbildung 9 ist jedoch derselbe Vergleich gemacht worden. Es wurden alle Daten mit künstlichem Grauwasser über eine Abbaudauer von 48 Stunden hinweg genommen. Bei diesem Vergleich wurde mit $r=0.43$ eine mittlere Korrelation und zudem eine deutlich grössere Steigung festgestellt

Eine mögliche Begründung könnte sein, dass die Versuche mit den kleineren Konzentrationen, von der Abbildung 8, durchschnittlich bei 20°C Wassertemperatur liefen, während die Versuche mit der doppelten Konzentration bei durchschnittlich 12°C Wassertemperatur liefen. Dadurch könnten die Abbauraten tendenziell höher gewesen sein. Dies ist aber nur eine Vermutung und müsste mit weiteren Tests bestätigt werden.

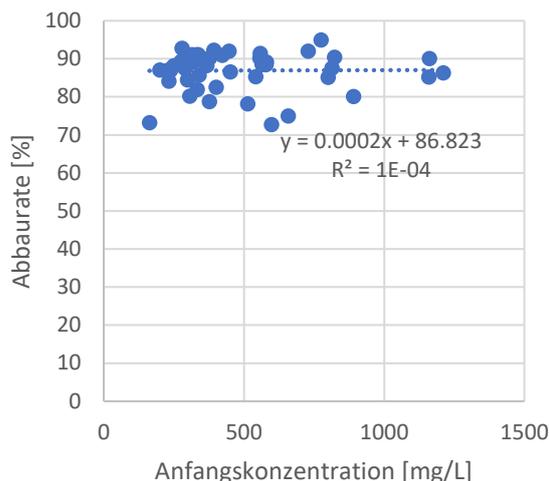


Abbildung 8: Einfluss der Anfangskonzentration auf die Abbaurrate Vergleich von der Normalkonzentration und der doppelten Konzentration in einem Versuch.

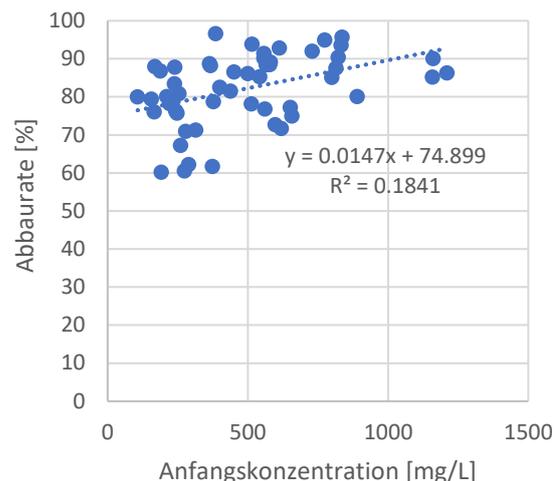


Abbildung 9: Einfluss der Anfangskonzentration auf die Abbaurrate mit allen in dieser Arbeit generierten Daten

Um zu eruieren, ob die Anfangskonzentration einen Einfluss auf die Abbaudauer hat, wurde die Differenz der Abbauraten zwischen 24 und 48 Stunden mit der Anfangskonzentration verglichen. Auch in der Abbildung 10 wurden die Daten des Excels: experimental_plan_labtrials verwendet. Ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,15$ deutet auf einen geringen Zusammenhang, zwischen der Anfangskonzentration und der Differenz in der Abbaurrate zwischen 24 und 48 Stunden, hin. Die grosse Streuung ist in der Abbildung 11 zu sehen. Dies legt nahe, dass selbst bei höheren CSB-Konzentrationen die Leistung nach 24 Stunden nachlässt. Nichtsdestotrotz brauchen höher konzentrierte, zu reinigende Gewässer, tendenziell mehr Zeit. Bei dem Vergleich mit allen Daten gab es bei derselben Fragestellung eine schwache, negative Korrelation von $r = -0.2$. Die zwei Auswertungen ergeben kontroverse Resultate und eine Erklärung konnte auch nach Recherche nicht gefunden werden.

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen, den CSB-Abbau, welcher in den ersten 6 Stunden erfolgt. Bei beiden Datenmengen, kann erkannt werden, dass prozentual mehr in den ersten 6 Stunden abgebaut wurde, wenn die Anfangskonzentration höher war.

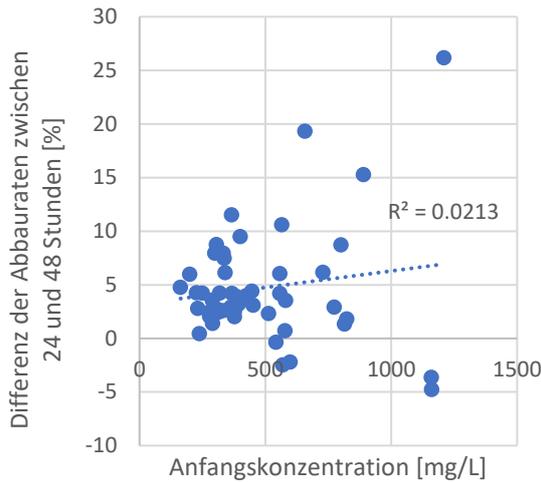


Abbildung 10: Einfluss der Anfangskonzentration auf die Abbaudauer Vergleich von der Normalkonzentration und der doppelten Konzentration in einem Versuch.

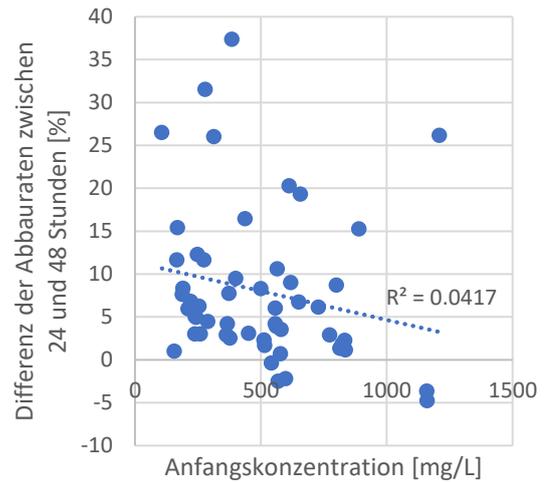


Abbildung 11: Einfluss der Anfangskonzentration auf die Abbaudauer mit allen in dieser Arbeit generierten Daten

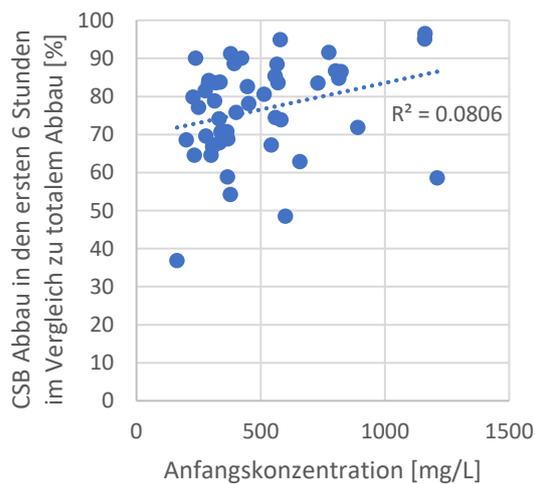


Abbildung 12: CSB Abbau in den ersten 6 Stunden im Vergleich zu der gesamten Zeit von der Normalkonzentration und der doppelten Konzentration in einem Versuch.

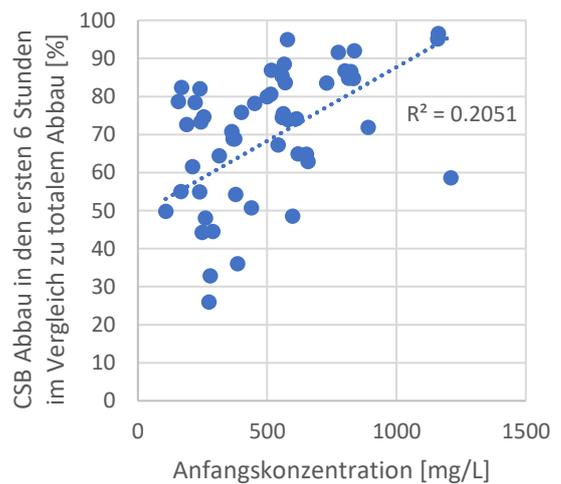


Abbildung 13: CSB Abbau in den ersten 6 Stunden im Vergleich mit allen dieser Arbeit generierten Daten

3.4 Einfluss der Temperatur auf die Abbauraten

Aus den gesammelten Daten kann ein geringer Zusammenhang der Abbauraten von CSB und der Wassertemperatur festgestellt werden ($r=0.14$). Durch die Heizstäbe in den Wassertanks waren die Temperaturschwankungen nur zwischen 9°C und 18°C (siehe Abbildung 14). In der Studie von (Kishimoto et al., 2014) wurde kein Einfluss der Temperatur auf den CSB-Abbau von Restaurantabwasser festgestellt. Die Publikation von (G.J. Schroepfer et al., 1952) besagt jedoch, dass bei Tropfkörperfilter die Effizienz bei 10°F etwa 6 oder 7 % ansteigen kann, bei Standard-Filtern. Dies wäre ein deutlich grösserer Anstieg der Effizienz, verglichen mit dem Anstieg, welcher in der Abbildung 14 zu sehen ist.

Einfluss von Temperatur auf die Abbaurrate

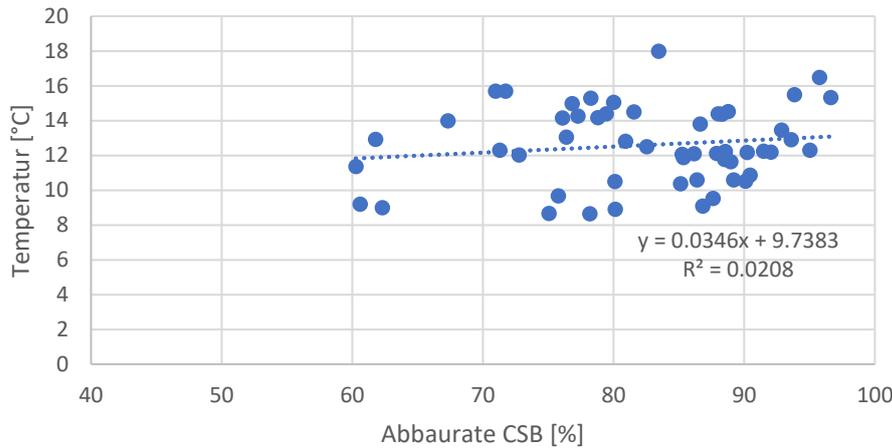


Abbildung 14: Einfluss der Wassertemperatur auf die CSB-Abbaurrate

3.5 Diskontinuierlicher Betrieb

Es ist deutlich erkennbar in der Abbildung 15, dass die Wandbegrünung mit Westausrichtung (100% aktiv), die beste Leistung erzielte und auch, wie in Abbildung 16 zu sehen ist, am wenigsten Leistungsabnahme hat. Bei den anderen drei Wänden führt eine niedrigere Laufzeit zu einer geringeren CSB-Abbaurrate, jedoch zeigt sich kein klares Muster, welches den Einfluss der Laufzeit auf die Abnahme der CSB-Abbaurrate aufzeigte. In Abbildung 16 ist zu sehen, dass die Abbauleistung am zweitwenigsten abgenommen hat, wenn die Pumpe 75% der Zeit aktiv war. Interessanterweise war die Leistungsabnahme an der Südwand geringer als an der Ostwand, obwohl das System mit Südausrichtung weniger lief. Die blauen Balken dienen als Referenz für den kontinuierlichen Betrieb der Pumpen.

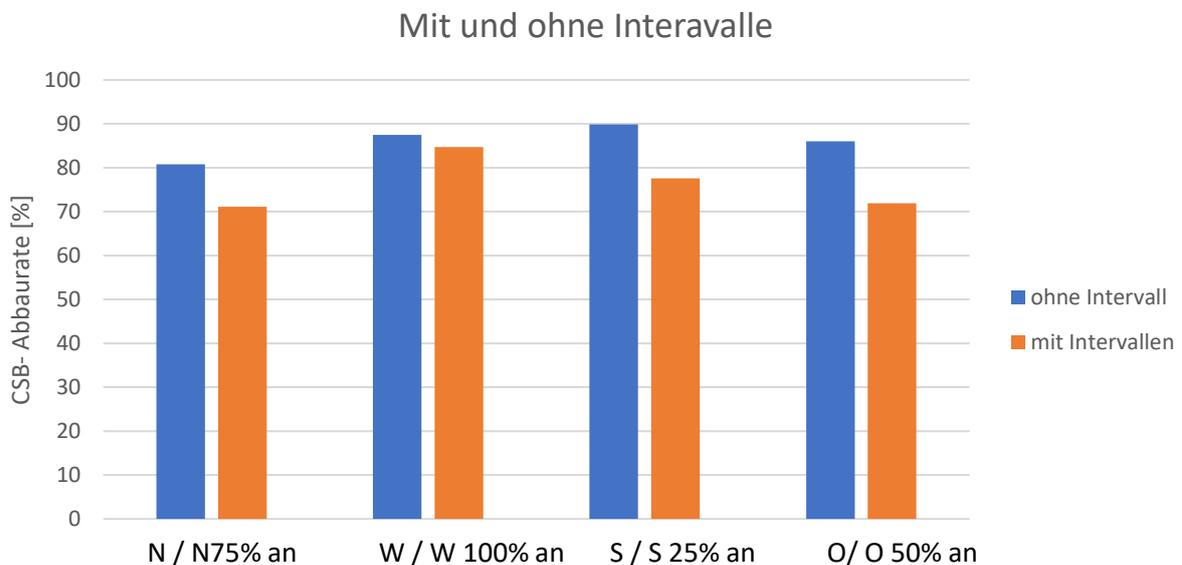


Abbildung 15: CSB-Abbaurrate mit und ohne Intervalle

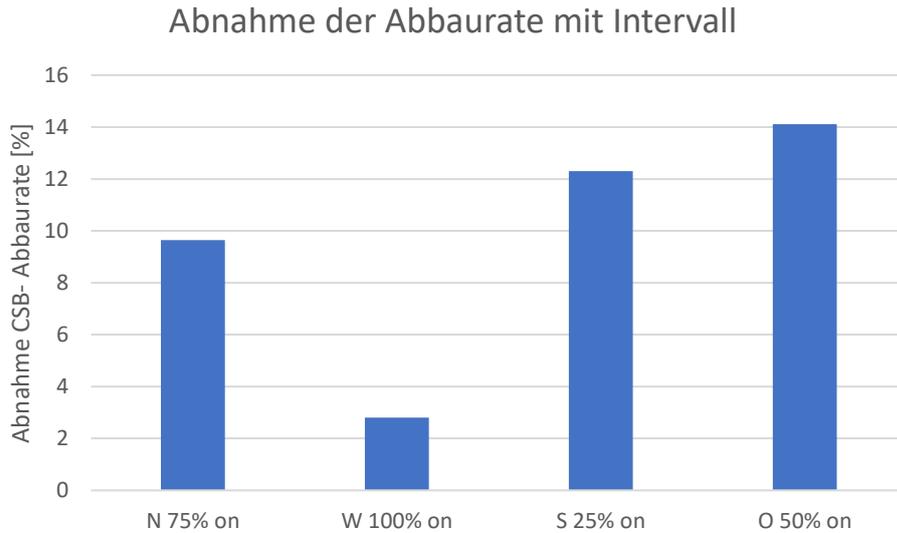


Abbildung 16: Abnahme der Abbaurrate mit Intervall

3.6 Felz 2 Ergebnisse

In der Abbildung 17 ist der TN-Abbau, in der Abbildung 18 ist der Total-Phosphor-Abbau und in der Abbildung 19 der CSB-Abbau zu sehen. Die blauen Grafen sind Daten aus dem Felz 2 Gebäude mit realem Grauwasser. Die grünen Graphen entstanden mit künstlichem Grauwasser, welches nach dem Rezept im Kapitel 2.1.4 hergestellt wurde. Auffallend ist, dass die Anfangskonzentration der Analyten bei realem Grauwasser bei Total-Stickstoff etwas mehr als 8-mal, bei Total-Phosphor fast 7-mal und bei CSB fast 4-mal höher ist, als bei dem künstlichen Grauwasser. Die Tendenz ist aber ähnlich. In den ersten sechs bis 24 Stunden wird der Total-Stickstoff abgebaut und steigt danach wieder etwas an. Bei dem Total-Phosphor wird in den ersten 24 Stunden am meisten abgebaut, wobei bei den Analysen mit reellem Grauwasser der Abbauprozess etwas länger dauert. Der CSB-Abbau ist auch ähnlich. Bei dem realen Grauwasser werden in den ersten 6 Stunden 88% des gesamten Abbaus getätigt, während der Abbau in der ZHAW in den ersten 6 Stunden etwa 78% des gesamten Abbaus ausmacht.

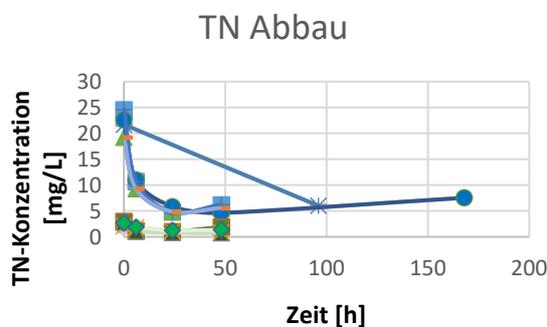


Abbildung 17: TN-Abbau von Proben von Felz 2 (Blautöne) und Versuchen mit künstlichem Grauwasser (Grüntöne)

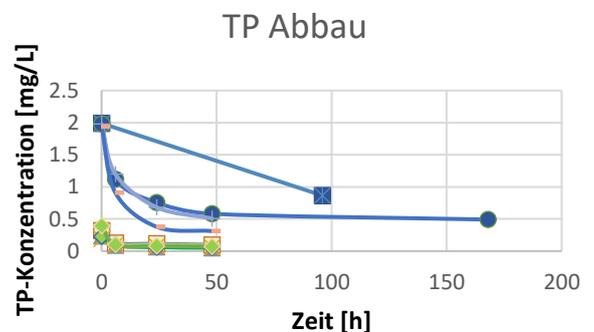


Abbildung 18: TP-Abbau von Proben von Felz 2 (Blautöne) und Versuchen mit künstlichem Grauwasser (Grüntöne)

CSB- Abbau

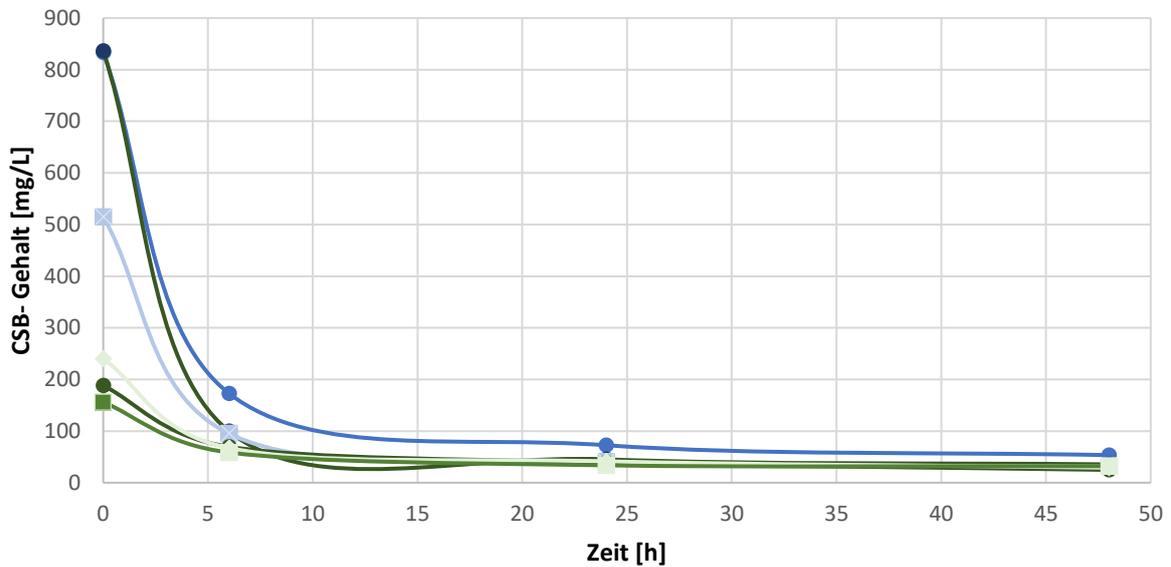


Abbildung 19: CSB-Abbau von Proben von Felz 2 (Blautöne) und Versuchen mit künstlichem Grauwasser (Grüntöne)

In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist der Ammoniumabbau bei reellem und künstlichem Grauwasser beschrieben. In beiden Versuchen kann ein klarer Abbau von Ammonium festgestellt werden. Die Ammonium Konzentration im künstlichen Grauwasser ist jedoch um etwa 170-mal kleiner. Die Konzentrationen bei den Proben, nach 24 und 48 Stunden, mit künstlichem Grauwasser, lagen unter der Bestimmungsgrenze der Hach-Lange Tests, was bedeutet, dass die Resultate sehr ungenau sein können. Bei den drei Versuchen mit reellem Grauwasser konnte nach dem Abbau von Ammonium wieder ein kleiner Anstieg der Ammoniumkonzentration, beim jeweils letzten Datenpunkt von 48 Stunden, festgestellt werden.

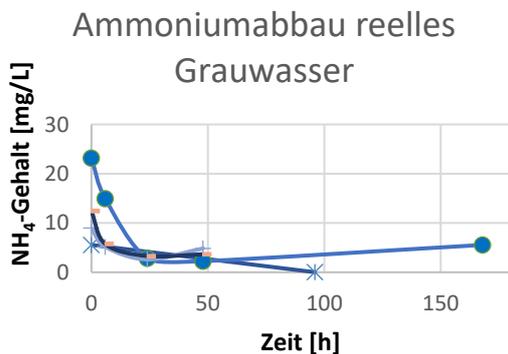


Abbildung 20: Ammoniumabbau mit reellem Grauwasser in der Felz 2 Anlage

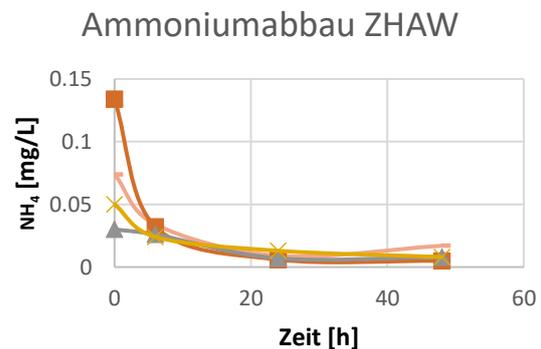


Abbildung 21: Ammoniumabbau mit künstlichem Grauwasser

Bei den drei Versuchen, welche in der Abbildung 22 zu sehen sind, gibt es keinen eindeutigen Zusammenhang bei den Nitratkonzentrationsveränderungen. Tendenziell nimmt die Nitratkonzentration jedoch zu. Die Nitratkonzentrationen sind eher gering. Die Werte, welche im roten

Bereich sind, wurden unter der Bestimmungsgrenze gemessen, was eine Ungenauigkeit hervorruft. Die Nitratkonzentrationen der Analyse mit künstlichem Grauwasser waren so tief, dass sie unter dem Detektionslimit waren und somit nicht ausgewertet werden konnten.

Durch die Abbildung 20 und Abbildung 22 kann die Nitrifikation beobachtet werden. Der Ammoniumgehalt verringert sich, währenddessen steigt der Nitratgehalt.

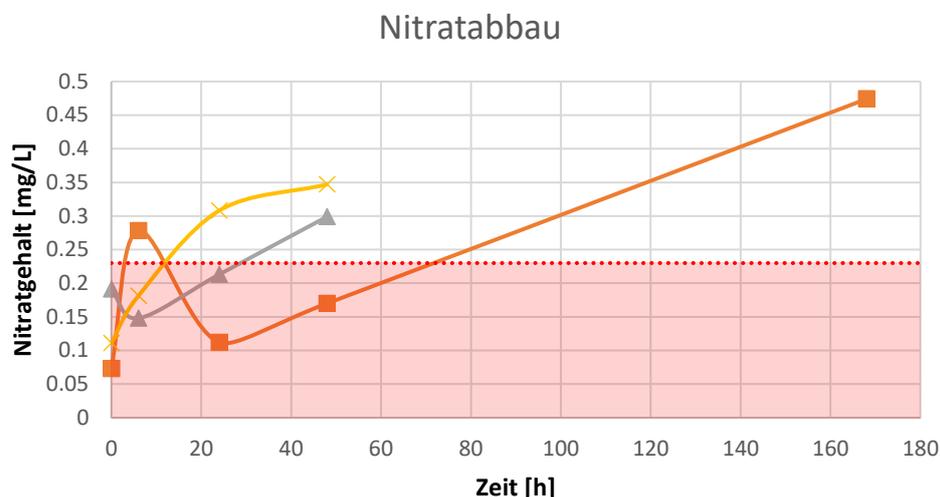


Abbildung 22: Nitratabbau mit realem Grauwasser der Felz 2 Anlage. Rot ist die untere Bestimmungsgrenze der Hoch-Lange Tests

3.7 Felz 2 ORL, HLR und HRT

Das Vergleichen der Kennwerte ORL, HLR und HRT von den Daten von Felz 2 (Tabelle 8) und der Literatur kann nicht eins zu eins übernommen werden. Die Kennwerte, welche in der Tabelle 1 und Tabelle 2 zu sehen sind, sind jeweils Anlagen, bei welchen das Grauwasser, respektive das Abwasser einmal durchläuft. Das in dieser Arbeit analysierten Modell ist jedoch ein Batchverfahren und dasselbe Wasser zirkuliert 2 Tage lang durch den Filter.

Die hydraulische Verweilzeit (HRT) ist, bei den Tropfkörperfilteranlagen in der Tabelle 2, deutlich höher mit 43 und 7-15 Tagen. In der Anlage bei Felz 2 war die Verweilzeit dagegen nur 0.7 Tage. Auch die organische Beladung (OLR) ist mehr als 400-mal höher in den Literaturwerten. Dasselbe bei der HLR, diese ist auch viel höher als die hydraulische Beladungsrate der Literaturwerte. Dies liegt daran, dass diese Anlage im Batchverfahren läuft und dasselbe Wasser kontinuierlich durchläuft, wie dies im Kapitel 2.1.1 beschrieben wurde. Daher können diese Werte nicht gut miteinander verglichen werden.

Dass die organische Beladung so viel kleiner ist, kann damit erklärt werden, dass die in Tabelle 2 aufgelisteten Anlagen, Abwasser klären, welches deutlich mehr verschmutzt ist. Die OLR der Tabelle 1 sind auch Grauwasseraufbereitungsanlagen, welche besser zu Vergleichen sind mit den OLR, der analysierten Anlagen, aber auch diese OLR sind 40- bis 300-mal höher.

Tabelle 8: Kenngrößen von Daten von Felz2

OLR [$g_{CSB}/m^2/d$]	HLR [$m^3/m^2/d$]	HRT [d]
0.55	103	0.71

3.8 Felz 2 Ergebnisse mit Grenzwerten

In Tabelle 9 sind die Werte des behandelten Grauwassers des Felz 2 Gebäudes nach 48 Stunden Aufbereitungszeit aufgeführt. Die Abbauraten wurden aus der Publikation von (Dalahmeh et al., 2011) als Vergleich zugezogen. Diese Daten zeigen die Abbauraten von Grauwasseraufbereitung mit verschiedenen Filtermaterialien.

Ein Vergleich der Abbauraten mit der Veröffentlichung von (Dalahmeh et al., 2011) zeigt, dass der CSB-Abbau im Felz 2 Areal vergleichsweise hoch ist. Dies steht im Kontrast zu den Ergebnissen für den Gesamtposphorabbau, der in der Felz 2 Anlage schlechter ausfällt als in der genannten Literatur. Die genannte Publikation untersuchte verschiedene Filtermaterialien für die Grauwasseraufbereitung. Unser System zeigt gute Ergebnisse im Vergleich zu einem vertikalen Pflanzenfilter, der ebenfalls für die Grauwasseraufbereitung verwendet wird. Die Abbauraten für CSB, TN und TP liegen bei 70-90%, 20-40% bzw. 10-35%, während die Ammoniumabbaurate bei 80-90% liegt. Obwohl die Ammoniumabbaurate etwas niedriger ist, schneidet das Felz 2 System im Gesamtbild gut ab. Es ist anzumerken, dass die horizontalen Pflanzenfilteranlagen niedrigere Abbauraten aufweisen (Katharina Cross & Katharina Tondera, 2021).

Tabelle 9: Daten von reellem Grauwasser von Felz 2 Messungen nach 48 Stunden Aufbereitung. Abbauraten für den Vergleich von (Dalahmeh et al., 2011)

	MAX.	MIN.	DURCHSCHNITT	Grenzwert TOILETTENSPÜLUNG	DURCHSCHNITTLICHE ABBAURATE [%]	Abbauraten von Literatur
CSB [MG/L]	53.4	31.7	40.2	< 60	94	37-98
AMMONIUM [MG/L]	4.85	2.26	3.31	< 2 mg/L	71	
NITRAT [MG/L]	0.308	0.17	0.272	-	-134	
TN [MG/L]	4.63	4.84	5.48	so viel wie möglich Abbauen	75	35 - 91
TP [MG/L]	0.581	0.312	0.467	0.8 mg/L	76	79-90
TRÜBUNG [FNU]	8.86	1.98	5.16	<2NTU / <5NTU	99	
PH []	8.22	7.57	8.3	6.5-9.5	21	
LEITFÄHIGKEIT [US/CM]	624	635	628	-	0.58	
SAK	0.1439	0.085	0.109	-	88	

- Schweiz: Gewässerschutzverordnung GschV 814.201 (Fedlex, 1998)
- Deutschland: Merkblatt DWA-M277 (Nutzklasse C2)(DWA, 2017)
- Kanada: Guidelines for Domestic Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing (Minister of health Canada, 2010)

In den folgenden Abbildungen sind die Grenzwerte, welche in der Tabelle 9 aufgeführt wurden, bildlich dargestellt. Die Farben der Grenzwertlinien sind dieselben wie in Tabelle 9 und zeigen so auf, von welcher Richtlinie der jeweilige Grenzwert kommt.

Von den drei Versuchen mit reellem Grauwasser waren bei 2 Versuchen die CSB-Konzentration schon nach 24 Stunden und bei einem Versuch erst nach 48 Stunden unter dem Grenzwert der Schweizer Gewässerschutzverordnung (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). In Abbildung 25 und Abbildung 26 ist die Trübung der Felz 2 Messungen mit reellem Grauwasser zu sehen. Aus der Abbildung 26 kann entnommen werden, dass die deutsche Richtlinie DBA, nur bei einem Versuch nach 48 Stunden sehr knapp eingehalten werden konnte. Die kanadischen Richtlinien hingegen konnten in 2 von 3 Versuchen nach spätestens 48 Stunden eingehalten werden und beim dritten Versuch konnte auch dieser Grenzwert nach 160 Stunden knapp eingehalten werden. Die hohen Trübungswerte könnten partiell von der Probenahme stammen. In dem Tank, in welchem die Proben entnommen wurden, gibt es Partikel, welche von den Pflanzen, oder von der Pflanzenerde bei der Installation herkommen. Diese Partikel setzen sich vor allem am Boden ab, jedoch könnte dies auch einen Ursprung höherer Trübung sein. Um sicher zu stellen, dass der Trübungs-Grenzwert eingehalten wird, kann noch eine weitere Stufe eingebaut werden, zum Beispiel eine Sandfiltration. Diese senkt die Trübung und die gesamten ungelösten Stoffe (Kalaichelvan a/l Arugam et al., 2017).

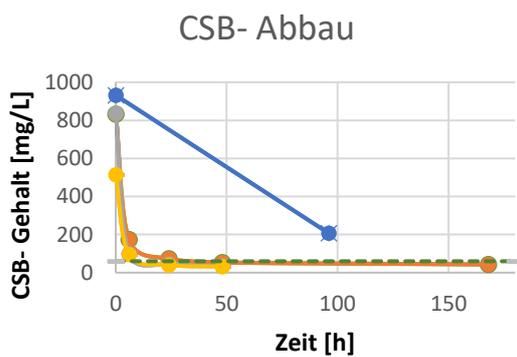


Abbildung 23: CSB-Abbau von Daten von Felz 2 mit Grenzwert(Fedlex, 1998)

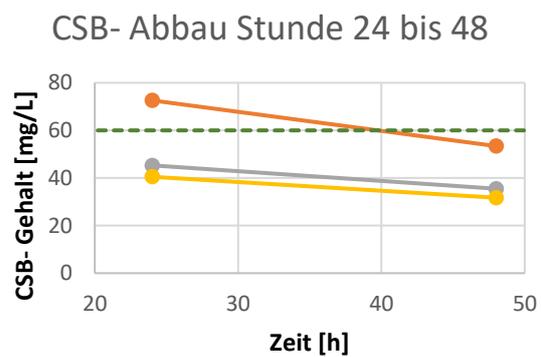


Abbildung 24: CSB-Abbau von Daten von Stunde 24 bis 48 von Felz 2 mit Grenzwert (Fedlex, 1998)

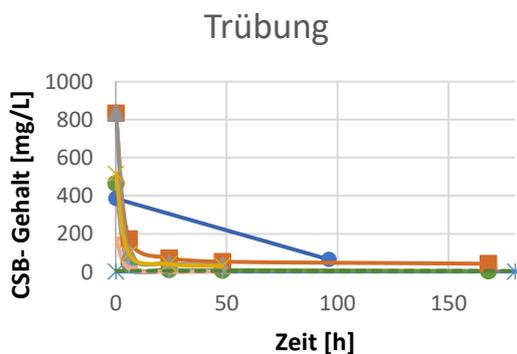


Abbildung 25: Trübung von Daten von Felz 2 mit Grenzwerten (Fedlex, 1998)

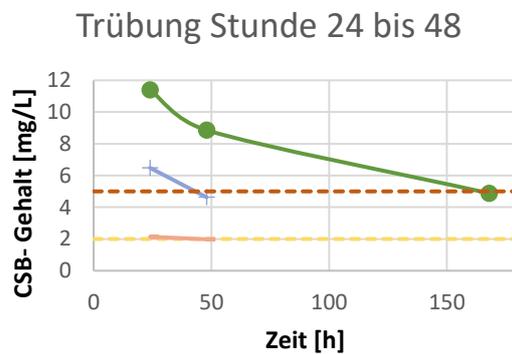


Abbildung 26: Trübung von Daten von Felz 2 von Stunde 24 bis 48 mit Grenzwerten(DWA, 2017; Minister of Health Canada, 2010)

Die Sauerstoffsättigung ist bei zwei Versuchen nach 24 Stunden auf über 50% (siehe Abbildung 27) und damit mit der deutschen Richtlinie DBA übereinstimmend. Bei einem Versuch wurde dies erst nach 48 Stunden erreicht.

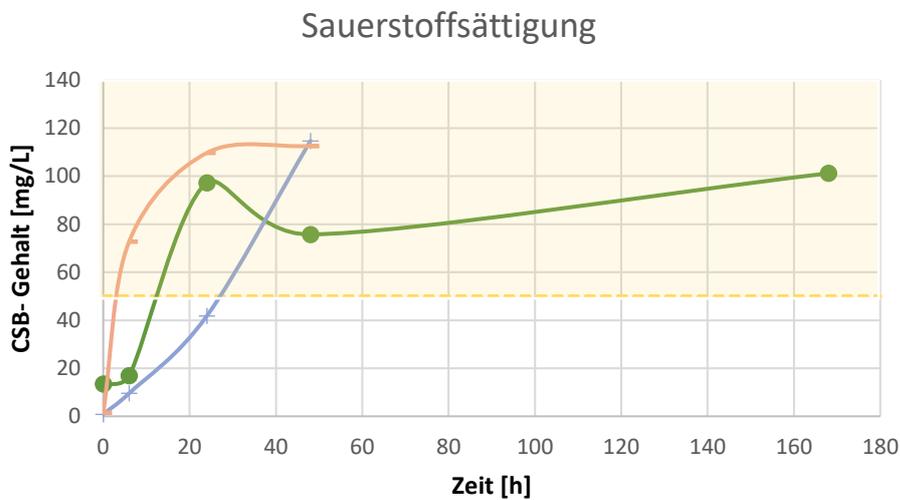


Abbildung 27: Sauerstoffsättigung von Daten von Felz 2 mit Grenzwert(DWA, 2017)

Alle Werte liegen innerhalb der pH-Grenzwerte der deutschen DWA Richtlinien, wie in der Abbildung 28 zu sehen ist.

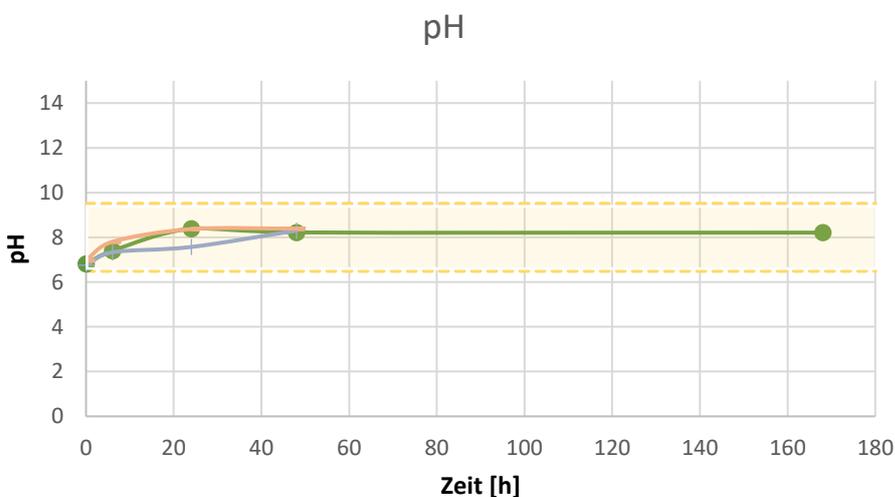


Abbildung 28: pH von Daten von Felz 2 mit Grenzwert (DWA, 2017)

Der Ammoniumgehalt ist, wie in der Abbildung 29 zu sehen ist, über die gesamte gemessene Zeit über dem Grenzwert der Deutschen DBV Richtlinien. Nur ein Messwert nach 96 Stunden war unter dem Grenzwert und auch unter der Bestimmungsgrenze des Hach Lange Tests. Wie auch schon im Kapitel 3.6 kann ein Anstieg nach 24 Stunden gesehen werden. Trotz Untersuchung der verfügbaren Daten bleibt die Ursache unklar. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass die Proben nicht gefroren wurden, die letzte Probe am wenigsten lange bei 4°C gelagert wurde und deshalb einen höheren Ammoniumgehalt hätte. Jedoch besagt EN ISO5667-3:1995, dass eine Probe, welche für Ammonium

analysiert wird, kurzzeitig bei 2-5°C gelagert werden kann (Klärwerk.info, 2023). Dies bedeutet, dass die Lagerung eher nicht der Grund für die erhöhten Ammoniumwerte war.

Ammoniumabbau

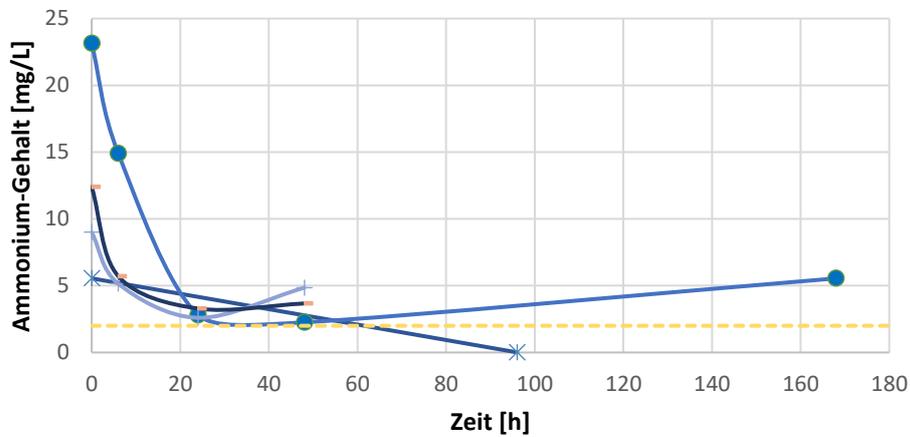


Abbildung 29: Ammoniumabbau von Daten von Felz 2 mit Grenzwert (DWA, 2017)

Bei drei von vier Versuchen war die Total-Phosphorkonzentration nach 24 Stunden genügend tief, um den Grenzwert der schweizerischen Gewässerschutzverordnung einzuhalten (siehe Abbildung 30/Abbildung 30).

TP-Abbau

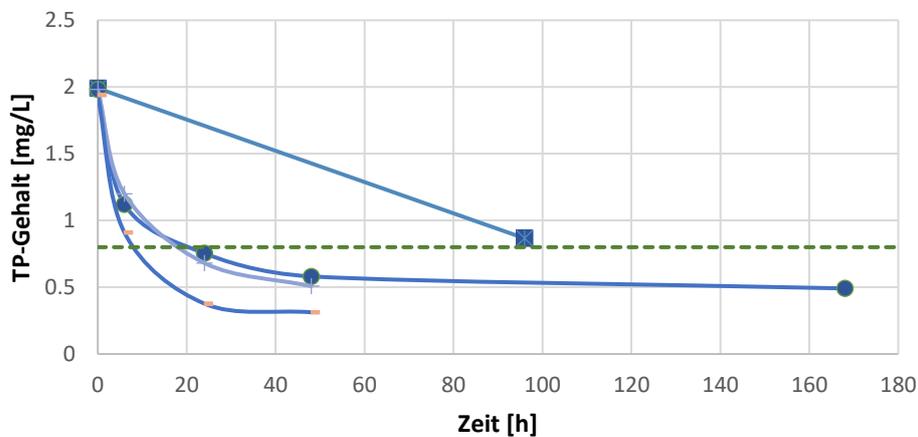


Abbildung 30: TP-Abbau von Daten von Felz 2 mit Grenzwert (Fedlex, 1998)

4 Schlussfolgerung

Im Allgemeinen haben die Resultate meist eine hohe Streuung. Dies kann einerseits an der Handhabung liegen. Andererseits ist die Grauwasseraufbereitungsmethode mit dem Tropfkörperfilter eine biologische Methode und deshalb nicht immer konstant. Die horizontale Anordnung der Module ergab bessere CSB- Abbauraten. Der Grund kann die geringere Durchflussrate durch die Module sein. Diese ist bei der horizontalen Anlage vier-mal kleiner als die Durchflussrate der vertikalen Anordnung. Einen klaren Einfluss der Anfangskonzentration auf die CSB-Abbauraten und die Abbaudauer ist schwierig zu erkennen. Die verschiedenen Gegenüberstellungen sind zum Teil widersprüchlich und sagen nicht dasselbe aus. Jedoch ist keine hohe Korrelation zu sehen und es kann davon ausgegangen werden, dass wenn ein Einfluss besteht, dieser nicht gross ist. Durch die Daten, welche für diese Arbeit generiert wurden, kann kein Einfluss der Wassertemperatur auf die CSB-Abbauraten erkannt werden. Die Differenz der Wassertemperatur beträgt jedoch nur bis zu 9°C, da Heizstäbe verwendet wurden. Um zu sehen, ob die Temperatur bei grösseren Schwankungen eine Differenz aufzeigen würde, müssten weitere Tests mit einer grösseren Temperaturvarianz gemacht werden. Bei einem diskontinuierlichen Betrieb von einer Laufzeit von 25-75% nimmt die CSB-Abbauraten um etwa 10 bis 14% ab. Die Konzentrationen von verschiedenen Parametern sind bei reellem Grauwasser immer höher. Der Abbauprozess verhält sich jedoch sehr ähnlich. Wenn weitere Versuche mit künstlichem Grauwasser gemacht werden, würde sich ein stärker konzentriertes Gemisch eher für den Vergleich eignen. Vor allem die Ammoniumkonzentration könnte erhöht werden, zum Beispiel mit Dünger oder spezifischen Reinigungsmitteln (Huang et al., 2012). Bei CSB, Sauerstoffsättigung, pH und Total-Phosphor wird nach spätestens 48 Stunden so viel abgebaut, dass verschiedene Grenzwerte eingehalten werden. Bei der Trübung konnten die Grenzwerte nicht bei allen drei Versuchen eingehalten werden und es wäre deshalb gut, eine weitere Stufe einzubauen. Ein einfacher Sandfilter wäre zum Beispiel eine Option. Die Ammoniumkonzentrationen waren über den Grenzwerten und stiegen sogar noch an. Dies müsste noch weiter beobachtet werden. Laut (Ted Flatebo, 2021) ist die biologische Aktivität und Nitrifikation stark abhängig von Temperatur. Es könnten Tests gemacht werden, bei welchen die Temperaturen etwas angehoben wird, um die Nitrifikation zu steigern. Für ein Risikofreies wiederverwenden des aufbereiteten Grauwassers müssten zusätzlich hygienische Parameter evaluiert werden.

Insgesamt scheint das Grauwasser innerhalb von 48 Stunden und einigen wenigen Veränderungen eine vielversprechende Grauwasseraufbereitungsmethode zu sein

5 Quellen

- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Piscoiro, J., Rizzo, A., & Masi, F. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of The Total Environment*, 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- BUWAL. (2003). *Regenwasser richtig nutzen* (S. 15). BAFU. www.bundespublikationen.ch
- Carina Doll, Angelika Hess, Nathalie Hubaux, Prof. Dr. Eberhard Morgenroth, & Eva Reynaert. (2021). *Fact sheet Grauwasser*. Eawag.
- Dalahmeh, S. S., Hylander, L. D., Vinnerås, B., Pell, M., Öborn, I., & Jönsson, H. (2011). Potential of organic filter materials for treating greywater to achieve irrigation quality: A review. *Water Science and Technology*, 63(9), 1832–1840. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.387>
- Davis, M. L. (2002). *Water and Wastewater engineering* (7. Aufl.). Wefpress.
- DWA. (2017). *DWA-Regelwerk Merkblatt DWA-M277*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft.
- Elizabeth Tille, Lukas Ulrich, Christoph Lüthi, Philippe Reymond, Roland Schertenleib, & Christian Zurbrügg. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies* (2nd revised edition). Eawag.
- Fedlex. (1998, Oktober 28). *SR 814.201—Waters Protection Ordinance of 28 O.. | Fedlex*. [Fedlex.admin.ch. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/2863_2863_2863/en](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/2863_2863_2863/en)
- Forbis-Stokes, A. A., Rocha-Melagno, L., & Deshusses, M. A. (2018). Nitrifying trickling filters and denitrifying bioreactors for nitrogen management of high-strength anaerobic digestion effluent. *Chemosphere*, 204, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.137>
- Gautam, R., Nayak, J. K., Daverey, A., & Ghosh, U. K. (2022). Chapter 1 - Emerging sustainable opportunities for waste to bioenergy: An overview. In C. M. Hussain, S. Singh, & L. Goswami (Hrsg.), *Waste-to-Energy Approaches Towards Zero Waste* (S. 1–55). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85387-3.00001-X>

- G.J. Schroepfer, M.B Al-Hakim, H.F. Seidel, & N.R. Ziemke. (1952). *Temperature effects on trickling filters*. University of Minnesota.
- Hel-x biocarrier. (2015). *Christian Stöhr GmbH*. Hel-X Füllkörper für MBBR und Aquakultur.
<https://www.hel-x.eu/technische-details/>
- Hemmerich, W. A. (2015). *Pearson Produkt-Moment Korrelation: Ergebnisse interpretieren | StatistikGuru.de*. <https://statistikguru.de/spss/produkt-moment-korrelation/ergebnisse-interpretieren.html>
- Huang, Y., Lee, S. C., Ho, K. F., Ho, S. S. H., Cao, N., Cheng, Y., & Gao, Y. (2012). Effect of ammonia on ozone-initiated formation of indoor secondary products with emissions from cleaning products. *Atmospheric Environment*, 59, 224–231.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.04.059>
- Jens Haberkamp, Stefan Gramel, & Tim Fuhrmann. (2021). *Handlungsempfehlungen für die Wasserwiederverwendung*.
- John Wiesman. (2007). *On-site Sewage Systems Chapter 246-272A WAC*. Washington State department of health.
- Kalaichelvan a/l Arugam, Azadeh Ghadimi, & LH Chang. (2017). *Design and Optimisation of Home Scale Greywater Recycling Package*. 1 Department of Mechanical Engineering, Taylor's.
- Kishimoto, N., Ohara, T., Hinobayashi, J., & Hashimoto, T. (2014). Roughness and temperature effects on the filter media of a trickling filter for nitrification. *Environmental Technology*, 35(9–12), 1549–1555. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.873484>
- Klärwerk.info. (2023, November 12). *Wasserproben konservieren oder nicht? Wann und wie? | Klärwerk.info*. <https://klaerwerk.info/fachwissen/labor/wasserproben-konservieren-oder-nicht-wann-und-wie/>
- Koch, K., Ysebaert, T., Denys, S., & Samson, R. (2020). Urban heat stress mitigation potential of green walls: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 126843.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126843>

- Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of The Total Environment*, 407(11), 3439–3449.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- Minister of Health Canada. (2010). *Canadian Guidelines for Domestic Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing*. www.healthcanada.gc.ca
- Mohammad Mehdi Sadeghian. (2016). *A Review on Green Wall, Classification and Function*. Faculty of Agriculture, Department of Landscape Design, Azad University.
- Morel, A., & Diener Stefan. (2006). *Greywater Management in Low and Middle-Income Countries*. Eawag.
- Nadine Antenen, Maximilian Grau, Matthias Frei, Wilfried Carl, & Ranka Junge. (2022). *WP 1: Catalogue of Requirements*. ZHAW LSFM, SIKA.
- Public Utilities board. (2014). *Singapore Technical Guide for Greywater Recycling for Toilet Flushing*. Public Utilities board. www.pub.gov.sg
- Susca, T., Zanghirella, F., Colasuonno, L., & Del Fatto, V. (2022). Effect of green wall installation on urban heat island and building energy use: A climate-informed systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112100.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112100>
- Ted Flatebo. (2021). *Ammonia removal best practices*. EPA.
- United States Environmental Protection Agency. (2000). *Wastewater Technology Fact Sheet Trickling Filters*. United States Environmental Protection Agency.
- Zhang, Y., Cheng, Y., Yang, C., Luo, W., Zeng, G., & Lu, L. (2015). Performance of system consisting of vertical flow trickling filter and horizontal flow multi-soil-layering reactor for treatment of rural wastewater. *Bioresource Technology*, 193, 424–432.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.140>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herkömmlicher Tropfkörperfilter(Elizabeth Tille et al., 2014).....	4
Abbildung 2: Aufbau des Grauwassersystem im Batchbetrieb (Nadine Antenen et al., 2022)	8
Abbildung 3: Aufstellung der vertikalen Aufstellung	10
Abbildung 4: Aufstellung der horizontalen Aufstellung	10
Abbildung 5: Substrat Hel-x (HXF13KLL)(Hel-x biocarrier, 2015)	11
Abbildung 6: Unterschied zwischen horizontaler und vertikaler Aufreihung der Module bei 2 L/min und 8 L/min.....	16
Abbildung 7: Einfluss der Durchflussrate auf die Abbaurrate	17
Abbildung 8: Einfluss der Anfangskonzentration auf die Abbaurrate Vergleich von der Normalkonzentration und der doppelten Konzentration in einem Versuch.	18
Abbildung 9: Einfluss der Anfangskonzentration auf die Abbaurrate mit allen in dieser Arbeit generierten Daten	18
Abbildung 10: Einfluss der Anfangskonzentration auf die Abbaudauer Vergleich von der Normalkonzentration und der doppelten Konzentration in einem Versuch.	19
Abbildung 11: Einfluss der Anfangskonzentration auf die Abbaudauer mit allen in dieser Arbeit generierten Daten	19
Abbildung 12: CSB Abbau in den ersten 6 Stunden im Vergleich zu der gesamten Zeit von der Normalkonzentration und der doppelten Konzentration in einem Versuch.	19
Abbildung 13: : CSB Abbau in den ersten 6 Stunden im Vergleich mit allen dieser Arbeit generierten Daten	19
Abbildung 14: Einfluss der Wassertemperatur auf die CSB-Abbaurrate	20
Abbildung 15: CSB Abbaurrate mit und ohne Intervalle	20
Abbildung 16: Abnahme der Abbaurrate mit Intervall.....	21
Abbildung 17: TN-Abbau von Proben von Felz 2 (Blautöne) und Versuchen mit künstlichem Grauwasser (Grüntöne).....	21
Abbildung 18: TP-Abbau von Proben von Felz 2 (Blautöne) und Versuchen mit künstlichem Grauwasser (Grüntöne).....	21
Abbildung 19: CSB-Abbau von Proben von Felz 2 (Blautöne) und Versuchen mit künstlichem Grauwasser (Grüntöne).....	22
Abbildung 20: Ammoniumabbau mit realem Grauwasser in der Felz 2 Anlage	22
Abbildung 21: Ammoniumabbau mit künstlichem Grauwasser	22
Abbildung 22: Nitratabbau mit realem Grauwasser der Felz 2 Anlage. Rot ist die untere Bestimmungsgrenze der Hach-Lange Tests.....	23
Abbildung 23: CSB-Abbau von Daten von Felz 2	26
Abbildung 24: CSB-Abbau von Daten von Stunde 24.....	26
Abbildung 25: Trübung von Daten von Felz 2	26
Abbildung 26: Trübung von Daten von Felz 2 von	26
Abbildung 27: Sauerstoffsättigung von Daten von Felz 2 mit Grenzwert(DWA, 2017).....	27
Abbildung 28: pH von Daten von Felz 2 mit Grenzwert (DWA, 2017)	27
Abbildung 29: Ammoniumabbau von Daten von Felz 2 mit Grenzwert(DWA, 2017).....	28
Abbildung 30: TP-Abbau von Daten von Felz 2 mit Grenzwert(Fedlex, 1998)	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: verschiedene Arten von natürlichen Grauwasseraufbereitungssystemen (Boano et al., 2020; Dalahmeh et al., 2011)	3
Tabelle 2: Kennwerte von verschiedenen Tropfkörperfilter	4
Tabelle 3: Grenzwerte zu Ab--und Grau-Wasser von verschiedenen Richtlinien	6
Tabelle 4: Übersicht der Grauwasseraufbereitungsanlagen dieses Projekts	9
Tabelle 5: Konzentration von Inhaltsstoffen in dem künstlichen Grauwasser	11
Tabelle 6: Analysen-Geräte/-Tests	14
Tabelle 7: Die wichtigsten Formeln der Datenanalyse	15
Tabelle 8: Kenngrößen von Daten von Felz2	24
Tabelle 9: Daten von reellem Grauwasser von Felz 2 Messungen nach 48 Stunden Aufbereitung. Abbauraten für den Vergleich von (Dalahmeh et al., 2011)	25

Optimierung einer Wandbegrünung mit integrierter Grauwasseraufbereitung

Anhang

Zentrale Fachbereiche
für Ingenieure/Ingenieurinnen



Bachelorarbeit, M. Attenhofer

Versuch	Resultat	Tankgröße	Konzentration	Durchflussschwindigkeit	Modul pro System	HLR	OLR	gesamtes Wasser Durchfl.	HLR	Probe	Zeit on	Zeit	Datum	Standort	Probe	CSB	CSB	Trübung	Salz 254	NO ₃	NO ₂	Am ₄	Leitfähigkeit	Temperatur	pH	TP	Am ₄	NO ₃	NO ₂	
			l/min	l/m ² d		1/d	kg/(m ² ·d)	m ³ /d	1/d	mg/l	min	h				mg/l	mg/l	NTU	mg/l	mg/l	mg/l	µS/cm	°C		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.6	144.0	1022.4	100	0	23.10	ZHAW out N1	1159	46.36	58.8	29.44	95.8	9.91	6.94	280	11.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	0.8	144.0	1022.4	100	0	23.10	ZHAW out N2	598	23.92	63	35.84	95.3	9.83	6.87	253	11.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	0	23.10	ZHAW out W1	729	29.16	55.1	21.69	93.9	9.64	6.86	261	11.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	0.6	144.0	1022.4	100	0	23.10	ZHAW out W2	451	18.04	61.9	25.51	85.0	8.47	6.89	282	12.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	0.5	144.0	1022.4	100	0	23.10	ZHAW out S1	367	14.68	52.2	25.95	98.0	9.69	6.98	277	13.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	0.5	144.0	1022.4	100	6	23.10	ZHAW out O1	823	14.52	49.6	39.22	95.0	9.35	7.01	244	13.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	0.5	144.0	1022.4	100	0	23.10	ZHAW out O2	377	15.08	75.6	40.15	92.8	9.21	6.96	214.8	12.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	0.6	144.0	1022.4	100	0	23.10	ZHAW out O2	400	16	47.4	46.62	95.2	9.75	6.97	269	11.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	6	23.10	ZHAW out N1	720	8.8	34.2	43.53	91.2	9.15	7.97	287	14.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	6	23.10	ZHAW out N2	387	15.48	25.2	31.93	97.9	9.32	8.04	261	14.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	6	23.10	ZHAW out W1	169	6.76	12.1	33.77	97.1	9.21	8.04	271	14.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	6	23.10	ZHAW out W2	146	5.88	14.3	37.03	98.2	8.87	8.15	288	16.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	6	23.10	ZHAW out S1	144	5.76	19.1	33.27	98.4	8.68	8.13	289	18.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	6	23.10	ZHAW out S2	135	5.4	7.25	45.36	98.2	8.63	8.13	254	18.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	6	23.10	ZHAW out O1	216	8.64	42.3	47.81	98.5	8.83	8.14	222	17.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	6	23.10	ZHAW out O2	150	6	13.2	44.63	97.5	9.22	8.13	272	14.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	24	24.10	ZHAW out N1	129	5.16	12.4	45.78	98.7	9.97	7.86	298	11.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	24	24.10	ZHAW out N2	150	6	12.2	46.15	98.5	9.91	7.96	288	12.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	24	24.10	ZHAW out W1	103	4.12	3.8	36.8	98.6	9.87	7.99	277	12.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	24	24.10	ZHAW out W2	74.5	2.98	2.02	42.59	99.2	9.63	8.09	304	13.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	24	24.10	ZHAW out S1	58.5	2.34	2.6	38.89	99.2	9.53	8.11	294	14.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	24	24.10	ZHAW out S2	51.4	2.056	2.14	49.4	99.0	9.47	8.11	262	14.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	24	24.10	ZHAW out O1	89.6	3.84	11.6	57.71	99.1	9.54	8.12	230	14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	24	24.10	ZHAW out O2	108	4.32	6.19	44.81	98.0	9.74	8.12	279	12.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	48	25.10	ZHAW out N1	171	6.84	5.85	37.08	98.8	10.19	7.78	294	10.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	48	25.10	ZHAW out N2	163	6.52	25.6	39.74	97.8	10.14	7.86	260	10.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	48	25.10	ZHAW out W1	58	2.32	2.84	39.79	98.7	10.7	7.93	271	10.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	48	25.10	ZHAW out W2	60.4	2.416	11.1	40.02	100.0	10.07	8.10	299	11.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	48	25.10	ZHAW out S1	43	1.72	1.73	40.78	100.0	9.97	8.10	289	12.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	48	25.10	ZHAW out S2	40.8	1.632	1.87	43.87	99.6	9.87	8.11	296	12.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	48	25.10	ZHAW out O1	80	3.2	12.2	56.57	99.7	9.87	8.14	233	12.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	1	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	100	48	25.10	ZHAW out O2	69.9	2.796	10.8	47.97	98.4	10.01	8.14	278	11.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.7	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out N1	1210	48.36	105	6.0484	93.2	9.55	6.83	303	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.1	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out N2	820	30	62.3	6.6464	94.6	9.81	6.89	254	10.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.6	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out W1	1161	46.44	90.8	6.0908	96.1	9.95	6.92	269	10.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	0.8	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out W2	569	22.76	98.1	6.0523	96.4	9.97	6.92	301	11.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	0.8	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out S1	557	22.28	99.6	6.0515	98.6	9.92	7	301	11.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.1	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out S2	774	30.96	95	6.0463	98.6	9.86	7.05	274	12.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	0.8	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out O1	558	22.32	111	6.0242	98.1	9.85	7.04	256	11.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.2	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out O2	823	32.92	143	6.0535	96.2	9.84	7.03	291	10.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out N1	598	23.92	68.3	6.0441	96.4	9.77	7.92	285	12.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out N2	210	8.4	99.3	6.0189	97.6	9.53	7.58	264	12.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out W1	152	6.08	19.4	6.0569	97.9	9.59	7.94	281	13.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out W2	146	5.84	10.7	6.0123	99.3	9.56	7.93	292	13.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out S1	128	5.12	17.1	6.0548	99.1	9.38	8.03	320	14.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out S2	101	4.04	7.79	6.0389	98.9	9.35	8.12	286	14.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
doppelt konz.	2	40	doppelt	4	2	205714.3	1.0	144.0	1022.4	0	30.10	ZHAW out O1	178																	

Optimierung einer Wandbegrünung mit integrierter Grauwasseraufbereitung

Zentraler Fachbereich
für Ingenieurwissenschaften



Bachelorarbeit, M. Attenhofer

Versuch	Regelart	Tankgröße	Konzentration	Durchflussgeschwindigkeit	Modul pro System	HLR	Zeit	Zeit	Datum	Standort	Probe	Zeit	COB	NO ₃	NO ₂	Am	Ca	Temperatur	pH	PP	PO ₄	NO ₃	NO ₂		
				l/min		l/m ² ·d	h	h				h	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	0	11.12 ZHAW out	N	279	22.32	32.7 NA	96.8	9.74	7.71	347 NA	NA	NA	NA	NA		
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	0	11.12 ZHAW out	W	156	12.48	28 NA	96.2	9.65	7.71	294 NA	NA	2.77	0.233 NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	0	11.12 ZHAW out	S	186	12.36	36 NA	96.6	9.75	7.73	295 NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	0	11.12 ZHAW out	E	200	20.8	51.2 NA	96.2	10.47	7.11	386 NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	6	11.12 ZHAW out	N	214	17.12	35.6 NA	92.8	8.91	8.52	346 NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	6	11.12 ZHAW out	W	58.6	4.688	7.68 NA	95.3	9.37	8.51	287 NA	NA	1.06	0.087 NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	6	11.12 ZHAW out	E	96.6	7.728	9.51 NA	95.0	9.37	8.01	296 NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	24	12.12 ZHAW out	N	176	14.08	25.1 NA	90.8	8.72	7.88	386 NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	24	12.12 ZHAW out	W	169	13.52	36.3 NA	94.5	5.15	7.77	365	17.8 NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	24	12.12 ZHAW out	E	39.7	2.696	1.26 NA	94.0	8.94	8.17	285	15.2	0.837	0.064 NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	24	12.12 ZHAW out	W	53.1	4.728	2.41 NA	94.6	9.09	8.21	285	14.7 NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	48	13.12 ZHAW out	N	92.9	7.432	9.8 NA	95.2	9.16	8.17	355	14.9 NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	48	13.12 ZHAW out	W	81	6.48	9.68 NA	101.9	9.89	8.2	351	13.6 NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	48	13.12 ZHAW out	E	32.1	2.568	0.9 NA	101.3	9.8	8.24	284	13.6	0.747	0.05 NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	48	13.12 ZHAW out	W	39.7	2.676	1.59 NA	100.5	9.71	8.24	280	12.6 NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	1	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	13.12 ZHAW out	E	85	6.8	12 NA	100.4	9.8	8.35	357	13.1 NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	0	13.12 ZHAW out	N	314	25.12	63.7	93.233	100.7	9.67	7.89	344	13.5 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.1	72.0	1022.4	100	0	13.12 ZHAW out	W	240	19.2	51.6	92.918	100.7	7.68	284	13.5 NA	NA	NA	NA	NA	
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	0	13.12 ZHAW out	E	254.6	20.368	26	6.2224	100.8	9.73	7.61	281	13.7 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.7	72.0	1022.4	100	0	13.12 ZHAW out	S	500	40	76.2	6.4248	99.8	9.7	7.56	362	13.2 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	13.12 ZHAW out	N	170	13.6	29.6	6.2867	99.9	9.64	8.26	364	13.6 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	13.12 ZHAW out	W	67.2	5.376	7.42	6.2198	101.3	9.83	8.32	295	13.5 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	13.12 ZHAW out	E	101	8.08	5.73	6.2412	99.3	9.57	8.27	385	13.5 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	14.12 ZHAW out	N	156	12.48	24.9	6.2568	101.6	10.5	8.14	359	11.1 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	14.12 ZHAW out	W	41.3	3.304	1.42	6.2021	103.8	10.66	8.19	285	11.1 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	14.12 ZHAW out	S	64.6	5.168	2.33	6.211	100.6	10.16	8.18	264	12.1 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	14.12 ZHAW out	E	111	8.88	13.1	6.2314	99.2	10.14	8.3	377	11.5 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	15.12 ZHAW out	N	90.2	7.216	11	6.302	97.1	10.22	8.33	344	11 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	15.12 ZHAW out	W	29.1	2.328	1.38	6.2423	98.5	10.39	8.38	274	10.39 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	15.12 ZHAW out	E	48.6	3.888	1.95	6.2519	97.6	10.11	8.28	278	12 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	15.12 ZHAW out	S	69.3	5.544	2.91	6.2191	97.3	10.15	8.35	302	11.6 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.3	72.0	1022.4	100	0	18.12 ZHAW out	N	274	21.92	61.6	6.2723	99.4	11.4	7.4	348	7.8 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.3	72.0	1022.4	100	0	18.12 ZHAW out	W	188	15.04	49	6.3034	98.9	11.24	7.44	286	8.2	3	0.318 NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.3	72.0	1022.4	100	0	18.12 ZHAW out	E	248	19.84	30.9	6.3141	98.7	10.97	7.42	283	9.0 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	0	18.12 ZHAW out	O	289	21.52	57.4	6.3028	97.3	10.92	7.56	371	8.1 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	18.12 ZHAW out	N	231	18.48	34.4	6.4051	97.3	10.49	8.08	345	10.1 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	18.12 ZHAW out	W	69.6	5.968	6.74	6.325	98.0	10.64	8.21	289	9.8	1.1	0.126 NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	18.12 ZHAW out	S	165	13.2	6.81	6.3059	98.1	10.8	8.15	288	10.3 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	19.12 ZHAW out	O	209	16.72	44.5	6.321	96.0	10.43	8.23	379	9.7 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	19.12 ZHAW out	N	140	11.2	17.4	6.3050	97.7	10.85	8.08	346	8.1 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	19.12 ZHAW out	W	39.2	3.136	2.89	6.2245	98.3	11.12	8.18	290	7.8	0.997	0.112 NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	19.12 ZHAW out	S	90.6	7.248	2.87	6.2573	99.2	11.09	8.15	284	8.5 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	20.12 ZHAW out	O	122	9.76	24.4	6.2554	98.4	11.12	8.24	379	7.8 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	20.12 ZHAW out	W	108	8.64	21	6.3242	99.9	10.46	8.09	355	10.8 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	20.12 ZHAW out	E	24.8	1.984	1.3	6.212	99.5	10.46	8.14	284	10.6	1.89	0.096 NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	20.12 ZHAW out	S	60.1	4.808	2.42	6.2431	99.8	10.45	8.14	283	10.9 NA	NA	NA	NA	NA
Intervall	2	80 normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	20.12 ZHAW out	O	24.9	8.72	22.5	6.2595	97.8	10.37	8.25	372	10.2 NA	NA	NA	NA	NA
Righbor	1	40 doppelt	16	4	41428.6	0.3	576.0	8179.2	100	0	14.11 ZHAW in	Hor	385	15.4	118	6.2964	98.8	9.24	6.94	94.3	15.5 SNA	SNA	SNA	SNA	SNA
R																									

Optimierung einer Wandbegrünung mit integrierter Grauwasseraufbereitung

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



Bachelorarbeit, M. Attenhofer

Versuch	Regelart	Tankgröße	Konzentration	Durchflussgeschwindigkeit l/min	Modul pro System	HLR L/m²*d	Zeit COB/(L*d)	Gesamtes Wasser fließt durch min	Zeit on %	Zeit in h	Datum	Standort	Probe	Zeit min	COB mg/L	NH4 mg/L	SAK 204 %	pH	O ₂ mg/L	NH ₃ mg/L	Leitfähigkeit µS/cm	Temperatur °C	TP mg/L	Nit mg/L	NO3 mg/L	NO2 mg/L		
																											COB mg/L	NH4 mg/L
normVertical	1	40	normal	8	4	205714.3	0.4	288.0	3044.8	100	0	6.12 ZHAW in	Vert	612	24.48	157	0.2306	98.3	9.74	6.29	123.7	13.0	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	1	40	normal	8	4	205714.3	0.4	288.0	3044.8	100	6	6.12 ZHAW in	Vert	191	7.64	20.1	0.1509	100.8	9.68	7.39	123.9	14.6	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	1	40	normal	8	4	205714.3	0.4	288.0	3044.8	100	24	7.12 ZHAW in	Vert	168	6.72	16.2	0.1675	100.9	10.11	7.47	121.5	13.2	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	1	40	normal	8	4	205714.3	0.4	288.0	3044.8	100	48	8.12 ZHAW in	Vert	43.8	1.752	11.3	0.1159	101.1	10.03	7.43	140.1	13	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	2	40	normal	8	4	205714.3	0.1	288.0	3044.8	100	0	11.12 ZHAW in	Vert	191	7.64	0.1028	29.6	2.79	6.75	97.1	15.7	SNA	SNA	SNA	SNA			
normVertical	2	40	normal	8	4	205714.3	0.1	288.0	3044.8	100	6	11.12 ZHAW in	Vert	244	9.76	35.7	0.1667	97.5	9.29	8.05	103.9	15.7	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	2	40	normal	8	4	205714.3	0.1	288.0	3044.8	100	24	12.12 ZHAW in	Vert	91.9	1.676	19.5	0.1226	97.9	9.21	7.69	100.0	15.7	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	2	40	normal	8	4	205714.3	0.1	288.0	3044.8	100	48	13.12 ZHAW in	Vert	75.9	1.036	8.37	0.122	101.6	9.73	7.34	121	14.1	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	3	40	normal	8	4	205714.3	0.3	288.0	3044.8	100	0	13.12 ZHAW in	Vert	438	17.52	124	0.2008	101.5	9.66	6.64	132.4	14.3	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	3	40	normal	8	4	205714.3	0.3	288.0	3044.8	100	6	13.12 ZHAW in	Vert	257	10.28	52	0.2093	103.0	9.64	7.2	146.2	15.2	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	3	40	normal	8	4	205714.3	0.3	288.0	3044.8	100	24	14.12 ZHAW in	Vert	153	6.12	25.8	0.1959	102.3	10	6.8	159	13.6	SNA	SNA	SNA	SNA		
normVertical	3	40	normal	8	4	205714.3	0.3	288.0	3044.8	100	48	15.12 ZHAW in	Vert	80.8	2.32	15.1	0.1673	98.2	9.22	7.12	152.4	14.8	SNA	SNA	SNA	SNA		
lowVertical	1	40	normal	2	4	51428.6	0.3	1022.4	1022.4	100	0	18.12 ZHAW in	Vert	213	8.52	62.9	0.1265	63.0	6.24	6.58	100.3	14.0	SNA	SNA	SNA	SNA		
lowVertical	1	40	normal	2	4	51428.6	0.3	1022.4	1022.4	100	6	18.12 ZHAW in	Vert	80.7	3.228	17.3	0.0734	96.3	9.5	7.15	105.3	14.0	SNA	SNA	SNA	SNA		
lowVertical	1	40	normal	2	4	51428.6	0.3	1022.4	1022.4	100	24	19.12 ZHAW in	Vert	52.8	2.112	7.69	0.0783	98.6	10.04	7.16	108.7	12.5	SNA	SNA	SNA	SNA		
lowVertical	2	40	normal	2	4	51428.6	0.3	1022.4	1022.4	100	0	19.12 ZHAW in	Vert	246	9.84	50.7	0.1455	98.7	10	6.95	113.8	12.6	SNA	SNA	SNA	SNA		
lowVertical	2	40	normal	2	4	51428.6	0.3	1022.4	1022.4	100	6	19.12 ZHAW in	Vert	134	5.36	34.3	0.1144	95.9	9.06	7.3	123.3	15.5	SNA	SNA	SNA	SNA		
lowVertical	2	40	normal	2	4	51428.6	0.3	1022.4	1022.4	100	24	20.12 ZHAW in	Vert	101	4.08	17.1	0.132	96.6	9.8	7.21	128.7	13.2	SNA	SNA	SNA	SNA		
lowVertical	3	40	normal	2	4	51428.6	0.4	1022.4	1022.4	100	0	20.12 ZHAW in	Vert	299	11.96	34.6	0.2285	99.0	9.82	6.85	130	13.3	SNA	SNA	SNA	SNA		
lowVertical	3	40	normal	2	4	51428.6	0.4	1022.4	1022.4	100	6	20.12 ZHAW in	Vert	178	7.12	42.9	0.2444	97.4	9.44	7.34	140.6	14.4	SNA	SNA	SNA	SNA		
lowVertical	3	40	normal	2	4	51428.6	0.4	1022.4	1022.4	100	24	21.12 ZHAW in	Vert	147	5.88	25.6	0.2066	98.3	9.69	7.24	146.4	13.2	SNA	SNA	SNA	SNA		
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.3	72.0	1022.4	100	0	4.12 ZHAW out	N	221	17.68	54.4	0.2818	100	11.91	7.24	348	5.2	NA	NA	0.134	NA	NA	
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	0	4.12 ZHAW out	W	107	8.56	24.6	0.2047	100.1	11.97	7.37	317	5.3	2.06	0.39	0.39	0.03	0.28	0.002
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.2	72.0	1022.4	100	0	4.12 ZHAW out	S	169	13.52	28.7	0.2346	100.5	12.19	7.45	398	4.8	2.69	0.29	0.29	0.05	NA	NA
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.3	72.0	1022.4	100	0	4.12 ZHAW out	O	238	19.04	38.1	0.1951	100.7	12.11	7.42	358	4.8	NA	NA	0.394	0.074	NA	NA
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	4.12 ZHAW out	N	85.5	6.84	15.6	0.1566	101.1	11.12	8.29	344	7.2	NA	NA	0.12	0.02	NA	NA
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	4.12 ZHAW out	W	64.4	5.152	6.14	0.138	100.5	11.17	8.29	320	6.9	1.84	0.1	0.05	0.13	-0.005	
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	4.12 ZHAW out	S	46.6	3.728	2.89	0.1663	100.5	11.43	8.27	313	6.9	1.89	0.092	0.024	NA	NA	
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	6	4.12 ZHAW out	O	129	10.32	9.61	0.19	100.4	11.44	8.34	360	6.8	NA	NA	0.097	0.034	NA	NA
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	5.12 ZHAW out	N	63.2	5.056	5.42	0.1678	100.1	10.93	8.36	344	8.5	NA	NA	0.1	0.05	NA	NA
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	5.12 ZHAW out	W	49.8	3.984	2.09	0.1789	100.8	11.07	8.37	311	8.4	1.14	0.076	0.007	0.163	0.001	
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	5.12 ZHAW out	S	46.4	3.712	1.19	0.163	100.8	11.16	8.38	304	8	1.25	0.061	0.013	NA	NA	
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	24	5.12 ZHAW out	O	46.6	3.728	3.46	0.1254	100.3	11.11	8.39	358	10.4	NA	NA	0.079	0.009	NA	NA
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	6.12 ZHAW out	N	48.1	3.848	15.7	0.1397	99.6	10.63	8.25	346	9.7	NA	NA	0.085	0.005	0.14	-0.005
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	6.12 ZHAW out	W	21.4	1.712	2.15	0.1505	101.0	10.83	8.32	318	9.5	0.911	0.058	0.008	0.117	-0.004	
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	6.12 ZHAW out	S	20.3	1.624	3.92	0.1402	100.2	10.85	8.33	311	9.1	1.35	0.057	0.008	0.133	-0.003	
intervall falsch	1	80	normal	4	4	10285.1	0.4	72.0	1022.4	100	48	6.12 ZHAW out	O	39.4	3.152	3.63	0.1339	98.7	9.54	8.25	375	14	NA	NA	0.07	0.017	0.11	-0.003
Felz 2	1	80	normal	4	4	10285.1	1.31267056	72.0	1022.4	100	0	1.12 Felz2		932	74.56	385		1	0.69	6.85	518	NA	21.7	1.99	5.55	0.128	0.004	-0.004
Felz 2	1	80	normal	4	4	10285.1	1.31267056	72.0	1022.4	100	96	5.12 Felz2		207	16.56	63.5		105.1	9.6	8.28	462	NA	6.01	0.866	0.01	0.095	-0.003	
Felz 2	2	80	normal	4	4	10285.1	1.173239437	72.0	1022.4	100	0	7.12 Felz2		833	66.64	464	0.8902	11.4	1.4	6.82	613	NA	22.6	1.98	23.15	0.073	NA	NA
Felz 2	2	80	normal	4	4	10285.1	1.173239437	72.0	1022.4	100	6	7.12 Felz2		179	13.84	46.8	0.1339	18.9	1.76	7.4	592	NA	11	1.12	14.9	0.278	NA	NA
Felz 2	2	80	normal	4	4	10285.1	1.173239437	72.0	1022.4	100	24	8.12 Felz2		72.6	5.808	11.4	0.1403	97.3	9.96	8.39	576	NA	5.85	0.754	2.82	0.112	NA	NA
Felz 2	2	80	normal	4	4	10285.1	1.173239437	72.0	1022.4	100	48	9.12 Felz2		53.4	4.272	8.86	0.1439	75.7	7.9	8.22	635	NA	4.63	0.581	2.26	0.17	NA	NA
Felz 2	2	80	normal	4	4	10285.1	1.173239437	72.0	1022.4	100	108	14.12 Felz2		43	3.44	4.88	0.1416	101.2	8.68	8.21	576	NA	7.55	0.491	5.55	0.474	NA	NA
Felz 2	2	80	normal	4	4	10285.1	1.173239437	72.0	1022.4	100	6	14.12 Felz2		846	66.88	483	0.892	0.9	0.98	676	662	NA	24.4	1.08	9	0.182	NA	NA
Felz 2	3	80	normal	4	4	10285.1	0.78332113	72.0	1022.4	100	0	16.12 Felz2		99.8	7.984	11.7	0.2375	9.6	0.85	7.33	604	NA	10.7	1.2	5.15	0.148	NA	NA
Felz 2	3	80	normal	4	4	10285.1	0.78332113	72.0	1022.4	100	24	15.12 Felz2		45.3	3.624	4.48	0.1246	41.8	3.88	7.57	681	NA	4.8	0.61	2.6	0.213	NA	NA
Felz 2	3	80	normal	4	4	10285.1	0.78332113	72.0	1022.4	100	48	16.12 Felz2		35.5	2.84	4.63	0.0996	114.7	10.83	8.3	627	NA	6.22	0.508	0.299	NA	NA	
Felz 2	4	80	normal	4	4	10285.1	0.78332113	72.0	1022.4	100	0	17.12 Felz2		515	41.2	173	0.487	1.5	0.13									