

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCE UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Semesterarbeit 1

Abwassernutzungskonzepte am Beispiel «FELZ ZWEI»

von

Laila Lüthi

Bachelorstudiengang Umweltingenieurwesen 2018

Semester 4

Abgabedatum: 16. Juli 2020

Fachkorrektorin:

Devi Bühler

ZHAW Life Sciences und Facility Management

Campus Grüental

8820 Wädenswil

bued@zhaw.ch

Zusammenfassung

Durch den Anstieg der weltweiten Eutrophierung (Steffen et al., 2015), die erhöhte Abwasserproduktion in Städten (ARE, 2019) und die stetige Zunahme des Wasserbedarfs (Larsen et al., 2013), wird der aktuelle Umgang mit der Ressource Wasser in Frage gestellt. Um den aktuellen Herausforderungen zu begegnen, braucht es im Umgang mit Abwasser innovative Lösungen. Neuartige Sanitäre Systeme (NASS) stellen durch gezielte Erfassung und Behandlung von Teilstoffströmen einen interessanten Lösungsansatz dar.

Das Ziel dieser Arbeit ist es eine Entscheidungshilfe zu entwickeln, die es erlaubt, diverse NASS nach ihrer Eignung für urbane Gebiete in der Schweiz einzuteilen. Die Klassifizierung dient in einem zweiten Schritt dazu, geeignete Konzepte in die Praxis umzusetzen.

Um die Konzepte zu klassifizieren, ist ein Kriterienkatalog entwickelt worden, der rationale Entscheidungen bei der Auswahl eines Systems unterstützt. Als methodisches Vorgehen wurde ein dreistufiges Verfahren aufgebaut. In der 1. Stufe wurden «harte» Kriterien definiert, welche für die Umsetzung in der Schweiz notwendig sind. In der Stufe 2 wurden «weiche» Kriterien aufgelistet, die je nach Kontext stärker oder weniger stark gewichtet wurden. In der letzten Stufe sind projektspezifische Kriterien, die repräsentativ für nachhaltiges Bauen in der Schweiz stehen, zu finden. Um die Ergebnisse in die Praxis umzusetzen, wurde eng mit dem Architekturbüro VBAU zusammengearbeitet. Im Rahmen des aktuellen Projektes «FELZ ZWEI» in Zürich Altstetten wurden drei Designkonzepte konzipiert und evaluiert: 1a SBR-Verfahren, 1b MBR-Verfahren, 2a Bepflanzte Bodenfilter, 2b Fassadenbegrünung und 3 Aquaponikanlage mit Grauwasseraufarbeitung.

Die Ergebnisse zeigen, dass Fassadenbegrünungen in urbanen Gebieten aufgrund ihrer Multifunktionalität und ihrem platzsparenden Design die geeignetste Lösung darstellen. Auf einer Fläche von 10m² sind sie in der Lage, Abwasser von ca. 35 Personen aufzuarbeiten. Zusätzlichen Mehrwert generieren sie durch die Verringerung der anthropogenen Wärmeabgabe, verstärkte Isolierung, Lärmreduktion und durch die Schadstofffiltration (Pradhan et al., 2019a).

Trotz der Eignung des Verfahrens, scheint die fehlenden Gesetzgebungen zur Wiederverwendung von Grauwasser und weitere rechtliche Hürden, die Umsetzung zu erschweren. Oft hindert der finanzielle und administrative Aufwand kleine Unternehmen bei der Realisierung ihrer Projekte. Um eine Transformation der Abwasserproblematik zu erreichen, sind Pionierprojekte von eminenter Bedeutung.

Glossar

Albedo: Rückstrahlungsvermögen von nicht selbstleuchtenden, diffus reflektierenden Oberflächen.

Amortisation (Payback): Zeitraum für die Deckung der aufgewendeten Anschaffungskosten durch den erwirtschafteten Betrag.

Brauchwasser: Wasser, das für Bewässerung, Toilettenspülung und zum Waschen wiederverwendet werden kann.

Braunwasser: Bezeichnet die Fäzes im Abwasser.

BSB_{5/7}: Der Biochemische Sauerstoffbedarf gibt die Menge an Sauerstoff an, der zum biotischen Abbau im Wasser vorhandener biologisch abbaubaren organischer Stoffe innerhalb von 5 oder 7 Tagen benötigt wird.

CSB: Der chemische Sauerstoffbedarf steht für die Summe aller im Wasser vorhandenen, oxidierbaren Stoffe.

Dezentrale Reinigung: Die Reinigung erfolgt vor Ort.

EAWAG: Die Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz ist eine Forschungsanstalt des ETH-Bereichs.

EMPA: Die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt ist eine schweizerische Forschungsinstitution für anwendungsorientierte Materialwissenschaften und Technologie.

Fäkalien: Menschliche Ausscheidungen.

Fäzes: Kot.

Gelbwasser: Setzt sich aus Urin und dessen Spülwasser zusammen.

Grauwasser: Gliedert sich in leicht oder stark verschmutztes Grauwasser. Leicht verschmutztes Grauwasser stammt hauptsächlich aus Dusche, Bad, Handwaschbecken und Waschmaschine. Stark verschmutztes Wasser enthält zusätzlich Feststoffe von Essensresten, sowie Öl und eine hohe Phosphorkonzentration aufgrund des Spülmittels.

MBR: Membranbioreaktoren sind vor allem in Kleinkläranlagen zu finden. Unter Zuhilfenahme von Membranen mit Poren zwischen 0,1 und 0,01 µm erreichen sie eine gute Leistung für die Abwasserreinigung.

Mischkanalisation: Ableitungssystem in der Entwässerungstechnik, bei dem alle Abwässer in einer gemeinsamen Leitung gemischt abgeführt werden.

NASS: Neuartige Sanitäre Systeme bezeichnet innovative kreislaforientierte Abwasserlösungen, mit dem Ziel der Wiederverwendung von Wasser- und Stoffströmen. Neuartige Sanitärsysteme beruhen auf einer Trennung von Wasserströmen, die im konventionellen System gemischt werden.

Pyrolyseverfahren: Thermo-chemische Umwandlungsprozesse, in denen organische Verbindungen bei hohen Temperaturen und in Abwesenheit von Sauerstoff gespalten werden.

Schwarzwasser: Wird in Gelb- und Braunwasser unterteilt.

Semizentral: Die Entsorgung erfolgt für mehrere Einheiten durch kleinere Anlagen. Das erforderliche Netz für den Transport der Ströme vom Entstehungsort bis zur Behandlungsanlage ist im kleineren Mass erforderlich.

SBR: Sequence Batch Reactor ist eine Variante des Belebtschlammverfahrens zur aeroben Reinigung von Abwasser.

Teilströme: Grauwasser, Regenwasser, Schwarzwasser, Gelbwasser und Braunwasser.

TRL: Das Technology Readiness Level beschreibt die Qualifikation eines Systems für den Einsatzbereich oder das Entwicklungsstadium des Systems.

Zentrale Reinigung: Eine grosse Anzahl an Einheiten ist an ein zentrales System angeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Glossar	3
1 Einleitung.....	5
2 Theorie	7
2.1 Teilströme	7
2.2 Abwassersysteme	9
2.2.1 Herkömmliche Kläranlagen	9
2.2.2 Neuartige Sanitäre Systeme (NASS).....	9
3 Material und Methoden.....	11
3.1 Recherche.....	11
3.2 Kriterienentwicklung	11
3.2.1 Stufe 1: Harte Kriterien.....	12
3.2.2 Stufe 2: Weiche Kriterien.....	13
3.2.3 Stufe 3: Projektspezifische Kriterien	14
4 Resultate	15
4.1 Konzepte	15
4.1.1 Konzept 1	15
4.1.2 Konzept 2	17
4.1.3 Konzept 3.....	19
4.2 Evaluation der Kriterien.....	20
4.2.1 Evaluation der Stufe 1	20
4.2.2 Evaluation der Stufe 2	21
4.2.3 Evaluation der Stufe 3	25
4.3 Empfehlung	26
4.3.1 Umsetzung	26
Diskussion.....	27
5 Danksagung.....	29
6 Literaturverzeichnis.....	30
Abbildungsverzeichnis	38
Tabellenverzeichnis	39
Anhang 1 Verfahren zur Gelbwasseraufarbeitung.....	40
Anhang 2 Braun- und Schwarzwasseraufarbeitung	42
Anhang 3 Grauwasseraufarbeitung.....	43
Anhang 4 Anbieter verschiedener Grauwassersysteme	45
Anhang 5 Berechnung der Amortisationszeit.....	46
Anhang 6 Punkteverteilung der Stufe 2.....	47
Anhang 7 Punkteverteilung der Stufe 3.....	48
Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Semesterarbeit 1 im Departement Life Sciences und Facility Management.....	51

1 Einleitung

Bis zum Jahr 2050 werden von der UNO 10 Milliarden Menschen auf dem Globus prognostiziert (United Nation, 2019). Die zunehmende Konzentration der Bevölkerung auf Städte und der steigende Lebensstandard verursachen eine stetige Zunahme des Wasserbedarfs (Larsen et al., 2013). Hinzu kommen klimatische Veränderungen, wie ansteigende Temperaturen, veränderte Niederschlagsverteilungen und längerer Dürreperioden (Tolksdorf, 2018). Die weltweite Eutrophierung der Gewässer nimmt zu (Steffen et al., 2015) und die Abwasserproduktion in Städten erhöht sich (Bundesamt für Raumentwicklung, 2019). Immer eminenter wird daher Frage nach dem nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser.

Wasser ist weltweit vielerorts eine Mangelware, was bereits heute zu einer nicht tragbaren Ausnutzung der Vorräte führt (Paris & Schlapp, 2006; Feldman, 2017). Der grösste Anteil an Wasser auf der Erde ist Salzwasser, welches nur durch grossen energetischen und finanziellen Aufwand zu Trinkwasser verarbeitet werden kann. Nur gerade 0.025% des globalen Wasservorkommens ist sauberes, zugängliches Frischwasser (SVGW, 2018). Mehr als eine Billion Menschen – also jede siebte Person auf dem Planeten – hat keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser (Ainger & Fenner, 2016). Bevölkerungswachstum und Klimawandel erschweren es, den steigenden Wasserbedarf mit den verfügbaren und zugänglichen Wasservorräten zu decken (Gnehm, 2012). Probleme wie Wasserknappheit und Dürreperioden sind in wärmeren Regionen schon längst bekannt und werden zunehmend auch in der Schweiz, dem Wasserschloss Europas, erwartet (BAFU, 2018).

Der durchschnittliche Trinkwasserverbrauch der Schweiz liegt bei ca. 160 Liter Trinkwasser pro Tag und pro Person (SVGW, 2018). Auffallend ist, dass mit über 40 Litern pro Tag und Person die Toilettenspülung prozentual am meisten Trinkwasser verbraucht. Für Dusche, Bad und Toilette zusammen wird über 50% des kostbaren Trinkwassers in Privathaushalten verbraucht (SVGW, 2018).

Um den gegenwärtigen und zukünftigen Herausforderungen zu begegnen, braucht es im Umgang mit Abwasser innovative Lösungen. Herkömmliche Kläranlagen bieten nur eingeschränkte Möglichkeiten, das vorhandene Abwasser ressourceneffizient wiederzuverwerten und Ressourcenkreisläufe zu schliessen. Durch die Vermischung der verschiedenen Stoffströme und durch die Verdünnung des Abwassers mit Regenwasser und Industrieabwasser ist es viel aufwändiger Nährstoffe zurückzugewinnen. In diesem Zusammenhang gewinnen Neuartige Sanitäre Systeme (NASS) immer mehr an Bedeutung. Bereits seit vielen Jahren wird zu alternativen Abwasseraufbereitungsmethoden geforscht (Kumar Gupta et al., 2012; Egle et al., 2015; Horn & Wolfgang, 2009; DWA, 2015; Werner et al., 2009). Hierbei handelt es sich um nachhaltigere Lösungen, die es ermöglichen, Ressourcen zu schonen und Nährstoffe zurückzugewinnen. Grundlegendes Vorgehen der NASS ist es, durch die gezielte Erfassung und Behandlung von Teilstoffströmen (Regenwasser, Fäzes, Urin, Grauwasser) Energie-, Nährstoff- und Wasserkreisläufe zu schliessen.

Studien haben gezeigt, dass verschiedene Möglichkeiten bestehen, um Abwasser aufzubereiten und als Brauch- oder Trinkwasser zu verwenden. Primäre, einfachere Technologien wie Filtration, zentrifugale Separation (Polizzotti & Khwaja, 2012; Müller, 2000) und Flotation (Mels et al., 2001; Fuchs et al., 2003) sind schon länger erprobt. Sekundäre, beispielsweise aerobe und anaerobe Prozesse (Kujawa-Roeleveld & Zeeman, 2006; Van der Zee & Villaverde, 2005; Fuchs et al., 2003), sowie tertiäre Technologien, wie Destillierung (Naidu et al., 2017; Husnain et al., 2015), Elektrolyse (Chopra et al., 2011), Rückwärts-Osmose (Bartels et al., 2005), biologische Mikro- und Ultrafiltrationsmembrane (Busch & Marquardt, 2009; Pinto et al., 2017; Ahn & Song, 1999) und Ozonierung (Oneby et al., 2010; Martínez et al., 2011) sind komplexer. Nebst den einzelnen Technologien, die vereinzelt in konventionellen Kläranlagen verwendet werden, bestehen auch ganze Anlagen zur alternativen Abwasserreinigung und Stoffstromseparierung. Dazu gehören biologische Methoden wie Fäkal-Kompostierung (Dumontet et al., 1999), Wurmkompostierung (Taylor et al., 2003; Ghunmi et al., 2011), Constructed Wetlands (Wu et al., 2015; Vymazal, 2007&2010) und Hydropnikanlagen (Vaillant et al., 2003). Diverse Review-Studien zu den spezifischen Methoden der Grau-, Schwarz-, Gelbwasser- und Regenwasseraufbereitung sind erschienen (Novak et al., 2014; Ghunmi et al., 2011; Wilcox et al., 2016). Eine gute Übersicht über die verschiedenen Konzepte mit Praxisbeispielen findet sich auf der Webseite von Sustainable Sanitation Alliance (www.susana.org) oder im Compendium der Eawag, Dübendorf (Gensch Robert et al., 2018). Obwohl NASS oftmals schon dem Stand der Technik entsprechen, sind sie in der Schweiz noch nicht besonders weit verbreitet (Horn & Wolfgang, 2009; IWAR, 2018).

In der Praxis besteht aufgrund des grossen Angebotes an Technologien und Konzepten ein gesteigerter Bedarf an Unterstützung bei der Identifizierung des geeignetsten Systems für spezifische Anlagen. In den meisten Fällen ist die Datengrundlage zu komplex, um Entscheidungen auf wissenschaftlicher Grundlage treffen zu können. Aufgrund der nachgewiesenen Wichtigkeit von Entscheidungshilfen (Brunner & Starkl, 2004; Garrido-Baserba et al., 2014) wurden bereits Entscheidungstools zur Auswahl von Abwassersystemen entwickelt: Das sind meist technische Entscheidungshilfen (Corominas et al., 2013; Bixio et al., 2002), zum

Teil auch in Kombination mit sozialen, ökologischen und ökonomischen Komponenten (Chamberlain et al., 2014; Larsen et al., 2010; McConville et al., 2014; Lin et al., 2016). Kalbar et al. (2016) weisen darauf hin, dass bei der Entwicklung von Entscheidungshilfen nur in den wenigsten Fällen die Praxis miteinbezogen wird.

Basierend auf diesem identifizierten Potential, verfolgt diese Arbeit zwei Ziele: Einerseits soll eine Methodik zur Strukturierung verschiedener innovativer Systeme erarbeitet werden. Dazu gehört der Entwurf eines Kriterienkataloges. Dieser klassifiziert diverse Abwassersysteme und teilt sie nach ihrer Eignung für urbane Gebiete in der Schweiz ein. Der Kriterienkatalog soll zudem die beschriebenen Abwassersysteme vergleichen und somit Personen bei der Auswahl eines Systems unterstützen. Im Zentrum stehen dabei praxisorientierte, pragmatische Lösungsansätze, welche breite Anwendung finden. Andererseits verfolgt diese Arbeit das Ziel, die Ergebnisse in die Praxis umzusetzen. Dazu wird eng mit dem Architekturbüro VBAU zusammengearbeitet. Im Rahmen des aktuellen Projektes «FELZ ZWEI» in Zürich Altstetten werden anhand der erstellten Kriterienliste verschiedene Methoden zur Abwasseraufbereitung evaluiert. Dabei sollen für das Beispiel «FELZ ZWEI» drei Designkonzepte konzipiert und evaluiert werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen hervorgehend werden konkrete Empfehlungen formuliert.

2 Theorie

Im Folgenden wird beschrieben, wie sich das Abwasser zusammensetzt, welche Stoffströme entstehen und welche Systeme zu deren Reinigung und Trennung bereits existieren. Der Abschnitt erläutert zudem die wichtigsten Begriffe und hebt generelle Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Klärsystemen hervor.

2.1 Teilströme

Abwasser wird in fünf Teilströme gegliedert: Grauwasser, Schwarzwasser, Gelbwasser, Braunwasser und Regenwasser (Abbildung 1). Diese Ströme unterscheiden sich in ihrer Art, Kontaminationsgrad und Menge. Grauwasser ist der Teil des häuslichen Abwassers, der am wenigsten kontaminiert ist. Dieser Strom ist frei von Fäzes und Urin und grenzt sich somit vom Schwarzwasser ab. Grauwasser gliedert sich nochmals in leicht oder stark verschmutztes Grauwasser. Leicht verschmutztes Grauwasser stammt hauptsächlich aus der Dusche, dem Bad, dem Handwaschbecken und der Waschmaschine. Stark verschmutztes Wasser enthält zusätzlich Feststoffe von Essensresten, sowie Öl und eine durch Spülmittel bedingte hohe Phosphorkonzentration. Es stammt vorwiegend aus Abwasser von Küche und Waschmaschine. Schwarzwasser unterteilt sich in Gelb- und Braunwasser. Während sich Gelbwasser aus Urin und dessen Spülwasser zusammensetzt, bezeichnet Braunwasser die Fäzes. Ein Überblick über die verschiedenen Stoffströme zeigt Tabelle 1. Volumenmässig fällt das Braunwasser mit 50 Liter Fäzes pro Einwohner*in und Jahr am geringsten aus. Pro Jahr werden ca. 500 Liter Urin ausgeschieden. Weitaus grösser ist der Grauwasseranteil: In der Literatur variieren die Angaben zwischen 25000 und 100000 Litern pro Einwohner*in und Jahr (Boyjoo et al., 2013; Larsen et al., 2013; Staben, 2008).

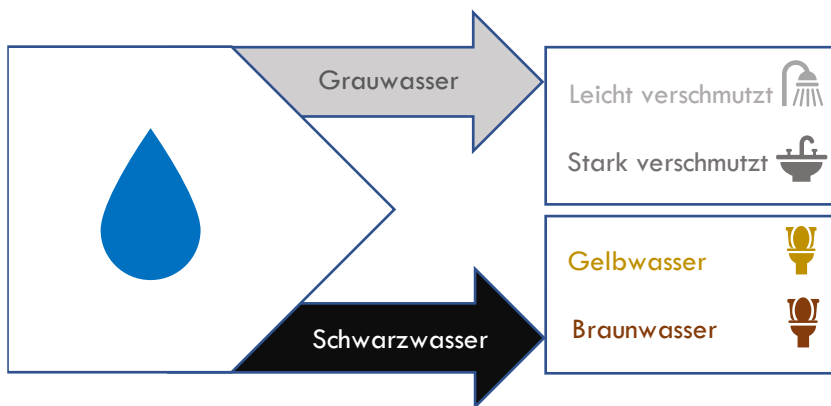


Abbildung 1: Unterteilung der verschiedenen Abwasserströme. Auf der Abbildung nicht dargestellt ist das Regenwasser. Eigene Darstellung nach Horn & Wolfgang (2009).

Das Prinzip der Stofftrennung besteht im Erfassen der einzelnen Teilströme. Durch eine strikte Trennung werden die Teilströme nicht vermischt, wodurch sich das Abwasser besser aufbereiten und Nährstoffe effizienter zurückgewinnen lassen. Bei Betrachtung der Nährstoffkreisläufe ist die Wiederverwertung von Phosphor und Nitrat aus dem Wasser von besonderer Relevanz. Rund 40'000 Tonnen Stickstoff und 6'400 Tonnen Phosphor fallen in der Schweiz pro Jahr an (Maurer et al., 2012). Die Hauptfracht stammt dabei zu ca. 70% aus Haushalt- und zu ca. 30% aus Industrieabwässern. Beide Nährstoffe spielen eine bedeutende Rolle für die Herstellung von Düngemittel für die Landwirtschaft. Greuling (2011) geht davon aus, dass in 100 Jahren die global bekannten Phosphorlagerstätte aufgebraucht sind. Die meisten Nährstoffe im Abwasser finden sich im Gelbwasser. Ca. 80% des Stickstoffes und 50% des Phosphors stammen aus dem Urin, wobei dieser zum Gesamtabwasservolumen nur ca. 1% beiträgt (Larsen & Lienert, 2007). Eine Urinseparierung bringt den Vorteil, dass Nährstoffe zum Beispiel als Dünger zurückgewonnen und landwirtschaftlich genutzt werden können. Dies verringert die Eutrophierung der Gewässer und erlaubt die Kläranlagen wieder kleiner zu konzipieren.

Das aufbereitete Grauwasser kann als Brauchwasser in Toilettenspülungen oder durch aufwändigere Verfahren sogar als Dusch- und Badewasser benutzt werden. Weitere Anwendungsbereiche sind Grünflächenbewässerung, Gebäudekühlung oder Fischzucht. Mit der Wärme des Grauwassers können Räume oder Tanks geheizt und Energiekosten verringert werden. Auch Braunwasser kann zur Energiegewinnung beitragen: Der organische Kohlenstoff kann mittels Pyrolyseverfahren zu Pellets verarbeitet oder in einem weiteren Schritt als Biogas verwendet werden (Kjerstadius et al., 2015).

Tabelle 1: Informationen zu Vorkommen, Eigenschaft und Verwertung der Teilströme. Eigene Darstellung nach Paris & Schlapp (2006).

Abwasserstrom	Vorkommen	Eigenschaft	Verwertung
Grauwasser	Teil des häuslichen Abwassers, der frei von Urin und Fäkalien ist. Es kann Abläufe von Badewanne und Dusche, Handwaschbecken und Küchenspülen, sowie Abwasser von Wasch- und Spülmaschinen enthalten.	Hohe Temperaturen führen zu erhöhtem Wachstum von Mikroorganismen. Kann pathogene Keime durch Händewaschen oder Windeln wechseln enthalten	Brauchwasser, Dusch- und Waschwasser
Schwach belastet	Duschen, Bäder und Handwaschbecken	Sehr gering kontaminiert	Brauchwasser, Dusch- und Waschwasser
Stark belastet	Spülbecken und Geschirrspülmaschine	Hohe Phosphorkonzentrationen von Spülmittel und Feststoffe von Essensresten	Brauchwasser, Dusch- und Waschwasser
Gelbwasser	Urin mit Spülwasser	Bei gesunden Menschen mehrheitlich steril	Rückgewinnung von Stickstoff, Phosphor und Kalium
Braunwasser	Fäzes (Kot) mit Spülwasser	Hohe bakterielle Kontamination	Aus organischem Kohlenstoff kann Biogas erzeugt werden
Schwarzwasser	Fäkalien (menschliche Ausscheidungen) mit Spülwasser	Hohe bakterielle Kontamination	Rückgewinnung von Stickstoff, Phosphor und Kalium

2.2 Abwassersysteme

Im folgenden Abschnitt werden herkömmliche Kläranlagen und Neuartige Sanitäre Systeme, wie sie in Teilen Zentraleuropas und Amerika vorkommen, verglichen. Es soll hier nur ein grober Überblick gegeben und die unterschiedlichen Systeme generalisiert beschrieben werden. Einen Überblick über die detaillierte Funktion von Kläranlagen in der Schweiz gibt der Ratgeber «Abwassertechnik und Kläranlagen» von Runge (2019).

2.2.1 Herkömmliche Kläranlagen

In der Schweiz sind 97.3% der Haushalte an das kommunale Abwassernetzwerk angeschlossen (BFS, 2020). Insgesamt reinigen 4000 Kläranlagen ca. 1400 Milliarden m³ schweizerisches Abwasser. Dies wird hauptsächlich in Mischkanalisationen geführt (Maurer et al., 2012). Das Schwarzwasser der Toiletten wird in konventionellen Schwemmkanalisationen erfasst und in eine zentrale Kläranlage gebracht. Durch Grau- und Regenwasser wird das Schwarzwasser verdünnt, bevor die eigentliche Behandlung stattfindet. Dieses zentrale System hat die ursprünglichen Ziele weitgehend erreicht: Der Hygienezustand ist stark verbessert, die Eutrophierung gebremst und der Wasserstand verringert. Doch trotz der hohen Qualität des gereinigten Abwassers werden auch systemische Mängel beschrieben (Maurer et al., 2012). Probleme entstehen beispielsweise bei sehr grossen Regenfällen, wenn die Kanalisation überlastet ist und das Abwasser durch einen Überlauf in die Seen und Flüsse gelangt. Die Einleitung von Nähr- und Schadstoffen kann zu einer Gefährdung der Wasserlebewesen führen. Zusätzlich verhindert die Mischkanalisation eine gezielte Rückgewinnung von Nährstoffen, weil Phosphor und Nitrat in der Verbrennung des Klärschlammes verloren gehen (Staben, 2008). Auch Mikroverunreinigungen stellen die Abwasserentsorgung bereits heute vor grosse Herausforderungen. Zugleich werden neue Probleme, wie die Entfernung von Mikroverunreinigungen oder ein ressourceneffizienteres Vorgehen, immer wichtiger. Diese steigende Vielfalt an Stoffen, die bereits in kleinsten Konzentrationen eine grosse Wirkung erzeugen, verlangen neue Reinigungsstrategien (Maurer et al., 2012). Herkömmliche Kläranlagen kommen also zunehmend an ihre technischen Grenzen, was unter anderem auch mit dem steigenden Bevölkerungswachstum und der stetigen Urbanisierung zusammenhängt. Ihre mangelnde Flexibilität und hohe Investitions- und Betriebskosten verhindern die Adaption an diese geänderten Anforderungen und Rahmenbedingungen. Maurer et al. (2012) gehen davon aus, dass folglich die Ausgaben und Gebühren in vielen Gemeinden substantiell steigen werden.

2.2.2 Neuartige Sanitäre Systeme (NASS)

Die oben beschriebenen Herausforderungen wie Mikroverunreinigung, demographischer Wandel und angestrebte Ressourceneffizienz erfordern eine Auseinandersetzung mit flexibleren Wasserinfrastrukturen in Form von integrierten Systemlösungen. Neu dabei ist nicht die einzelne Technologie als solches, sondern die Konfiguration der einzelnen Technologien zu neuen Systemvarianten (Trapp & Libbe, 2016).

Grundgedanke der Neuartigen Sanitären Systeme ist die Kreislaufführung. Der grösste Unterschied zu den herkömmlichen Kläranlagen ist dabei die getrennte Erfassung und gezielte Behandlung von Teilströmen (Urin, Fäzes, Grauwasser, Regenwasser) aus Wohngebäuden (Horn & Wolfgang, 2009). Durch die Differenzierung von Stoffströmen werden neue Schnittstellen zwischen Wasserversorgung, Abwasserbehandlung und der Energieversorgung erreicht (Trapp & Libbe, 2016). So wird eine effiziente Wiederverwendung des Wassers angestrebt, Nährstoffe zurückgewonnen und durch Biogas oder Abwärme Energie erzeugt. Gegenüber tradierten Infrastruktursystemen sind NASS de- oder semizentral dimensioniert und bieten flexible Grössenskalierungen an (DWA, 2015).

NASS können in verschiedene Konzeptformen eingeteilt werden. Ein Kriterium zur Einteilung ist die Anzahl der getrennten Stoffströme und die Verwendung von Trockentoiletten oder Spültoiletten. Im weiterbildenden Studium Wasser und Umwelt von der Bauhaus Universität Weimar (DWA, 2015) werden sechs verschiedene Systeme beschrieben, welche nach ihren Stoffströmen unterteilt werden: System 1 ist das herkömmliche Abwassersystem, bei dem keine Stofftrennung stattfindet. System 2-4 teilt die Stoffströme in zwei oder drei verschiedene Teilströme auf. System 5 und System 6 brauchen Trockentoiletten, da Fäkalien ohne Wasserströme gesammelt werden. Eine Übersicht über die verschiedenen Systeme ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Überblick über die verschiedenen NASS im Vergleich zu dem herkömmlichen Abwassersystem (System 1). Eigene Darstellung nach DWA (2015).

System	Teilströme	Ziel der Behandlung	Produkte	Vorteile	Nachteile
System 1 Schmutzwasser	Keine Stofftrennung	Reinigung des Abwassers	Behandeltes Abwasser	Einfache Handhabung	Keine Rückgewinnung von Nährstoffen
System 2 2-Stoffstromsystem	Grauwasser Schwarzwasser	Abbau von Kohlenstoffverbindungen, Nährstoffgewinnung und Stabilisierung	Behandeltes Abwasser, organisch-mineralische Pflanzennährstoffe und evtl. Biogas.	Flexible Einsatzmöglichkeiten, tiefere Betriebskosten. Möglichkeit zur dezentralen Energieversorgung	Investitionskosten für doppelte Leitung
System 3 2-Stoffstromsystem	Gelbwasser Braunwasser mit Spülwasser und Grauwasser	Abbau von Kohlenstoffverbindungen, Hygienisierung, Phasentrennung, P- Eliminierung und Stabilisierung, Nährstoffgewinnung	Behandeltes Abwasser, Organisch-mineralischer Pflanzennährstoff und evtl. Biogas	Hohes Nährstoffrückgewinnungspotential	Säuberung von Urin kann Energie erfordern
System 4 3-Stoffstromsystem	Braunwasser Grauwasser Gelbwasser	Abbau von Kohlenstoffverbindungen, Hygienisierung, Phasentrennung, P- Eliminierung und Stabilisierung, Nährstoffgewinnung	Behandeltes Abwasser, mineralisch organischer Pflanzennährstoff und evtl. Biogas	Verbesserte hygienische Qualität der Stoffströme erreichbar	Vielstufige Behandlung, Material und Leitungskosten
System 5 2-Stoffstromsystem (Trockentoilette)	Fäkalien ohne Wasserspülung Grauwasser	Abbau von Kohlenstoffverbindung, Hygienisierung, Stabilisierung	Behandeltes Abwasser, mineralisch organischer Pflanzennährstoff und evtl. Biogas	Geringer Trinkwasserverbrauch, Kreislauf durch Kompostierung	Geruchs- und Betriebsprobleme in der Praxis, mangelnde Nutzerakzeptanz, hoher Platzbedarf
System 6 3-Stoffstromsystem (Trockentoilette)	Fäzes ohne Wasserspülung Grauwasser Gelbwasser	Abbau von Kohlenstoffverbindung, Hygienisierung, Stabilisierung	Behandeltes Abwasser, mineralisch organischer Pflanzennährstoff und evtl. Biogas	Phosphor und Nitrat können in Form von behandeltem Urin und Fäzes als Flüssigdünger zurückgeführt werden, minimaler Trinkwasserverbrauch	Betriebsprobleme in der Praxis, mangelnde Nutzungsakzeptanz, hoher Platzbedarf

3 Material und Methoden

Im folgenden Kapitel wird im ersten Teil das Vorgehen der Sekundäranalyse beschrieben und Erläuterungen zum Praxisbezug gemacht. In einem zweiten Teil wird auf die Entwicklung der Kriterienliste eingegangen. Am Schluss wird das dreistufige methodische Verfahren erläutert und die Kriterien jeder Stufe vorgestellt.

3.1 Recherche

Die Ergebnisse dieser Arbeit beruhen auf einer Sekundäranalyse. Um einen Überblick über die verfasste Literatur zu erhalten, wurde eine Vorortrecherche in der Baubibliothek ETH, sowie der Lib4ri an der Eawag gemacht. Zur Recherche dienten die Suchportale GREENFile, Google Scholar und das Rechercheportal. Weitere Literatur wurde in den Quellenverzeichnissen der bereits gelesenen Studien gefunden. Studien und theoretische Hintergründe sind durch folgende Schlagwörter erörtert worden: Grauwasser, Greywater reuse, Sewage treatment, Gelbwasser, Schwarzwasser, Trennströme, Abwassertrennung, Blackwater, Neuartige Sanitäre Systeme, Dezentrale Abwasseraufarbeitung, Semizentrale Abwasseraufarbeitung, NASS, Stoffströme, Behandlung von Schmutzwasser, Stoffliche Nutzung, Nachhaltiges Bauen, Sustainable water, Ecological sewage treatment, Urbane Kreisläufe, Urban water management, Green buildings, Water efficiency in buildings, Siedlungswasserwirtschaft, Sustainable buildings, Regenwassernutzung, Rainwater reuse, Alternative Abwassersysteme, Decentralized Sanitation and Reuse, Ecological Sanitation, Innovative Sanitärkonzepte, Waste Design, Brauchwasser, Wastewater und Trennsysteme.

Literatur wurde ab dem Zeitraum nach 1980 berücksichtigt, die meisten der verwendeten Publikationen sind aber in den letzten 15 Jahren erschienen. Es gab keine geografischen Einschränkungen, jedoch galt die Aufmerksamkeit besonders europäischen Systemen. Die meisten Studien sind in englischer Sprache verfasst. Einige Lehrbücher sind in deutscher Sprache erhältlich.

Um die Literaturrecherche mit der Praxis abzugleichen, wurde eine bereits bestehende Anlage besichtigt. Diese ist lokalisiert an der Eawag in Dübendorf. Das Aufbereitungssystem befindet sich im modularen Forschungsgebäude NEST der Empa und Eawag. Durch spezielle Toiletten werden die Teilströme getrennt und Dünger, sauberes Wasser und Energie rückgewonnen (Eawag, 2020). Erläuterungen zur Anlage sowie Tipps zur konkreten Umsetzung wurden von Angelika Hess, Mitarbeiterin in der Forschungsgruppe *Verfahrenstechnik*, gegeben. Zusätzlich wurde zusammen mit den Architekten von VBAU eine Vorort Besichtigung durchgeführt und Kriterien für einen aktuellen Umbau in Zürich zusammengetragen. Viele dieser Kriterien sind in der Vision von VBAU beschrieben (VBAU, 2020). Für detaillierte Informationen zu den einzelnen Konzepten wurden die Firmen Alchemia-Nova, Creabeton und Picatech Huber AG kontaktiert.

3.2 Kriterienentwicklung



Abbildung 2: "FELZ ZWEI" befindet sich an der Girhaldenstrasse 20 in 8048 Zürich.
Quelle: www.vbau.com.

In den letzten Jahrzehnten ist das Interesse an NASS stark gestiegen und eine grosse Anzahl an neuen Konzepten sind auf dem Markt erschienen. Allein bei der Suche nach «greywater treatment system» werden in Google Scholar 26900 Ergebnisse angezeigt. Die grosse Anzahl an Konzepten der alternativen Abwasseraufbereitung wird anhand einer Kriterienliste eingegrenzt. Die Entscheidungsanalyse ist ein iterativer Prozess, der verschiedenen Stufen durchlaufen kann (Clemen et al., 2001). Das methodische Vorgehen gliedert sich hier in Anlehnung an Keeney (1982) in drei Stufen. In der 1. Stufe werden Kriterien definiert, welche für die Umsetzung in der Schweiz notwendig sind.

Systeme, welche diese Anforderungen nicht erfüllen, werden für die weiteren Schritte nicht berücksichtigt. Diese Kriterien finden sich in Tabelle 3. In der Stufe 2 werden weiche Kriterien aufgelistet, die je nach Kontext stärker oder weniger stark gewichtet werden können. In der letzten Stufe werden spezifisch Kriterien für VBAU, die repräsentativ für nachhaltiges Bauen in der Stadt stehen, aufgelistet (Stufe 3). Kriterien sind zusammengestellt aus den Metareview verschiedener Studien von Larsen et al. (2007), sowie Kriterien von VBAU (VBAU, 2020) und diversen anderen Studien, die sich mit Entscheidungstools in der Abwasserthematik auseinandersetzen (Salgot et al., 2018; Horn & Wolfgang, 2009; Clemen et al., 2001; Larsen et al., 2010).

Um die Arbeit im angemessenen Rahmen zu halten, wird zusammen mit dem Architekturbüro VBAU eine Vorselektion getroffen. Es werden nicht alle möglichen Konzepte in den drei Stufen evaluiert, sondern nur Konzepte, die interessant für das Architekturbüro VBAU sind. Die Konzepte werden im Gespräch auf der Grundlage von einer erstellten Konzeptliste ausgewählt (Siehe Anhang 1, 2, 3, 4).

3.2.1 Stufe 1: Harte Kriterien

Ziel der Arbeit ist es, einfache, nachhaltige Konzepte für eine breite Nutzung zu finden, deren Umsetzung in urbanen Gebieten der Schweiz, rechtlich möglich ist. Es sollen zusätzlich nur Konzepte berücksichtigt werden, die ein hohes Technology Readiness Levels (TRL) haben und bereit sind für eine schnelle Hochskalierung und Implementierung (McConville et al., 2014). Aus diesen Rahmenbedingungen resultieren folgende ausschliessende Kriterien:

- In urbanen Gebieten ist der Raum begrenzt und Systeme, welche viel Platz einnehmen, sind nicht erwünscht.
- Die Hygienevorschriften müssen eingehalten werden können und rechtliche Grundlagen erfüllt sein.
- Das TRL muss soweit fortgeschritten sein, dass ein Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich bereits vorhanden ist.

Für eine Gewährleistung der Nutzungssicherheit müssen Hygienemassnahmen eingehalten werden. In der Schweiz liegen keine konkreten Richtlinien zur Anforderung an recyceltes Grauwasser oder zur Nutzung von Brauchwasser vor. Da sich viele europäische Studien auf die Badegewässerrichtlinie der EU (Li et al., 2009; Larsen et al., 2013; Pradhan et al., 2019b) beziehen, wird erstens die EU-Badegewässerrichtlinie (EC, 2006) verwendet. Zweitens dient als Orientierung die Kriterien des Deutschen Institut für Normierung DIN 19650 (DIN, 1999) der Richtlinie für Bewässerung von Freiland und Gewächshauskulturen für Rohverzehr. Untersucht werden hier die folgenden Parameter; Chemische Sauerstoffbedarf (CSB) für die Summe aller im Wasser vorhandenen, oxidierbaren Stoffe und BSB_{5/7} für die in fünf oder sieben Tagen biologisch oxidierbaren Stoffe. Zusätzlich wird der pH-Wert, die Anzahl an koliformen Bakterien, Fäkalkoliforme Bakterien, Enterokokken und Escherichia coli (*E.coli*) ermittelt. Der Richtwert des pH-Wertes wurde von der U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) übernommen (USEPA, 2004). Der typische Flächenbedarf konventioneller Behandlungstechnologien liegt im Bereich von 0.2-0.5 m² pro Person (Metcalf & Eddy, 2014). Da aber kleinskalierte Anlagen typischerweise mehr Platz brauchen, wird hier mit einem Grenzwert von 1 m² pro Person gerechnet.

Um für die Praxis geeignet zu sein, muss ein Konzept ein bestimmtes Technology Readiness Level (TRL) erreichen. Die ursprüngliche Einteilung des TRL stammt von der NASA und verfügt über 9 Stufen (NASA, 1988). TRL 8 bedeutet, dass das Konzept qualifiziert ist, d.h. dessen Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich nachgewiesen wurde. Alles was über der Stufe 8 ist, gilt daher als erfüllt¹. In der Stufe 1 werden die Verfahren nur in «erfüllt» oder «nicht erfüllt» eingeteilt. Nur wenn alle Kriterien erfüllt sind, kommt das Verfahren in die 2. Stufe. In Tabelle 3 sind die Kriterien und deren Operationalisierung aufgelistet.

Tabelle 3: Die Stufe 1 beschreibt die notwendigen Kriterien für eine Durchführung in urbanen Gebieten der Schweiz.

Kriterien	Operationalisierung	Skala	Quelle
Hygiene	Parameter der EU Badegewässerrichtlinie, der DIN 19650 für Bewässerung und der USEPA werden übernommen. Sind die Werte für CSB, pH, koliforme Bakterien, Fäkalkoliforme Bakterien, Enterokokken und E.coli unter dem vorgeschriebenen Grenzwert, gilt das Kriterium als erfüllt.	Erfüllt Nicht erfüllt	(EG, 2006 ; USEPA 2004 ; DIN,1999)
Platzbedarf	Platz pro Person >1 m ² <1 m ²	Erfüllt Nicht erfüllt	(Metcalf & Eddy, 2014)
TRL	TRL 8 (Qualifiziertes Konzept mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich) ist erreicht, wenn der Kenntnisstand 5/5, wie skizziert bei DWA (2015), erreicht oder mehr als 10 Studien gefunden wurden.	Erfüllt Nicht erfüllt	(NASA, 1988) (DWA, 2015)

¹ Da es keine eindeutigen Daten zu dem Kriterium Technology Readiness Level (TRL) gibt, wird das Level durch verschiedene Quellen abgeschätzt. Eine Quelle ist die Einteilung des Kenntnisstandes verschiedener Verfahren im Werk von DWA (2015). Zusätzlich dient auch die Anzahl gefundener Studien und Telefonate mit Expert*innen zur Abschätzung des TRL.

3.2.2 Stufe 2: Weiche Kriterien

Stufe 2 beinhaltet weiche Kriterien. Ein System muss bei diesen nicht überall den höchsten Wert erzielen, um für die Umsetzung geeignet zu sein (Tabelle 4). Die Gewichtung dieser Kriterien kann je nach Setting variieren. Für die Einteilung wird eine dreistufige Ordinalskala verwendet. Um die Skala auszuwerten, werden Zahlenwerte vergeben. «Hoch» wird mit drei Punkten bewertet, «Mittel» mit zwei und «Gering» mit einem Punkt. Bei invers gestellten Fragen verläuft die Punktezuerteilung in umgekehrter Richtung. Das System, welches summativ über die ganze Stufe den höchsten Wert erzielt hat, schneidet am besten ab. Die Berechnungsmethode ist in Formel 1 dargestellt:

Formel 1: Berechnung der totalen Punktzahl.

$$\sum_{i=1}^n i = \text{Totale Punktzahl}$$

Bei der Operationalisierung stehen vermehrt qualitative Einteilungen im Vordergrund. Die sozialen und technischen Kriterien können mit Aussagen aus der Literatur belegt werden und durch Hilfe von Gesprächen mit Expert*innen nach eigenem Ermessen eingeteilt werden. Angaben zur Ressourceneinsparung und -verbrauch werden aus Studien entnommen (DWA 2015; Jeltsch, 2014; Paris & Schlapp, 2006; Zou et al., 2012). Die initialen Kosten werden im Verhältnis der gesamten Kosten der Sanitäranlagen gesetzt, wie in Formel 2 eingefangen. Laufende Kosten werden mit den Unterhaltskosten verglichen und danach wird der prozentuale Anteil der Grauwasseranlage an den gesamten Unterhaltskosten berechnet (Formel 3). Unter Amortisation wird der Zeitraum verstanden, der für die Deckung der aufgewendeten Anschaffungskosten aus dem damit erwirtschafteten Ertrag beglichen werden kann. Die Amortisationszeit rechnet sich wie in Formel 4 beschrieben.

Tabelle 4: Operationalisierung der zweiten Stufe.

Bereich	Kriterien	Beschreibung	Skala	Operationalisierung
Sozial	Akzeptanz	Akzeptanz der Benutzer*innen	Hoch Mittel Gering	>75% >50-75% >65%
	Mehraufwand	Mehraufwand der Bewohner*innen gemessen am zeitlichen Aufwand	Gering Mittel Hoch	1x jährlich 1x monatlich 1x wöchentlich
Technisch	Schadenshäufigkeit	Robustheit des Systems	Hoch Mittel Gering	
	Sicherheit	Gefährdung von Mensch, Tier und Umwelt durch eine technische Störung	Hoch Mittel Gering	Stark gefährdet Gefährdet Nicht gefährdet
	Multifunktionalität	Die Variante erbringt zusätzlich zur Grauwasserreinigung weitere Ökosystemleistungen	Hoch Mittel Gering	Mehr als eine Leistung Eine weitere Leistung Keine weitere Leistung
Ressourceneinsparung Umwelteinfluss	N	Abbaurrate von Nitrat	Hoch Mittel Gering	>90% 70-90% <70%
	P	Abbaurrate von Phosphor	Hoch Mittel Gering	>90% 70-90% <70%

	Wasser	Einsparung von Trinkwasser	Hoch Mittel Gering	>40% 10-40% <10%
Ressourcenverbrauch	Energie	Zusätzliche Energie für den Betrieb	Gering Mittel Hoch	<2 kWh 2-3 kWh >3 kWh
Wirtschaftlichkeit	Initiale Kosten (Formel 2)	$= \frac{SK}{IK} * 100$	Hoch Mittel Gering	>15% 5-15% <5%
	Laufende Kosten (Formel 3)	$= \frac{UK}{LK} * 100$	Hoch Mittel Tief	>15% 5-15% <5%
	Amortisation (Formel 4)	$= \frac{IK + LK + EK + DLK}{TE + AE}$	Hoch Mittel Gering	<10 Jahre 10-20 Jahre > 20 Jahre

SK = Sanitärkosten
IK = Investitionskosten
LK = Laufende Kosten

DKL = Doppelte Leitungskosten
TE = Trinkwassereinsparung
AE = Abwassereinsparung

3.2.3 Stufe 3: Projektspezifische Kriterien

Bei dieser Stufe handelt es sich speziell um Kriterien die auf das Projekt «FELZ ZWEI» zugeschnitten sind. Auf einer Gebäudefläche von 593m² sollen 16 Einzimmerwohnungen, sogenannte «Mikrowohnungen» und eine Attikawohnung gebaut werden. Dieser beschränkte Platzbedarf ist repräsentativ für eine urbane Wasseraufbereitung und soll in die Kriterien einfließen. VBAU setzt auf innovatives Bauen mit breiter Anwendung, weshalb besonders auch soziale Kriterien hervorgehoben werden. Zusätzlich sollen aber auch Kriterien wie Effizienz und Resilienz, Biodiversität und Dezentralisierung untersucht werden. Die Kriterien wurden zusammen mit VBAU entwickelt, damit sie ideal auf das Projekt zugeschnitten sind. Die Einteilung erfolgt über eine Nominalskala. Das Kriterium kann entweder mit «Ja» oder «Nein» bewertet werden. Diese Analyse ist qualitativer Art und wird der Beschreibung der Anlagen entnommen. Es erfolgt keine effektive Bemessung. Antworten, die mit «Ja» bewertet werden, erhalten den Wert 1, Antworten mit «Nein» erhalten den Wert 0. Die Punkte der 3. Stufe werden summiert. Das Konzept mit der höchsten Punktezahl schneidet am besten ab. Tabelle 5 zeigt eine Auswahl der Kriterien von VBAU.

Tabelle 5: Kriterien der Stufe 3. Nach den Leitlinien von VBAU.

Bereich	Kriterien	Operationalisierung
Effizienz	Werden nachwachsende Rohstoffe verwendet?	Ja / Nein
	Wird der Materialverbrauch reduziert?	Ja / Nein
	Werden Elemente mehrfach genutzt?	Ja / Nein
Dezentralisierung	Können lokale Materialien und Produkte verwendet werden?	Ja / Nein
	Wird die Selbstversorgung gefördert?	Ja / Nein
Biodiversität	Wird eine naturnahe Umgebungsgestaltung erschaffen?	Ja / Nein
	Wird Biodiversität geschaffen?	Ja / Nein
Resilienz	Werden flexible Low-Tech Technologien verwendet?	Ja /Nein
	Sind die Systeme autonom?	Ja /Nein
Akzeptanz der Bevölkerung	Können Komforteinbussen verhindert werden?	Ja /Nein
	Kann ein Zielpublikum ohne ökologische Ansprüche integriert werden?	Ja /Nein

4 Resultate

Im folgenden Kapitel werden drei Konzepte vorgestellt und anhand der beschriebenen Kriterien auf ihre Funktionalität und Realisierbarkeit evaluiert. Bevor die Konzepte in der Stufe 1 bewertet wurden, hat bereits eine Vorselektion verschiedener NASS stattgefunden. Aus einer Liste mit den unterschiedlichsten Systemen (Siehe Anhang 1, 2, 3, 4) entstand im Gespräch mit dem Architekturbüro VBAU eine engere Auswahl von drei Konzepten. Die drei Konzepte wurden ausgewählt aufgrund der Interessen des Architekturbüros. Im Gespräch wurde gegen ein Konzept mit Gelb- oder Schwarzwasser entschieden, da Hygienesicherheiten vor allem bei Schwarzwasser noch schwieriger einzuhalten sind als beim Grauwasser. Zusätzlich gestaltet sich die Reinigung komplizierter und aufwändiger. Für ein Mehrfamilienhaus wird sich so ein Reinigungsverfahren daher kostentechnisch wenig rentieren. Der Vorteil von Grauwasser ist vor allem die Schonung von Grundwasserressourcen, die Entlastung der Infrastrukturen und Gewässer und der Wegfall von Chemikalien. Zudem können ohne grossen Aufwand Wasser, Energie und Kosten gespart werden (Fbr, 2014). Im Folgenden werden diese drei Konzepte beschrieben und anhand des Kriterienkataloges eingestuft und evaluiert.

4.1 Konzepte

Die drei Konzepte sind sehr unterschiedlich und decken eine Grosszahl von biologischen und biomechanischen Technologien ab. Beschrieben wird das Konzept 1 als Standardlösung zur Grauwasser und Regenwassertrennung. Konzept 2 ist komplexer und weniger erprobt in der Schweiz. Auch hier wird nur auf Grauwasser fokussiert, jedoch in Form einer Fassaden- oder Sockelbegrünung. Konzept 3 beschreibt die Reinigung mittels einer aquaponischen Anlage und die damit verbundene Nahrungsproduktion. Alle drei Konzepte können nur umgesetzt werden, wenn eine separate Grauwasserleitung geführt wird. Dies kann bei einem Neubau von Anfang an geplant werden und gestaltet sich bei einem bestehenden Bau aufwändiger. Für bestehende Bauten bietet die Firma Evasens spezielle Rohre an, welche in die vorhandenen Rohre integriert werden können und somit die Teilströme getrennt erfasst (Veser & Londong, 2017). Bei einem Neubau kann hier auch abgeklärt werden, welche Entwässerungssysteme am sinnvollsten erscheinen. In der Literatur werden vor allem Schwerkraft-, Unterdruck-, und Druckentwässerung oder leitungsfreie Systeme mit Sammeltank empfohlen (DWL, 2015). Hier muss zusätzlich überlegt werden, ob die Leitungssysteme ausserhalb oder innerhalb des Gebäudes geführt werden. Diese drei Konzepte benötigen keine Trenn- oder Trockentoiletten, da nur das Grauwasser wiederaufbereitet wird. Trotzdem macht es aber Sinn sich die Anschaffung einer wassersparenden Vakuumtoilette oder einer wasserfreien Toilette zu überdenken. Da in den Konzepten einzelne Behandlungsstufen (wie Filter, Fettfang, Sedimentation, Ausgleichsbecken etc.) variieren können und in der Literatur unterschiedliche Vor- und Nachbehandlungsstufen (UV, Ozonierung, Chlorinierung) wie auch Ausführungen (vertikaler oder horizontaler Durchlauf) existieren, wird in den Ausführungen jeweils auf einen Prototyp beschränkt. Die sanitären Einrichtungen sind in allen drei Konzepten gleich zu gestalten, es ändert sich lediglich die Grauwassertechnologie. An dieser Stelle wird kurz auf jedes Konzept eingegangen und die wichtigsten technischen Details erläutert.

4.1.1 Konzept 1

Verschiedene Firmen bieten für eine effiziente Grauwasseraufarbeitung einfache, kompakte Lösungen an (Hansgrohe, Picotech Huber AG, Dehoust GmbH, Geo Terra). Diese können als Gesamtpaket von den entsprechenden Firmen erworben werden. In der Praxis sind vor allem zwei etablierte Verfahren zu unterscheiden: Als erstes wird das Belebtschlammverfahren (SBR resp. Sequence Batch Reactor) beschrieben. Das zweite Verfahren reinigt das Wasser mit einem Membranbiofilter (MBR resp. Membranebioreactor) im Makro- bis Nanobereich (DWA, 2015).

4.1.1.1 Konzept 1a: Sequencing Batch Reactor (SBR)

Dieses Konzept setzt auf die aerobe biologische Behandlung durch suspendierte Biomasse. Meist erfolgt die Abwasserreinigung zeitlich getrennt in Form eines SBR-Verfahrens. In einem ersten Schritt wird das Grauwasser von Dusche, Bad und Spülbecken durch einen Filter von groben Partikeln bereinigt. Danach gelangt es in die erste und zweite Stufe der biologischen Aufbereitung. Die im Wasser vorhandenen aeroben Mikroorganismen bauen unter Zufuhr von Sauerstoff die Schmutzbestandteile im Abwasser ab. In einer letzten Stufe wird das Abwasser mittels UV-Lampen behandelt. Durch diese Desinfizierung wird das Wasser keimfrei und im Betriebswasserbehälter bis zur Wiederverwendung gelagert. Während der biologischen Aufbereitung anfallenden Sedimente werden automatisch abgesaugt und in die Kanalisation geleitet. Um eine zuverlässige Versorgung zu gewährleisten, ist das richtige Mass an Wasser relevant: ist zu viel Wasser vorhanden, kann ein Notüberlauf Abhilfe schaffen, falls zu wenig Betriebswasser vorhanden ist, kommt ein Trink- oder Regenwasseranschluss ins Spiel (DWA, 2015) (Abbildung 3).

Dieses Verfahren lässt sich zusätzlich mit einer Wärmerückgewinnungsanlage und einer Regenwasseranlage kombinieren. Durch eine Wärmerückgewinnungsanlage, wie sie bei der Firma Picatech Huber zu finden ist, wird Energie aus dem Abwasser zurückgewonnen (Picatech Huber AG, 2020). Das Grauwasser aus der Dusche, der Geschirrspülmaschine oder Waschmaschine gelangt relativ warm in den Abfluss. Da Betriebswasser für die Bewässerung oder für die Toilettenspülung keine hohe Temperatur haben muss, kann dem gereinigten Schmutzwasser Wärme entzogen werden und beispielsweise zur Belüftung des Belebtschlammverfahrens wiederverwendet werden.

Die Firma Hansgrohe bietet mit ihrem Pontos Aquacycle das beschriebene Verfahren an. Umgesetzt wurde es schon in diversen Studentenwohnungen in Mainz, Hannover, Tübingen und Freiberg, sowie auch in Mehrfamilienhäuser z.B. in Filderstadt und Hotels (DWA, 2015). Nach Kontaktaufnahme mit dem Anbieter wurde bekannt, dass noch kein System in der Schweiz geplant wurde.

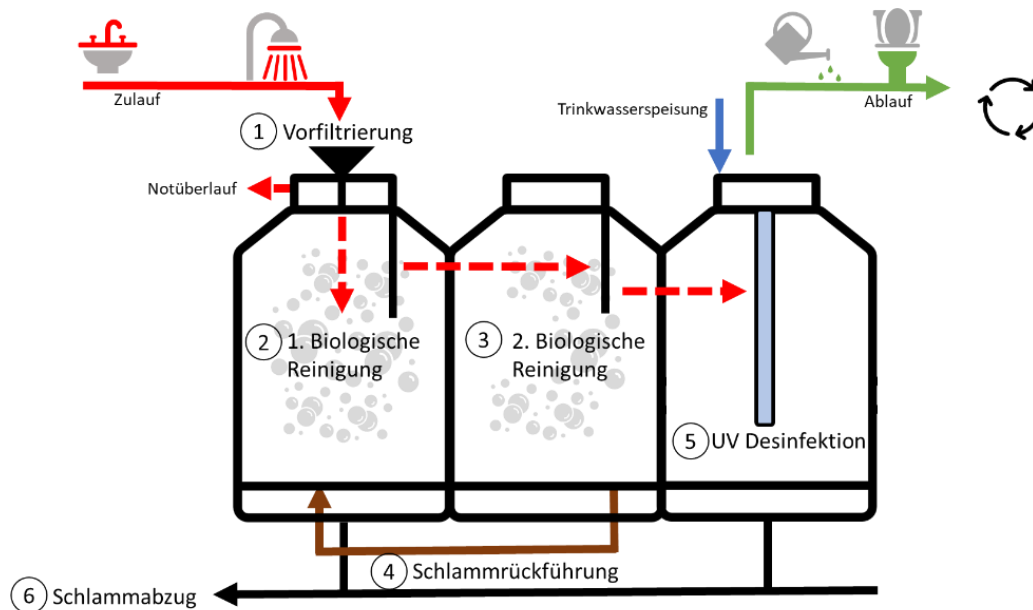


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung eines Sequencing Batch Reactor. Rote Linien stellen das Abwasser dar, Grüne Linien das gereinigte Brauchwasser und Braune Linien die Schlammrückführung. Eigene Darstellung nach DWA (2015) s.116.

4.1.1.2 Konzept 1b: Membranbioverfahren (MBR)

Als zweites Verfahren wird in der Praxis häufig das Membranbioverfahren verwendet. Es besteht aus einer Kombination vom Belebtschlammverfahren mit einer Membranfiltration (Abdel-Shafy et al., 2015). Hochwertiges Brauchwasser wird so aus Grauwasser zurückgewonnen. Auch hier erfolgt die Reinigung durch eine aerobe biologische Behandlung. Im Gegensatz zum SBR-Verfahren wird die suspendierende Biomasse hier aber durch einen Membranbioreaktor gepumpt und filtriert. Die Biomembran wird so automatisch mit den Bakterien geimpft. Häufig werden entweder Mikro- (38nm) oder Ultramembrane (>38nm) verwendet, welche das Abwasser von Bakterien (Mikromembran) und Viren (Ultramembran) reinigen. Durch eine Belüftung wird das aerobe Bakterienwachstum erleichtert und die Verstopfungsgefahr der Membranbioanlage minimiert. Durch eine verbesserte Abtrennung der Biomasse werden auch Keime zurückgehalten, die in Schlammflocken angelagert sind (Pinto et al., 2017).

In Abbildung 4: Vereinfachter Membranbioreaktor für die Reinigung von Grauwasser. Rote Linien stellen das Abwasser dar, Grüne Linien das gereinigte Brauchwasser und Braune Linien den Überschussschlamm. Eigene Darstellung nach DWA (2015) s.120. ist der vereinfachte Prozess visualisiert. Ungelöste Wasserinhaltsstoffe werden zuerst mithilfe eines Grobfilters entfernt. Biologisch abbaubare Wasserinhaltsstoffe werden in dem Belebungsbecken durch Mikroorganismen abgebaut. Durch einen leichten Unterdruck wird das Wasser sanft durch eine Filtermembran abgezogen. Die physikalische Barriere des Filters garantiert eine sichere Abtrennung von Partikeln, Schlamm, Keimen und adsorbierten Viren aus dem Grauwasser. Aufgrund des niedrigen Nährstoffgehalts (biologische Reinigung) und der kaum nachweisbaren Restbiomasse (Ultrafiltration) ist das Abwasser langfristig speicherfähig und wiederverwendbar. Sollte im Speicherbehälter zeitweise kein aufbereitetes Betriebswasser verfügbar sein, wird bedarfsgerecht Trinkwasser oder Regenwasser nachgespeist. Das Wasser ist geeignet zur Toilettenspülung, für häusliche Reinigungszwecke, zur Gartenbewässerung und zum Wäsche waschen. Auch dieses Verfahren lässt sich zusätzlich mit einer Wärmerückgewinnungsanlage und einer Regenwasseranlage kombinieren. Das

Um eine effiziente, lebende Wand zu gestalten, müssen robuste Pflanzenarten verwendet werden, die auf das lokale Klima angepasst sind und Niederschläge und Winde tolerieren können. Zusätzlich sollen die Pflanzen gegenüber Schädlingen, Krankheiten und Nährstoffmangel resistent sein. Bei vertikaler Begrünung muss beachtet werden, dass die Sonneneinstrahlung und Winde einen viel stärkeren Einfluss ausüben. Die geeignete Auswahl von Pflanzen und das Nährmedium sind von wesentlicher Bedeutung. Pradhan et al. (2019) beschreiben verschiedene Arten von Sträuchern, Stauden, krautigen Bodenbedeckern, Farnen, grasartigen Laubformen, Lilien und Schwertlilien, die üblicherweise verwendet werden. Das Substrat sollte das Pflanzenwachstum durch ein ausreichendes Nährstoffangebot und genügend Wasserspeicherkapazität unterstützen. Zudem soll es leicht sein, um die Fassade nicht zusätzlich zu belasten. Um Verstopfungen zu minimieren, muss das Substrat zusätzlich ein hohes Absorptionsvermögen besitzen (Castellar et al., 2018).

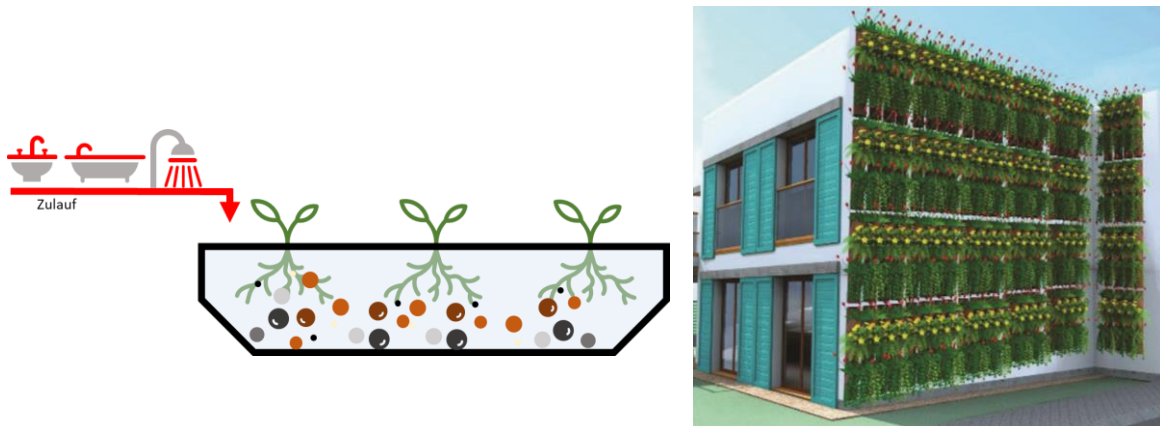


Abbildung 5: Links: Schematische Aufzeichnung einer Einheit der lebenden Wände. Eigene Darstellung. Rechts: Fassadenbegrünung aus Castellar et al. (2018) S.216.

4.1.2.2 Konzept 2b: Bepflanzte Bodenfilter

Bepflanzte Bodenfilter können als horizontale oder vertikale Abwasserbehandlungsanlagen aufgebaut werden. Die Reinigungsleistung erfolgt ähnlich wie bei der Fassadenbegrünung durch Mikroorganismen, die sich im Wurzelbereich der Pflanzen ansiedeln. Die Verunreinigungen im Abwasser werden durch die Organismen abgebaut und veratmet, oder als Humus im Boden abgelagert. Die meisten Bodenfilter bestehen aus drei Modulen: Zulauf, Bodenfilter und Ablauf. Zusätzlich kann im Rahmen der Vorbehandlung ein Ausgleichsbecken, das der schwankenden Wasserzufuhr entgegenwirken kann, konzipiert werden. Bei der Nachbehandlung wird zum Teil auf die Desinfizierung mittels UV oder Ozon gesetzt (DWA, 2015). Abbildung 6 zeigt schematisch das Reinigungsverfahren.

Bevor das Grauwasser eingeleitet wird, ist eine Vorbehandlung nötig. Hier werden Grob- und Schwemmstoffe entfernt, um der Kolmation entgegenzuwirken. Das Herzstück der Anlage bildet der Bodenfilter. Meist ist es ein Becken, welches im Untergrund abgedichtet ist. Gefüllt ist das Becken mit durchlässigem Filtermaterial wie Kies und Sand verschiedener Körnung. Bewachsen wird es von Sumpfpflanzen. In Mitteleuropa werden häufig *Schoenoplectus*- und *Juncus*-Arten gepflanzt. Sie bieten den Vorteil, dass sie im Winter nicht einfrieren und weiterhin den aktiven Sauerstofftransport befähigen (Luederitz et al., 200). Mikroorganismen siedeln sich in den Wurzeln der Pflanzen an und bauen die im Grauwasser enthaltenen Stoffe ab. Es ist keine Belüftung des Substrates nötig, da dieser von den Pflanzen selbst ausreichend produziert wird. Wird das Wasser als Brauchwasser wiederverwendet, kann es mittels UV-Desinfektion gereinigt werden. Dieses Verfahren wurde bereits in zwei Ökosiedlungen in Lübeck und der Lambertsmühle mit Erfolg durchgeführt (DWA, 2015).

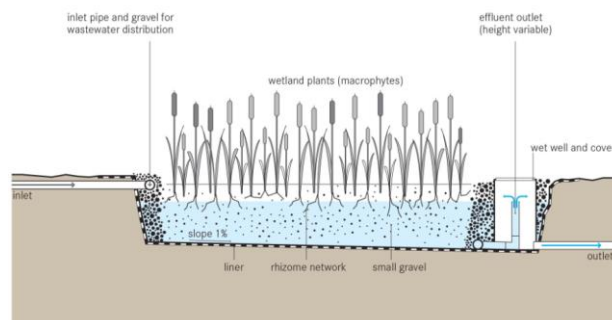


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines bepflanzten Bodenfilters. Bild von Eawag Compendium.

4.1.3 Konzept 3

Aquaponik bezeichnet die Kombination aus Aquakultur (Fischzucht) und Hydroponik (Pflanzenzucht). Wasser gelangt dabei in einem Kreislauf von den Fischen zu den Pflanzen. Die Ausscheidungen der Fische werden durch Bakterien der Hydrokultur umgewandelt und dadurch für das Pflanzenwachstum verfügbar gemacht. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Funktionsweise einer Aquaponikanlage mit Grauwasser genauer beschrieben.

4.1.3.1 Konzept 3: Aquaponikanlage mit Grauwasser

In einer Aquaponikanlage können Fisch- und Pflanzenzucht² durch das Wasser als verbindendes Medium in einem System integriert werden. Durch den Stoffwechselfvorgang der Fische werden Nährstoffe im Kot und Harn der Fische ins Wasser ausgeschieden. Danach gelangt das Wasser durch einen physikalischen Filter wo Feststoffe entfernt werden. Bakterien im Biofilter helfen dabei, gelöste Abfälle in Nährstoffe umzuwandeln. Nitrifizierende Bakterien wandeln das Ammoniak aus den Fischabwässern zunächst in Nitrit und anschließend in das für Pflanzen verfügbare Nitrat um (Khandaker & Kotzen, 2018). Sobald alle Nährstoffe aus dem Wasser aufgenommen wurden, fließt das saubere Wasser zurück zu den Fischen (Bürgow et al., 2017). Die Symbiose zwischen Pflanzen, Bakterien und Fischen führt so zur Schliessung des Kreislaufs (Graber & Junge, 2009). Alternativ zu Trinkwasser kann auch das Brauchwasser aus dem Grauwasserrecycling für den Kreislauf genutzt werden. Die Roof Water Farm (Roof Water Farm, 2020) in Berlin versucht recyceltes Grauwasser in den Aquaponikanlagen zu verwenden. Das häusliche Abwasser wird in einem mehrstufigen biologischen Reinigungsverfahren als Brauchwasser verfügbar gemacht und in das Aquaponiksystem eingeleitet. In Abbildung 7 sind die Reinigungsstufen vereinfacht dargestellt. Die dezentrale Reinigung der Roof Water Farm erfolgt ohne chemische Reinigungsmittel und besteht nur aus mechanischen und biologischen Modulen. Durch eine Vorreinigungsstufe werden grobe Partikel aufgrund der Schwerkraft vom Wasser getrennt. Um Schwebstoffe zu entfernen, wird das Abwasser gesiebt. Der anfallende Schlamm wird danach bei der biologischen Reinigung abgebaut. Um letzte Schwebstoffe zu entfernen, werden rückspülbare Sandfilter eingesetzt. Zur Nachbereitung wird das Wasser mit UV-Lampen desinfiziert und kann dann in das Aquaponiksystem eingeleitet werden (Roof Water Farm, 2020).

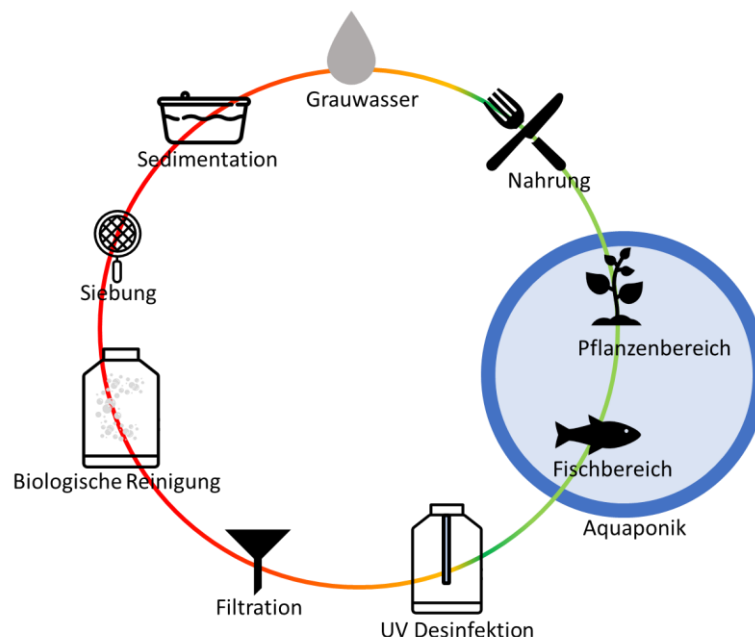


Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung des Wasserkreislaufs mit Aquaponiksystem. Eigene Darstellung nach Bürgow et al. (2017).

Um die Fische und die Pflanzen nicht zu gefährden, muss das Wasser ausreichend gereinigt sein. Mit ihrer zehnjährigen Betriebserfahrung garantiert dies die Roof Water Farm (Bürgow et al., 2017). Weiterhin ist entscheidend, dass der Sauerstoff und die anderen Nährstoffe ausreichend durchmischt werden. Dies wird durch eine konstante Wasserströmung erzielt.

² Dazu eignen sich verschiedene Pflanzen wie Blattsalate, Basilikum, Grünkohl, Mangold oder Rucola. Erwünscht sind vor allem schnell wachsenden Gemüsesorten mit kurzen Reifungszyklen (Nelson & Pade, 2008). Nach Nelson und Pade (2008) eignen sich diverse Fischarten, so zum Beispiel Wels, Weissbarsch, Graskarpfen, Seesaibling, Goldfisch oder Forelle.

4.2 Evaluation der Kriterien

In den folgenden Abschnitten werden die Kriterien der Stufe 1, 2 und 3 anhand verschiedener wissenschaftlicher Studien evaluiert. Ziel dieser Evaluation ist es, das Konzept, welches für den gegebenen Studienort (FELZ ZWEI) am besten geeignet ist, ausfindig zu machen.

4.2.1 Evaluation der Stufe 1

Konzepte, welche die Stufe 1 nicht erfüllen, werden aus der Auswahl ausgeschlossen, da die zugehörigen Kriterien für die reibungslose Funktion und Umsetzung notwendig sind. Als erstes Kriterium wird die Sicherstellung der Hygiene durch verschiedene Parameter beschrieben. In der Literatur variieren die Angaben zur Qualität, Menge und Art des Abwassers sehr. Hygieneleistungen hängen zudem von verschiedenen Vor- und Nachreinigungsstufen, der Grösse der Anlage und den klimatischen Bedingungen ab. Daher wird in dieser Arbeit hauptsächlich auf Literatur von den vorgestellten Anbietern der verschiedenen Varianten eingegangen (Bürgow et al., 2017; Paris & Schlapp, 2006; Zou et al., 2012; Alchemia-Nova, 2020). Wo keine Daten von Anbietern vorliegen, wird auf Metastudien zurückgegriffen (DWA, 2015; Ghunmi et al., 201). Bei der Aquaponikanlage wird das Grauwasser in einer Vorstufe gereinigt, daher sind die Hygienefaktoren auf das eingeleitete Wasser bezogen. Bei allen anderen Konzepten beziehen sich die Messwerte auf den Ablauf. Die Daten bezüglich Aquaponik werden von der Analyse der Roof Water Farm entnommen (Bürgow et al., 2017). Eine Übersicht über die Ergebnisse liefert die Tabelle 6. Es ist zu erkennen, dass die Hygienefaktoren in jeder Variante eingehalten werden. Diese Annahmen stimmen auch überein mit der Aussage von Jabornig (2014). Er postuliert, dass bereits eine breite Palette von Behandlungsmethoden für verschiedene Arten von Grauwasser getestet und die meisten Behandlungsmethoden mit einer Schlusdesinfektion durch Sand- oder Faserfiltration, UV-Bestrahlung, Ozon- oder Chlordosierung, oder Mikro- respektive Ultrafiltrationsmembranen erreicht werden. Dennoch können nach der Desinfektionseinheit noch vereinzelt Krankheitserreger gefunden werden. Das wird vor allem durch die Übertragung von Aerosolen, und gelegentliche Spritzer sowie Verschüttungen erklärt (Li et al., 2009).

Tabelle 6: Übersichtstabelle für das Kriterium Hygiene.

	BSB _{5/7} [mg/l]	CSB [mg/l]	pH	Gesamtkoliforme Bakterien [ml]	Fäkalkoliforme Bakterien [ml]	Enterokokken [ml]	E.coli [ml]	
Richtlinien	< 10	< 60	6-9	<10 / 100	400 / 100	200 / 100	500 / 100	Erfüllt
Ablauf SBR ^a	4.4	< 18.7	8	3 / 100	3 / 100	Richtlinie erfüllt ^f	Richtlinie erfüllt	✓
Ablauf MBR ^b	< 4.2	n.a.	7.9	< 5 / 100	< 1 / 100	Richtlinie erfüllt ^f	< 1 / 100	✓
Ablauf Fassaden ^c	4	17	7.4	Richtlinie erfüllt ^f	Richtlinie erfüllt ^f	Richtlinie erfüllt ^f	0	✓
Ablauf Bepflanzte Bodenfilter ^d	3	< 10	8	Richtlinie erfüllt ^f	Richtlinie erfüllt ^f	Richtlinie erfüllt ^f	n.a.	✓
Einlauf Aquaponik mit Grauwasser ^e	< 5	22 – 30	n.a.	Richtlinie erfüllt ^f	Richtlinie erfüllt ^f	Richtlinie erfüllt ^f	2-3 / 100	✓

^a Jeltsch (2004)

^b Paris & Schlapp (2010)

^c Zou et al. (2012)

^d DWA (2015)

^e Bürgow et al. (2017)

^f DWA (2015) S.112-113

Für die beiden weiteren Kriterien TRL-Level und Platzbedarf, gibt die Tabelle 7 eine Übersicht. Zu erkennen ist, dass bei allen Konzepten ausser bei den Aquaponikanlagen mit Grauwasser das TRL-Level erreicht wird. Beim Platzbedarf zeigt sich, dass vor allem die Varianten SBR und MBR sehr wenig Platz brauchen; auch im Vergleich zu konventionellen Anlagen. Beide Konzepte sind kompakt und relativ einfach im Keller zu installieren. Bei der Fassadenbegrünung sind die Paneele zur Reinigung vertikal an der Hauswand verankert und nehmen daher keinen zusätzlichen Wohnraum in Anspruch. Der bepflanzte Bodenfilter nimmt klar den meisten Platz in Anspruch und setzt einen genügend grossen Garten voraus. Im Falle von «FELZ ZWEI» könnte das eine Fläche von bis zu einem Viertel der Gesamtfläche (607 m²) in Anspruch nehmen. Der Bodenfilter kann einen Garten ersetzen und hat einen hohen ästhetischen Wert, jedoch werden

Sitzmöglichkeiten und Erholungsraum verkleinert. Der Platzbedarf der Aquaponikanlagen ist schwieriger abzuschätzen: Der Bedarf variiert je nach Anzahl der Fische und Pflanzen. Roof Water Farm (Bürgow et al., 2017) geht von einer Grundfläche von 6m² aus. Hinzu kommt der Platzverbrauch für die Grauwasserreinigungsstufe. Im Beispiel der Roof Water Farm wird mit 0.1m² pro Person gerechnet. Aquaponikanlagen nehmen weniger Wohnraum ein als Bodenfilter, sofern sie auf dem Dach installiert werden.

Tabelle 7: Evaluation der Kriterien TRL- Level und Platzbedarf.

Konzept	TRL ^a		Erfüllt	Platzbedarf ^b		Erfüllt
	DWA ^c	Studien ^d		Masse (L/B/H)	Pro Person ^e	
SBR	5/5		8	✓	2.1 m x 4 m x 2 m	0.28 m ² ✓
MBR	5/5		8	✓	2.1 m x 1.7 m x 0.7 m	0.12 m ² ✓
Fassadenbegrünung		>10	8	✓	10 m ²	0.33 m ² ✓
Bepflanzte Bodenfilter		>10	8	✓	45-150 m ²	1.25-5 m ² ✗
Aquaponik mit Grauwasser		<10	2	✗	6m ² + 3 m ²	0.3 m ² ✓

^aDaten nach eigenem Ermessen abgeleitet von DWA (2015)

^bDaten beziehen sich auf die Broschüren der Anbieter Picatech Huber, Dehoust GmbH, VertECO sowie abgeleitet aus dem Übersichtswerk zu nachhaltigem Bauen von Zhang (2015)

^cIn DWA (2015) werden Studien verglichen den Kenntnisstand über das Konzept abgeleitet. Die Skala geht von 1 – Keine Kenntnisse bis 5 – Breit erprobt

^dWerden in den Suchportalen GREENFile, Google Scholar und dem Rechercheportal mehr als 10 Studien gefunden, gilt das Kriterium als erfüllt.

^eEs wird mit 35 Personen gerechnet

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle Konzepte die Hygienebestimmungen einhalten können. Aquaponikanlagen mit Grauwassernutzung besitzen ein zu tiefes TRL-Level, um sie ausserhalb des wissenschaftlichen Rahmens umzusetzen. Bepflanzte Bodenfilter brauchen viel Platz und konkurrieren im urbanen Gebiet mit Wohn- und Erholungsfläche. Daher werden die Konzepte Bepflanzte Bodenfilter und Aquaponikanlage von den Evaluationen in weiteren Stufen ausgeschlossen.

4.2.2 Evaluation der Stufe 2

In der Stufe 2 werden soziale, technische, ressourcenorientierte und wirtschaftliche Kriterien bewertet. Soziale und technische Kriterien können weniger klar quantifiziert werden und werden daher qualitativ beschrieben. Daten zu Ressourcen und der Wirtschaftlichkeit sind quantitativ beschreibbar, variieren aber je nach Anlage, Anbieter, Ort und Grösse.

4.2.2.1 Soziale Kriterien

Die soziale Akzeptanz trägt massgeblich zu einer erfolgreichen Umsetzung der Anlage bei (Marks, 2006). Grundsätzlich ist die Befürwortung von nicht-konventionellen Wasseralternativen weniger hoch als von konventionellen. Auch wenn Anlagen technisch einwandfrei funktionieren, können viele Projekte aufgrund der Ablehnung der Bevölkerung scheitern (Hartley, 2006). Wichtig für eine Erhöhung der Akzeptanz ist die Aufklärung der Bevölkerung und die aktive Partizipation (Domènech & Saurí, 2010). Grossen Einfluss haben auch die Farbe und der Geruch des Wassers. Bei klarem, geruchslosem Wasser ist die Befürwortung einer Anlage höher (Marks et al., 2003). Die Literaturrecherche ergab, dass Menschen der Grauwasserwiederverwertung grundsätzlich positiv gegenüberstehen, solange dieses nicht zu Trinkzwecken eingesetzt wird. Im Folgenden werden einige ausgewählte Studien aus verschiedenen Ländern vorgestellt: Eine Studie in Syrien zeigt beispielsweise, dass die allgemeine Akzeptanz zur Nutzung von Grauwasser bei 83% liegt (Jamrah et al., 2007). Hier ist jedoch zu erwähnen, dass die Stichprobe nur sehr wenig Wasser zur Verfügung hatte und bereits ungereinigtes Grauwasser wiederverwendet wurde. Mourad et al. (2011) beobachteten weiter, dass die Bevölkerung gegenüber der Verwendung von Grauwasser zur Bewässerung positiver eingestellt ist, als gegenüber der Methode wo Grauwasser für die Toilettenspülung und die Betreibung von Waschmaschinen eingesetzt wird. Eine Studie von Spanien zeigt, dass Benutzer*innen eine relativ hohe Akzeptanz zu Grauwasserwiederverwendung haben und diese zusammen mit dem Erfahrungszuwachs ansteigt (March et al., 2004). In einem Studierendenwohnheim in England fanden Wissenschaftler heraus, dass die meisten Befragten Grauwasser gerne wiederverwenden, sofern es nicht zu Trinkzwecken gebraucht wird (Hyde et al., 2017). Keine der Varianten wird für Trinkwasser benötigt, sondern lediglich als Brauchwasser wiederverwertet. Es wird daher angenommen, dass alle Verfahren befürwortet werden. Der zusätzliche Mehraufwand beim Benutzen der Anlagen soll möglichst klein sein, da keine Involvierung seitens der Bewohner*innen erwartet werden kann. Anbieter des Membranbioverfahren versprechen einen geringen

Wartungsaufwand. Einmal jährlich wird eine Kontrolle der Funktion der Anlagenteile und gegebenenfalls eine einfache Rückspülung des Membranbiofilters empfohlen (Dehoust GmbH, 2020). Frechen (2014) von der Universität Kassel weist darauf hin, dass bei SBR-Anlagen mit einem höheren Aufwand zu rechnen ist als bei Membranbiofilteranlagen. Demgegenüber versprechen Fassadenbegrünungen einen geringen Wartungsaufwand und eine einfachere Handhabung (Wong et al., 2010). Die Paneele können einfach von einer Gartenfachperson installiert werden (Alchemia-Nova, 2020). Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der Einteilung.

Tabelle 8: Evaluation der sozialen Kriterien.

Sozial	SBR	MBR	Fassadenbegrünung	Quelle
Akzeptanz	Hoch (3)	Hoch (3)	Hoch (3)	Hyde et al. (2017), Jamrah et al. (2007), March et al. (2004), Mourad et al. (2011),
Mehraufwand	Mittel (2)	Tief (3)	Tief (3)	Alchemia-Nova (2020), Dehoust GmbH (2020), Frechen (2014), Wong et al. (2010)

4.2.2.2 Technische Kriterien

Eine Übersicht der technischen Kriterien ist in der Tabelle 9 zu finden. Die Schadenshäufigkeit von SBR und Membranbioanlagen wird von Frechen (2014) wie folgt eingeschätzt: Er postuliert bei Membranbioalgen eine geringe Schadenshäufigkeit und beschreibt sie als äusserst betriebssicher und stabil. Die SBR Anlagen sind jedoch empfindlich gegenüber stossartiger, hydraulischer Belastung und erzielen daher eine mittlere Schadenshäufigkeit. Für die Fassadenbegrünung spielen Faktoren wie Pflanzenarten, Wurzeltiefe und Substrat eine Rolle. Fowdar et al. (2017) untersuchten in ihrer Studie verschiedene Pflanzen und Substrate und kamen dabei zum Schluss, dass die Betriebsleistung nach einem Jahr immer noch gut ist. Zusätzlich konnten andere Studien auch eine lange Lebensdauer nachweisen und rechnen mit einem minimalen, notwendigen Austausch von Einzelteilen (Wong et al., 2010). Die Schadenshäufigkeit wird daher als gering eingeschätzt.

Unbehandeltes Grauwasser kann der Umwelt schaden und stellt somit für die öffentliche Gesundheit ein Risiko dar (Gross et al., 2008). Daher müssen Querverbindungen zwischen dem Trinkwasser- und dem Nichttrinkwassernetz ausgeschlossen sein (Nolde, 2005). Ist die Installation eines separaten Trinkwasseranschlusses vorhanden, bedeutet dies, dass eine Kontamination des Trinkwassers – auch bei Totalausfall des Systems – ausgeschlossen werden kann. Der Sicherheitsstandard wird bei allen Systemen als «Mittel» eingeschätzt. Bei einer Störung wird das Trinkwasser zwar nicht verunreinigt, das Brauchwasser kann jedoch trotzdem negative Auswirkungen auf Umwelt und Mensch haben. Um das Ausmass des Schadens zu minimieren, muss die Installation der Systeme ordnungsgemäss ablaufen. Zusätzlich können durch Fernmonitoring und eine Onlineüberwachung unverzüglich Stör- und Statusmeldungen via SMS und E-Mail erhalten werden (Dehoust GmbH, 2020; Picatech Huber AG, 2020).

Hinsichtlich der Multifunktionalität unterscheiden sich die Verfahren erheblich: SBR und Membranbioverfahren bieten eine reine Grauwasseraufbereitung an. Das Abwasser kann so mehrmals verwendet und Ressourcen wie Wasser, Nährstoffe und Energie für Infrastrukturen gespart werden. Bei Fassadenbegrünungen werden zusätzlich diverse weitere Ökosystemleistungen erfüllt. So werden durch die grünen Wände Luftschadstoffpartikel entfernt und somit eine gesundheitsförderliche Umgebung geschaffen. Durch die Evapotranspiration der Pflanzen entsteht ein natürlicher Kühlungseffekt, der den urbanen Hitzezentren entgegenwirken kann. Pflanzen übernehmen zusätzlich auch die Funktion eines Lärm- und Isolationsschutzes (Pradhan et al., 2019a). Sutton (2014) weisen des Weiteren auf die positive Wirkung von begrünten Wänden auf die psychische Gesundheit hin.

Tabelle 9: Technische Kriterien der Stufe 2.

Technisch	SBR	MBR	Fassadenbegrünung	Quelle
Schadenshäufigkeit	Mittel (2)	Klein (3)	Klein (3)	Hyde et al. (2017), Jamrah et al. (2007), March et al. (2004), Mourad et al. (2011)
Sicherheit	Mittel (2)	Tief (3)	Tief (3)	Gross et al. (2008), Nolde (2005), Dehoust GmbH (2020), Picatech Huber AG (2020)
Multifunktionalität	Klein (1)	Klein (1)	Hoch (3)	Pradhan et al. (2019a), Sutton (2014)

4.2.2.3 Ressourcenminderung und Umwelteinfluss

Stickstoff (N) und Phosphor (P) sind wichtige Pflanzennährstoffe. Im Abwasser sind diese vor allem im Schwarzwasser zu finden, aber auch im Grauwasser ist ein Anteil enthalten. Werden Stickstoff und Phosphor in die Gewässer gelassen, führen sie zu Eutrophierung und schaden der Umwelt. Daher spielt die Abbaurate eines Systems eine grosse Rolle. Um die Umweltauswirkungen zu reduzieren muss die Reinigungsleistung eines Systems möglichst hoch sein. Hier spielt aber nicht nur das System selbst eine Rolle, sondern es hängt auch von der Zusammensetzung des Abwassers ab. Danial, Salim und Salmiati (2016) sprechen in Bezug auf den SBR von einer totalen Stickstoffreduktion von 88% und einer Phosphatreduktion (PO_4) von 70%. Fountoulakis et al. (2016) testeten in einem Einfamilienhaus eine Membranbiofilteranlage. Sie fanden heraus, dass die durchschnittliche Reduktion für den totalen Stickstoffgehalt bei 40% liegt und für Phosphat bei 60%. Pradhan et al. (2019b) untersuchten verschiedene Pflanzen und Substrate für Fassadenbegrünung und fanden, dass bei der Verwendung von Medien mit grosser Oberfläche und kleinem Durchmesser wie Kokosfaser, Kaffeesatz und Sand über 90% des Phosphates und des Nitrates entfernt werden.

Die Wassereinsparung ist nicht nur hinsichtlich der gehäuften Hitzeperioden wichtig, sondern spart durch Entlastung der herkömmlichen Infrastrukturen wie dem Kanalnetz und den Abwasserreinigungsanlagen auch graue Energie. Zusätzlich können Wasser- und Abwassergebühren eingespart werden. Bei SBR und Membranbioverfahren gehen die Anbieter von einer Wassereinsparung von 50% aus (Grauwasser-Recycling, 2015; Dehoust GmbH, 2020) und bei der Fassadenbegrünung sogar von 60% (Alchemia-Nova, 2020).

Der zusätzliche Energieaufwand wird bei den meisten Konzepten für die Belüftung der Anlage gebraucht. Es handelt sich bei allen drei Konzepten um aerobe Abbauprozesse, welche nur mittels Sauerstoffs ablaufen können. Das Membranbioverfahren verbraucht mit 1.75 kWh (Dehoust GmbH, 2020) pro Tag am wenigsten Energie, gefolgt von dem SBR (Picatech Huber AG, 2020) mit 2.5 kWh. Am meisten Energie verbraucht die Fassadenbegrünung mit 3.2 kWh. Die meiste Energie wird hierbei für das Pumpsystem verwendet, die das Abwasser in konstanten Intervallen durch die Anlage laufen lässt (Alchemia-Nova, Persönliche Kommunikation, Mai 2020).

Tabelle 10: Ressourcenverbrauch der Stufe 2.

Ressourcen	SBR	MBR	Fassadenbegrünung	Quelle
TN	88%	40%	>90%	Danial, Salim, and Salmiati (2016), Fountoulakis et al. (2016), Jabornig (2014)
P- PO_4	70%	60%	>90%	Danial et al. (2016), Dehoust GmbH (2020), Fountoulakis et al. (2016)
Wasser	50%	50%	60%	Alchemia-Nova (2020), Dehoust GmbH (2020), Picatech Huber AG (2020)
Energie	1.75 kWh	2.5 kWh	3.2 kWh	Alchemia-Nova (2020), Dehoust GmbH (2020), Picatech Huber AG (2020)

4.2.2.4 Wirtschaftlichkeit

Wirtschaftlichkeit ist ein wichtiges Kriterium, wenn es um die konkrete Umsetzung einer Anlage geht. In der vorliegenden Arbeit werden drei Kriterien untersucht. Dies sind Anschaffungskosten, laufende Kosten und die Amortisationszeit. Jabornig (2014) analysiert in seiner Studie Durchschnittswerte für SBR und Membranbioverfahren von verschiedenen Anbietern und berechnet initiale Kosten von CHF 7000.-³ pro Anlage. Andere Anbieter, wie die Firma Dehoust und Creabeton, rechnen aber mit initialen Kosten von bis zu CHF 15000.-. Eine Fassadenbegrünung kostet bei einer Grösse von 10m² und für den Einsatz bei 35 Personen ca. CHF 20000.-⁴. In Tabelle 11 sind die berechneten Werte dargestellt. Es werden überall noch zusätzlich CHF 9000.- für die doppelte Rohrverlegung, die im Falle einer Grauwassernutzung installiert werden muss, miteinberechnet. Die jährlich laufenden Kosten schwanken bei den Konzepten zwischen 5-7% der initialen Kosten. Mit den laufenden Kosten kann ein Vergleich zu den totalen Unterhaltskosten gezogen werden. Die Berechnungen zum Payback finden sich im Angang 5.

Tabelle 11: Wirtschaftliche Kriterien der Stufe 2.

	SBR	MBR	Fassadenbegrünung
Anschaffungskosten CHF	7000-15000	7000-15000	20000
Kosten für doppelte Leitung in CHF	9000	9000	9000
Initiale Kosten im Vergleich zu totalen Sanitärkosten ^a in %	5 – 7	5 – 7	8
Jährliche laufende Kosten in % zu initialen Kosten	5 ^b	6 ^c	7 ^d
Jährliche laufende Kosten in CHF	280 - 750	420 - 900	1600
Laufende Kosten im Vergleich zu Unterhaltskosten ^a in %	0.5 - 1.5	0.8 - 1.6	2.9
Payback in Jahren	9	9	12

^a Pascal Geiger von VBAU, Persönliche Kommunikation, Juni 2020

^b Fbr (2005)

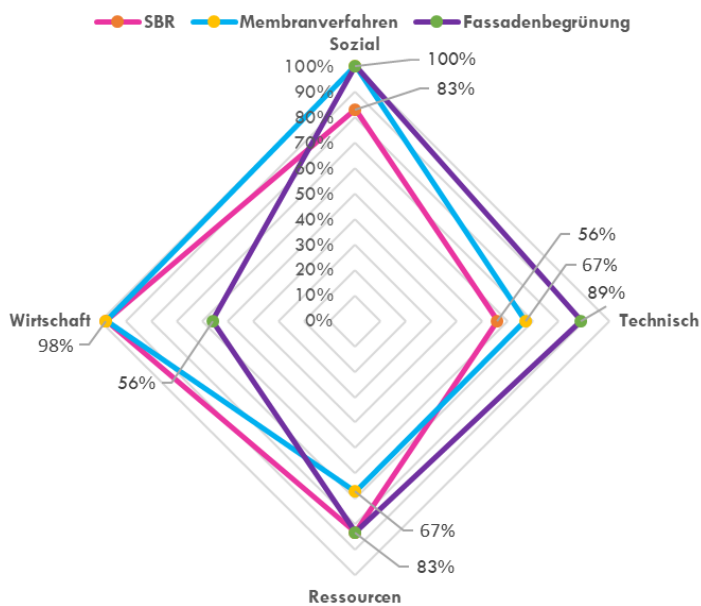
^c Schätzung basierend auf Eberle (2017)

^d Dehoust GmbH, Persönliche Kommunikation, Mai 2020

³ Durchschnittswert von Jabornig (2014) umgerechnet in CHF mit einem Kurs zu 1.25 CHF/Euro

⁴ Abschätzung von Mailverkehrt mit Alchemia-Nova in CHF mit einem Kurs zu 1.25 CHF/Euro

4.2.2.5 Vergleich der Auswertung von Stufe 2



Die Ergebnisse der Evaluation der Stufe 2 werden in der Abbildung 8 zusammenfassend abgebildet. Es ist zu sehen, dass der SBR und das Membranbioverfahren wirtschaftlich zwar interessant sind, jedoch bei den technischen Kriterien Einbussen zeigen. Die Fassadenbegrünung erreicht bei den sozialen, technischen und ressourcenorientierten Kriterien einen hohen Prozentsatz. Insgesamt schliesst die Fassadenbegrünung mit 80% der erreichten Punktezahl am besten ab. Das SBR- und das MBR-Verfahren erreichen beide mit 75% ein akzeptables Ergebnis. Das Total der Punkte ist im Anhang 7 zu finden.

4.2.3 Evaluation der Stufe 3

In der Stufe 3 sind für jedes Konzept verschiedene Fragen zum Thema Effizienz, Dezentralisierung, Biodiversität, Resilienz und Akzeptanz ausgewertet worden. Die meisten Kriterien konnten mit der Produktebeschreibung der Anbieter oder nach eigenem Ermessen eingeteilt werden. Im Anhang 6 finden sich die Punkteverteilung und die dazugehörigen Begründungen. In Abbildung 9 ist klar zu erkennen, dass die

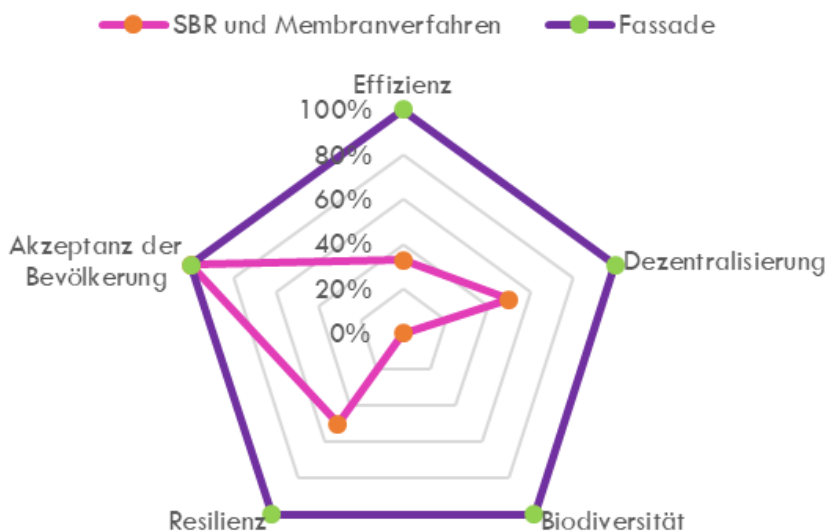


Abbildung 9: Einteilung der Kriterien der Stufe 3.

Abbildung 9 ist klar zu erkennen, dass die Fassadenbegrünung ideal auf die Vision von VBAU zugeschnitten ist: Sie erreicht in allen Kriterien die höchste Punktezahl. SBR und Membranbioverfahren schneiden in der Stufe 3 identisch ab. Beide Verfahren erreichen innerhalb der Bevölkerung zwar eine Akzeptanz von 100%, tragen aber nicht direkt zum Erhalt und zur Förderung der Biodiversität bei. Fassadenbegrünungen hingegen sind für die Biodiversität förderlich und schaffen eine naturnahe, ästhetische Umgebung (Madre et al., 2015). Bei dem Kriterium der Dezentralisierung stehen die lokale Produktion und die Steigerung der Selbstversorgung im Zentrum. Da SBR und Membranbioverfahren Kunststoff benötigen und nur selten Anbieter aus der Schweiz zu finden sind, ist eine lokale Produktion unwahrscheinlich. Die Fassadenbegrünung setzt jedoch auf einheimische Pflanzen und erhofft sich so eine längere Lebensdauer und Stabilität (Pradhan et al., 2019c). Die Effizienz wird durch die Mehrfachnutzung und den verminderten Materialverbrauch beschrieben. Durch die Fassadenbegrünung können zusätzlich zur Infrastruktur für die Abwasserreinigung auch Isolations- und Dämmungsmaterialien eingespart werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Fassadenbegrünung in der Stufe 3 am besten abgeschnitten hat und im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren heraussticht.

4.3 Empfehlung

In der Stufe 1 ist die Aquaponikanlage mit Grauwasseraufarbeitung aufgrund eines zu tiefen TRL-Levels bereits ausgeschlossen. Auch der bepflanzte Bodenfilter konnte aufgrund des Platzbedarfs nicht weiter berücksichtigt werden. In der Stufe 2 konnten daher nur noch SBR, MBR und Fassadenbegrünung evaluiert werden. Im Vergleich ergab sich, dass alle Konzepte bei den vier Kategorien der Stufe 2 relativ gut abschneiden. Die Fassadenbegrünung insgesamt mit 80% der erreichten Punktezahl aber am besten abschliesst. Die Ergebnisse der Stufe 3 bestärkt die soeben gewonnenen Einsichten: Die Fassadenbegrünung erscheint für das Objekt an der Girhaldenstrasse am geeignetsten zu sein. Auch Pradhan et al. (2019a) beschreiben das Konzept der Fassadenbegrünung als sehr geeignet für urbane Gebiete, da nebst den positiven Ökosystemleistungen auch eine Wertsteigerung der Immobilien zu erwarten ist.

Trotz der Empfehlung für die Fassadenbegrünung, haben auch das SBR und das MBR nicht schlecht abgeschnitten: In der Stufe 2 ist nur ein sehr kleiner Unterschied zwischen den Konzepten zu erkennen. Je nach Wichtigkeit und Gewichtung der einzelnen Kriterien können auch die anderen Konzepte sinnvoll sein. In einem nächsten Schritt wird nun abschliessend genauer auf die Umsetzung der Fassadenbegrünung eingegangen.

4.3.1 Umsetzung

Folgend werden einige Grundüberlegungen, die vor der Installation einer Fassadenbegrünung gemacht werden, vorgestellt: Durchschnittlich wird von einem Grauwasserverbrauch von ungefähr 100 Litern pro Tag und Einwohner*in ausgegangen (Li et al., 2009). Davon sind ca. 60 Liter für die Duschen, die Waschbecken, die Badewannen und die Waschmaschinen gedacht. In einem Haus mit 17 Einheiten und ca. 35 Bewohner*innen wird mit einem Grauwasservolumen von ungefähr 2000 Litern gerechnet. Dafür braucht es eine Fassadenbegrünung von 10 m². Um das Wasser in konstanten Intervallen durch die Fassade zu pumpen, wird mit einem Energieaufwand von 3.2 kWh gerechnet (Alchemia-Nova, Persönlicher Kontakt, Mai, 2020).

Eine Schlüsselkomponente der Fassadenbegrünung stellt das Wachstumsmedium dar. Es unterstützt die Wurzelbildung und die Entwicklung der Mikroorganismen. Durch die Morphologie und Porosität wie auch die spezifische Oberfläche des Mediums wird die Fliessgeschwindigkeit und Schadstoffentfernung beeinflusst (Pradhan et al., 2018). Studien zu den verschiedenen Substraten wurde von Pradhan et al., (2019) gemacht. Bei ihnen schneiden grobe Materialien wie Perlit, Sand und Vermiculit gut ab, da sie leicht sind und zugleich eine hohe Reinigungsleistung erzielen.

Um geeignete Pflanzen auszuwählen, müssen sie mehrere Kriterien erfüllen. Der Platzbedarf für das Wurzelwachstum und das Gewicht müssen gering sein und die Nährstoffaufnahme hoch. Lokale Pflanzenarten sind zu bevorzugen, da sie den klimatischen Bedingungen besser standhalten und somit eine höhere Überlebensfähigkeit besitzen als nicht-heimische Pflanzen (Boano et al., 2020). Boano et al. (2020) empfehlen *Carex appressa* (Scheinzypergras-Segge) und *Strelitzia* (Strelitzie), da sie bei verschiedenen Reinigungsparametern die beste Leistung zeigen. Die Strelitzie ist aber kein in Europa einheimisches Gewächs und scheint daher nicht geeignet zu sein. Pradhan et al. (2019a) beschreiben weitere Pflanzen wie *Dianella tasmanica*, *Agapanthus praecox*, *Liriope muscari* etc., welche eine gute Reinigungsleistung aufweisen.

Behälter, welche für die Pflanzen geeignet sind, sollen genügend Platz für das Wurzelwachstum und kein grosses Eigengewicht haben, da dies zu statischen Problemen führen kann. Um flexibel auf Störungen reagieren zu können, empfehlen sich modulare Topfbehälter. Prodanovic et al. (2020) versprechen sich des Weiteren praktische Vorteile von Topfkonstruktionen gegenüber Blockkonstruktionen. Sie empfehlen nicht mehr als drei Ebenen für die Wandkonstruktion zu installieren, da dies für die effektive Entfernung der Schadstoffe ausreichen soll und durch das Hinzufügen weiterer Ebenen keine zusätzliche Reduzierung erzielt wird. Für die sichere Benutzung des gereinigten Grauwassers empfehlen Boano et al. (2020) eine Desinfektionseinheit als Nachbereitungsstufe.

Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war es, anhand eines Kriterienkataloges Abwasserkonzepte zu klassifizieren und nach ihrer Eignung für urbane Gebiete in der Schweiz, einzuteilen. Erarbeitet wurde ein dreistufiges iteratives Verfahren zur Evaluation verschiedener Konzepte. Im Gespräch mit dem Architekturbüro VBAU ist die Untersuchung auf drei Konzepte eingeschränkt worden: 1a SBR-Verfahren, 1b MBR-Verfahren, 2a Bepflanzte Bodenfilter, 2b Fassadenbegrünung, 3 Aquaponikanlage mit Grauwasseraufarbeitung. In der Stufe 1 sind bereits zwei Konzepte aufgrund mangelnder Etablierung (3) sowie erhöhtem Platzbedarf (2a), ausgeschlossen. Hier wäre es auch interessant gewesen statt aquaponische auch hydroponische Anlagen zu untersuchen. Es ist einfacher, dass aufbereitete Wasser nur für Hydroponik zu verwenden, da Pflanzen weniger empfindlich sind als Fische. Bei den Fischen muss eine sehr gute Wasserqualität erreicht werden. Ansonsten erhöht dies die Gefahr von Krankheiten.

In der Stufe 2 und 3 hat die Fassadenbegrünung am besten abgeschnitten. Empfohlen für das Objekt an der Girhaldenstrasse wird daher das Konzept der Fassadenbegrünung. Die Entscheidung fiel knapp aus und ist deshalb nicht als abschliessend zu interpretieren. Fassadenbegrünung mit Grauwasser ist ein neueres Verfahren. Die erste Studie wurde erst 2008 veröffentlicht und bisher sind erst ca. 15 Studien erschienen. Alle Studien berichten von vielversprechenden Ergebnissen und von guten Einsatzmöglichkeiten. Castellar da Cunha et al. (2018) berichten, dass gegenwärtig die Anzahl der Studien zunimmt. Dies vor allem aufgrund ihres hohen Potentials für die dezentrale Abwasserbehandlung und ihren Beitrag zur thermischen Isolierung, sowie dem Klimawandel. Bemängelt wird aber, dass keine einheitlichen Standards für das Verfahren bestehen. Die Standardisierung ist erschwert, da Studien sich in Geografie, Betriebsfaktoren, Pflanzen und Substraten, unterscheiden (Castellar da Cunha et al. 2018). Eine Kenntnis über optimale Betriebsfaktoren ist entscheidend, um die Prozessstabilität und die Hygienesicherheit zu gewährleisten. Fassadenbegrünungen erzeugen wertvolle Mehrwerte für Natur, Mensch und Umwelt und sind in Hinsicht der Multifunktionalität führend. Durch ihre Vorreiterrolle wird es als geeignetes Pionierverfahren gesehen. Werden Kriterien wie Betriebssicherheit und Effizienz höher gewertet, scheint das MBR-Verfahren sinnvoller. Vergleiche mit der Literatur zeigen, dass das MBR-Verfahren als effizientestes Verfahren beschrieben wird (Li, Wichmann, & Otterpohl 2009). Larsen, Udert, and Lienert (2013) postulieren eine sehr hohe Betriebssicherheit für den dezentralen Bereich.

Als zweites Ziel wird angestrebt aus den gewonnenen Erkenntnissen konkrete Empfehlungen für die Praxis zu formulieren. Für die Umsetzung der Fassadenbegrünung wird mit ca. 10m² Paneelen gerechnet. Eine Auswahl an geeigneten Pflanzen ermittelt Pradhan et al. (2019a): *Dianella tasmanica*, *Agapanthus praecox* und *Liriope muscari* eignen sich aufgrund einer hohen Reinigungsleistung. Es empfehlen sich modulare Topfbehälter mit drei Ebenen (Prodanovic et al., 2020). Als geeignetes Medium kann Perlit, Sand oder Vermiculit eingesetzt werden, aber auch recycelte Materialien wie Kaffeesatz und Kokosfasern zeigen ihre Wirkung (Pradhan et al., 2019c). Um eine sichere Benutzung des Brauchwassers zu garantieren, wird als Nachreinigung eine UV Desinfizierung empfohlen. Zudem soll laut DIN 1986 rückstausichere Anschlüsse installiert werden und eine Kennzeichnung von Entnahmestellen und Leitungen, die mit Betriebswasser gespeist sind, erfolgen (DIN 1988; DIN 2403).

Die Kontaktaufnahme mit Anbietern zeigt, dass die Umsetzung von NASS in der Schweiz nur langsam voranschreitet. In der Forschung gibt es zwar viele Anstrengungen Abwasser dezentral aufzuarbeiten, jedoch erscheint der Schritt in die Praxis schwierig. Gründe dafür sind wohlmöglich mangelnde Richtlinien zu Wiederverwendung von aufgearbeitetem Wasser, sowie wenig Informationen über die Gesetzgebung von dezentraler Abwasserreinigung. Dazu kommt, dass keine staatliche Unterstützung zu erwarten ist und trotz potenzieller dezentraler Reinigung in der Schweiz ein Anschluss an die Kanalisation erfolgen muss (AWEL, 2016). Die Anschlussgebühren orientieren sich meist an den Baukosten und nicht am tatsächlichen Abwasserverbrauch und erschweren die Einführung von NASS. Die Kosten für das gesparte Frischwasser fallen kaum ins Gewicht und die Einsparungen tragen daher nicht zur Reduktion der Amortisationszeit bei. Weiter kann die mangelnde Sensibilisierung der Bevölkerung ein Hindernis bei der Umsetzung darstellen, sowie eine fehlende wissenschaftliche Grundlage für die politische Entscheidungsfindung. Ein Beispiel von Japan zeigt, dass durch staatliche Unterstützung grosse Fortschritte im Bereich Abwasserrecycling erzielt werden kann. Die Stadtregierung in Tokio setzte sich bereits 1973 für die Nutzung recycelten Wassers ein und erschien 1984 mit einer Richtlinie für das Recycling von Abwasser (Rudolph & Schäfer, 2001). Dies führte dazu, dass bereits 1996 fast 800000 solcher Anlagen in Japan existierten (Nakajama et al., 1999). Ein weiterer Grund kann sein, dass das Problem des immensen Wasserverbrauchs nicht als solches wahrgenommen wird. Es gibt kaum Druck vom alten System wegzukommen. Länder mit Wasserknappheit können hier offener sein.

Eine kritische Analyse der Arbeit zeigt, dass vor allem die Reliabilität in der Stufe 3 verbesserungsfähig ist. Hier sind die Fragen sehr frei ausgelegt und lassen den Betrachtenden einen Interpretationsspielraum offen.

Da dies vor allem Visionen und Ziele von VBAU darstellen, ist eine Quantifizierung erschwert, einige Fragen sollten aber trotzdem genauer operationalisiert werden. Zudem hat es sich als schwierig herausgestellt die Konzepte untereinander zu vergleichen, da sehr viele unterschiedliche Varianten der Konzepte bestehen. Beispielsweise unterscheidet sich die Reinigungsleistung von einem SBR mit oder ohne anschliessende UV Desinfektion enorm. Eine weitere Limitation der Arbeit stellt die Validität der Arbeit dar. Die Ergebnisse der Stufe 2 sind sehr einheitlich, um validere Ergebnisse zu erzielen, wird eine Einteilung der Skala von mehr als drei Stufen empfohlen. Zudem leitet sich das Kriterium Amortisation von den Kriterien Initiale Kosten und Laufende Kosten ab, was eine Vereinheitlichung der Ergebnisse bewirkt. Das Kriterium soziale Akzeptanz in der Stufe 2 wiederholt sich in der Stufe 3. Daher wird es stärker gewichtet und beeinflusst die Ergebnisse. In der Stufe 3 könnte man sich auch überlegen als Antwortkategorie «zum Teil» einzuführen, da nicht immer eindeutig zwischen «ja» und «nein» entschieden werden kann.

Um das TRL abzuschätzen wird vermutet, dass zehn Studien zu wenig sind, um eine treffende Aussage zu erhalten. Geeigneter erscheinen die Anzahl an Praxisbeispielen kombiniert mit der Anzahl an gefundenen Studien. Weitere Verfälschung können auch durch einen Publikationsbias entstanden sein. Studien, die eine mangelnde hygienische Sicherheit aufweisen, sind sehr selten zu finden, die Möglichkeit besteht, dass sie nicht publiziert wurden. In dieser Studie wurde nicht behandelt, welche Zusammensetzung das Grauwasser hat und welche Auswirkungen dies auf die unterschiedlichen Anlagen haben könnte. Zudem sollte beachtet werden, dass diese Arbeit nur ein kleiner Teil der verfügbaren Konzepte untersucht hat und dass auch ein sehr grosses Potential in der Gelb- und Schwarzwasseraufarbeitung gesehen wird. Im Gegensatz zu anderen Entscheidungshilfen hat diese aber den Vorteil schon von Anfang an die Verbindung mit der Praxis hergestellt zu haben. Viele Informationen von Anbietern und Firmen in der Schweiz und in Deutschland sind direkt in die Entscheidungshilfe eingeflossen. Dies hat den Vorteil nicht nur theoretisch valide zu sein, sondern auch in der Praxis reliable Ergebnisse zu erzielen.

In der weiterführenden Forschung wäre vor allem interessant nötige Grundlagen für die Verbesserung der rechtlichen Situation zu erarbeiten. Hierzu sollen Grenzwerte entwickelt werden, welche eine klare wissenschaftliche Untersuchung ermöglichen. Des Weiteren sollen die Reinigungsleistung von Medikamenten und andere Mikroverunreinigungen in Grauwasseranlagen untersucht werden, da dies in herkömmlichen Kläranlagen erschwert ist. Um den Effekt von der Reinigungsleistung genauer zu beurteilen, ist auch die Zusammensetzung des Grauwassers von Bedeutung. Für eine nächste Untersuchung interessieren Unterschiede in der Leistung bei stark oder schwach verschmutztem Grauwasser oder Auswirkungen von natürlichen Shampoos und Waschmittel im Vergleich zu starkem Reinigungsmittel.

Diese Arbeit erlaubt Vordenker*innen und Pionieren den erleichterten Einstieg in die alternative Abwassertechnik und die zielgerichtete Umsetzung von Neuartigen Sanitären Systemen. Somit trägt diese Arbeit zur Reduktion des Wasserbedarfs und des allgemeinen Klimawandels bei.

5 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben, danken. Besonderer Dank geht an meine Fachkorrektorin Devi Bühler, die meine Arbeit betreut und begutachtet hat und mich mit konstruktiver Kritik und guter Leitung unterstützen konnte. Auch den Architekten von VBAU, besonders Pascal Geiger, möchte ich meinen Dank aussprechen. Ausserdem möchte ich Jessica Lang, Matthias Diener und Selda Nur für das Korrekturlesen meiner Arbeit danken.

6 Literaturverzeichnis

- Abdel-Shafy, H. I., Al-Sulaiman, A. M., & Mansour, M. S. M. (2015). Anaerobic/aerobic treatment of greywater via UASB and MBR for unrestricted reuse. *Water Science and Technology*, 71(4), 630–637.
<https://doi.org/10.2166/wst.2014.504>
- Ahn, K.-H., & Song, K.-G. (1999). Treatment of domestic wastewater using microfiltration for reuse of wastewater. *Desalination*, 126(1), 7–14. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00150-2)
- Ainger, C., & Fenner, R. (2016). *Sustainable Water*. London: ICE Publishing.
- Alchemia-Nova. (2020). VertECO. Retrieved 22 May 2020, from <https://www.alchemianova.net/de/produkte/verteco/>
- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL). (2018). Richtlinie über die Anschlusspflicht von Liegenschaften an die private und öffentliche Kanalisation.
- Bartels, C. R., Wilf, M., Andes, K., & Long, J. (2005). Design considerations for wastewater treatment by reverse osmosis. *Water Science and Technology*, 51(6–7), 473–482. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0670>
- Bixio, D., Parmentier, G., Rousseau, D., Verdonck, F., Meirlaen, J., Vanrolleghem, P. A., & Thoeye, C. (2002). A quantitative risk analysis tool for design/simulation of wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 46(4–5), 301–307. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0611>
- 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, 13-31.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- Boyjoo, Y., Pareek, V. K., & Ang, M. (2013). A review of greywater characteristics and treatment processes. *Water Science and Technology*, 67(7), 1403–1424. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.675>
- Brunner, N., & Starkl, M. (2004). Decision aid systems for evaluating sustainability: A critical survey. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(4), 441–469. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2003.12.001>
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2019). *Monitoring urbaner Raum Schweiz - Analysen zu Städten und Agglomeration*. Schweiz: BBL, Vertrieb Publikationen.
- Bundesamt für Statistik BFS. (2020). Kommunale Abwasserreinigung. Retrieved 21 May 2020, from <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/massnahmen-zum-schutz-der-gewaesser/abwasserreinigung/kommunale-abwasserreinigung.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2018). *Trockenheit in der Schweiz*. Retrieved 23 May 2020, from <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-wasser/wasser--dossiers/trockenheit-in-der-schweiz-juli-2018.html>
- Bürgow, G., Franck, V., Höfler, J., Million, A., Nebert, T., & Steglich, A. (2017). Roof Water Farm – Ein Baustein klimasensibler und kreislauforientierter Stadtentwicklung. In S. Kost & C. Kölking (Eds.), *Transitorische*

- Stadtlandschaften: Welche Landwirtschaft braucht die Stadt?* (115–134). Springer Fachmedien.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-13726-7_8
- Busch, J., & Marquardt, W. (2009). Model-based control of MF/UF filtration processes: Pilot plant implementation and results. *Water Science and Technology*, 59(9), 1713–1720. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.648>
- Castellar da Cunha, J. A., Arias, C. A., Carvalho, P., Rysulova, M., Montserrat Canals, J., Pérez Luque, G., Bosch González, M., & Farreras, J. (2018). *Wetwall - an innovative design concept for the treatment of wastewater at an urban scale*. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22143>
- Chamberlain, B. C., Carenini, G., Öberg, G., Poole, D., & Taheri, H. (2014). A Decision Support System for the Design and Evaluation of Sustainable Wastewater Solutions. *IEEE Transactions on Computers*.
<https://doi.org/10.1109/TC.2013.140>
- Chopra, A. K., Sharma, A. K., & Kumar, V. (2011). *Overview of Electrolytic treatment: An alternative technology for purification of wastewater*.
- Christova-Boal, D., Eden, R. E., & McFarlane, S. (1996). An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106(1), 391–397. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(96\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(96)00134-8)
- Clemen, R. T., Reilly, T., & Clemen, R. T. (2001). *Making hard decisions with DecisionTools*. Duxbury Thomson Learning.
- Corominas, L., Larsen, H. F., Flores-Alsina, X., & Vanrolleghem, P. A. (2013). Including Life Cycle Assessment for decision-making in controlling wastewater nutrient removal systems. *Journal of Environmental Management*, 128, 759–767. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.002>
- Danial, O., Salim, M. R., & Salmiati. (2016). Nutrient Removal of Grey Water from Wet Market Using Sequencing Batch Reactor. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 20(1), 142–148.
- David L. Feldman. (2017). *The water-sustainable city: Science, policy and practice*. Edward Elgar Publishing.
- Dehoust GmbH (2020). *Tanks und Behältern aus Kunststoff und Stahl*. Retrieved 1 May 2020, from
<https://www.dehoust.de/de/Produkte/9D0E0C48-88B3-42FB-BA6B-AF3E8C41B015/GWM-2-000-mit-Druckerhoehungsanlage>
- Deutsches Institut für Normung DIN 19650 (1999). *Irrigation – Hygienic Concerns of Irrigation Water*. Berlin: Beuth.
- DIN 1988. (2012). *Technische Regeln für Trinkwasserinstallationen (TRWI): Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe*. Berlin: Beuth.
- DIN 2403. (2014). *Kennzeichnung von Rohrleitungen nach dem Durchflussstoff*. Berlin: Beuth.
- Domènech, L., & Saurí, D. (2010). Socio-technical transitions in water scarcity contexts: Public acceptance of greywater reuse technologies in the Metropolitan Area of Barcelona. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(1), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.07.001>
- Dumontet, S., Dinel, H., & Baloda, S. B. (1999). Pathogen Reduction in Sewage Sludge by Composting and Other Biological Treatments: A Review. *Biological Agriculture & Horticulture*, 16(4), 409–430.
<https://doi.org/10.1080/01448765.1999.9755243>

- Eawag. (2020). *Water Hub im NEST*. Eawag. Retrieved 23 May 2020, from <https://www.eawag.ch/>
- Eberle, J. (2017). *Fassadenbegrünung - Vorteile, Wissenswertes und praktische Beispiele*. Mare Communication and Care AG.
- Egle, L., Rechberger, H., & Zessner, M. (2015). Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 325–346.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.016>
- EPA Guidelines for Water Reuse (1992). U.S. Environmental Protection Agency/U.S. Agency for International Development, Washington DC, USAEPA/625/R-92/004.
- European Parliament & Council, Directive 2006/7/EC - The Management of Bathing Water Quality and Repealing Directive 76/160/EEC, 2006.
- Felix Gnehm. (2012). *Der Wasser-Fussabdruck der Schweiz. Ein Gesamtbild der Wasserabhängigkeit der Schweiz*. WWF Schweiz.
- Fountoulakis, M. S., Markakis, N., Petousi, I., & Manios, T. (2016). Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing. *Science of The Total Environment*, 551, 706–711.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.057>
- Fowdar, H. S., Hatt, B. E., Breen, P., Cook, P. L. M., & Deletic, A. (2017). Designing living walls for greywater treatment. *Water Research*, 110, 218–232. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.018>
- Frechen, F.B. (2014). Technische Entscheidungskriterien für dezentrale oder zentrale Abwasserreinigungsanlagen. *Abwasserentsorgung Im Ländlichen Raum*, 5(07).
- Fuchs, W., Binder, H., Mavrias, G., & Braun, R. (2003). Anaerobic treatment of wastewater with high organic content using a stirred tank reactor coupled with a membrane filtration unit. *Water Research*, 37(4), 902–908.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00246-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00246-4)
- Gensch Robert, Jennings, A., Renggli Samuel, Reymond, P., Water and Sanitation in Developing Countries, Schweiz. (2018). *Compendium of sanitation technologies in emergencies*. German WASH Network Eawag.
- Ghunmi, L. A., Zeeman, G., Fayyad, M., & Lier, J. B. van. (2011). Grey Water Treatment Systems: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(7), 657–698.
<https://doi.org/10.1080/10643380903048443>
- Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1–3), 147–156.
- Greuling, H. (2011). Rohstoffe: Am Phosphor hängt das Schicksal der Menschheit.
- Gross, A., Wiel-Shafran, A., Bondarenko, N., & Ronen, Z. (2008). Reliability of small scale greywater treatment systems and the impact of its effluent on soil properties. *International Journal of Environmental Studies*, 65(1), 41–50.
<https://doi.org/10.1080/00207230701832762>

- Horn, H., & Wolfgang, G. (2009). 37. Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft TU München. *Abwassertechnisches Seminar: Perspektiven in der Siedlungswasserwirtschaft*, TU München.
- Husnain, T., Liu, Y., Riffat, R., & Mi, B. (2015). Integration of forward osmosis and membrane distillation for sustainable wastewater reuse. *Separation and Purification Technology*, 156, 424–431.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.10.031>
- Hyde, K., Smith, M. J., & Adeyeye, K. (2017). Developments in the quality of treated greywater supplies for buildings, and associated user perception and acceptance. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12(2), 136–140. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctw006>
- Jabornig, S. (2014). Overview and feasibility of advanced grey water treatment systems for single households. *Urban Water Journal*, 11(5), 361–369. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.783086>
- Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Prathapar, S., & Harrasi, A. A. (2007). Evaluating greywater reuse potential for sustainable water resources management in Oman. *Environmental Monitoring and Assessment*, 137(1), 315.
<https://doi.org/10.1007/s10661-007-9767-2>
- Jeltsch, T. (2004). Wasser zweifach nutzen ist intelligent. *Fbr-Fachtagung Grauwasser-Recycling*, Hattingen.
- Keeney, R. L. (1982). Decision Analysis: An Overview. *Operations Research*, 30(5), 803–838.
<https://doi.org/10.1287/opre.30.5.803>
- Khandaker, M., & Kotzen, B. (2018). The potential for combining living wall and vertical farming systems with aquaponics with special emphasis on substrates. *Aquaculture Research*, 49(4), 1454–1468.
<https://doi.org/10.1111/are.13601>
- Kjerstadius, H., Haghightafshar, S., & Davidsson, Å. (2015). Potential for nutrient recovery and biogas production from blackwater, food waste and greywater in urban source control systems. *Environmental Technology*, 36(13), 1707–1720. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1007089>
- Larsen, H. F., Hauschild, M. Z., Wenzel, H., & Almemark, M. (2007). *Homogeneous LCA methodology agreed by Neptune and Innowatech*. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/deliverable-41-homogeneous-lca-methodology-agreed-by-neptune-and->
- Larsen, T. A., & Lienert, J. (2007). *Novaquatis final report. NoMix - A new approach to urban water management*. Dübendorf: Eawag.
- Larsen, T. A., Maurer, M., Eggen, R. I. L., Pronk, W., & Lienert, J. (2010). Decision support in urban water management based on generic scenarios: The example of NoMix technology. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2676–2687. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.032>
- Larsen, T. A., Udert, K. M., & Lienert, J. (Eds.). (2013). *Source separation and decentralization for wastewater management*. IWA Publishing
- 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>

- Lin, Y., Guo, M., Shah, N., & Stuckey, D. C. (2016). Economic and environmental evaluation of nitrogen removal and recovery methods from wastewater. *Bioresource Technology*, 215, 227–238.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.064>
- Loucks, D. P., Gladwell, J. S., & International Hydrological Programme (Eds.). (1999). *Sustainability criteria for water resource systems*. Cambridge University Press.
- Luederitz, V., Eckert, E., Lange-Weber, M., Lange, A., & Gersberg, R. M. (2001). Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 18(2), 157–171. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(01\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00075-1)
- Madre, F., Clergeau, P., Machon, N., & Vergnes, A. (2015). Building biodiversity: Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages. *Global Ecology and Conservation*, 3, 222–233.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.11.016>
- March, J. G., Gual, M., & Orozco, F. (2004). Experiences on greywater re-use for toilet flushing in a hotel (Mallorca Island, Spain). *Desalination*, 164(3), 241–247. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)00192-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)00192-4)
- Marks, J., Cromar, N., Fallowfield, H., & Oemcke, D. (2003). Community experience and perceptions of water reuse. *Water Supply*, 3(3), 9–16. <https://doi.org/10.2166/ws.2003.0002>
- Marks, J. S. (2006). Taking the public seriously: The case of potable and non potable reuse. *Desalination*, 187(1), 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.074>
- Martínez, S. B., Pérez-Parra, J., & Suay, R. (2011). Use of Ozone in Wastewater Treatment to Produce Water Suitable for Irrigation. *Water Resources Management*, 25(9), 2109–2124. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9798-x>
- Maurer, M., Chawla, F., von Horn, J., & Stauffer, P. (2012). Abwasserentsorgung 2025 in der Schweiz. In *Schriftenreihe der Eawag* (21). Zürich: ETH Zürich.
- McConville, J. R., Künzle, R., Messmer, U., Udert, K. M., & Larsen, T. A. (2014). Decision Support for Redesigning Wastewater Treatment Technologies. *Environmental Science & Technology*, 48(20), 12238–12246.
<https://doi.org/10.1021/es501854x>
- Mels, A. R., Rulkens, W. H., van der Meer, A. K., Nieuwenhuijzen, A. F., & Klapwijk, A. (2001). Flotation with polyelectrolytes as a first step of a more sustainable wastewater treatment system. *Water Science and Technology*, 43(11), 83–90. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0670>
- Metcalf & Eddy, I. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5. edition). Higher Education.
- Mourad, K. A., Berndtsson, J. C., & Berndtsson, R. (2011). Potential fresh water saving using greywater in toilet flushing in Syria. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2447–2453.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.05.004>
- Müller, J. A. (2000). Pretreatment processes for the recycling and reuse of sewage sludge. *Water Science and Technology*, 42(9), 167–174. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0197>

- Naidu, G., Jeong, S., Choi, Y., & Vigneswaran, S. (2017). Membrane distillation for wastewater reverse osmosis concentrate treatment with water reuse potential. *Journal of Membrane Science*, 524, 565–575.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.11.068>
- Nakajama, J. et al. (1999) Performance evaluation of on-site treatment facilities for wastewater from households, hotels and restaurants. *Water Science Technology*, 39(8), 85-92
- Nolde, E. (2000). Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings – over ten years experience in Berlin. *Urban Water*, 1(4), 275–284. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00023-6)
- Novak, C. A., Giesen, G. E. van, & Kathy M. DeBusk. (2014). *Designing rainwater harvesting systems: Integrating rainwater into building systems*. Wiley.
- Paris, S., & Schlapp, C. (2006). *Möglichkeiten der Wasserrückverwendung in urbanen Gebieten - Potential für Grauwasser-Recycling*. Hans Huber AG.
- Paris, S., & Schlapp, C. (2010). Greywater recycling in Vietnam—Application of the HUBER MBR process. *Desalination*, 250(3), 1027–1030. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.099>
- Picotech Huber AG. (2020). Lösung zur semi-zentralen Reinigung und Wiederverwendung von Abwasser. Retrieved 9 June 2020, from <https://www.picotech.ch/de.html>
- Pinto, A. C. S., de Barros Grossi, L., de Melo, R. A. C., de Assis, T. M., Ribeiro, V. M., Amaral, M. C. S., & de Souza Figueiredo, K. C. (2017). Carwash wastewater treatment by micro and ultrafiltration membranes: Effects of geometry, pore size, pressure difference and feed flow rate in transport properties. *Journal of Water Process Engineering*, 17, 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.03.012>
- Polizzotti, D. M., & Khwaja, A. R. (2012). *Ultra-sound enhanced centrifugal separation of oil from oily solids in water and wastewater*. United States.
- Pradhan, S., Al-Ghamdi, S. G., & Mackey, H. R. (2019a). Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges. *Science of The Total Environment*, 652, 330–344.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.226>
- Pradhan, S., Al-Ghamdi, S. G., & Mackey, H. R. (2019b). Greywater treatment by ornamental plants and media for an integrated green wall system. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 145, 104792.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104792>
- Prodanovic, V., Hatt, B., McCarthy, D., & Deletic, A. (2020). Green wall height and design optimisation for effective greywater pollution treatment and reuse. *Journal of Environmental Management*, 261, 110173.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110173>
- Roof Water-Farm (2018). Aufbereitung von Grauwasser. Retrieved 23 May 2020, from <http://www.roofwaterfarm.com/kompakt/technologie/1531-2/aufbereitung-grauwasser/>
- Rudolph, K.-U., & Schäfer, D. (2001). Untersuchung zum internationalen Stand und der Entwicklung Alternativer Wassersysteme. *BMBF-Forschungsvorhaben*, 02(74).
- Runge, H. (2019). *Abwassertechnik und Kläranlagen*. Vulkan Verlag.

- Salgot, M., Oron, G., Cirelli, G. L., Dalezios, N. R., Diaz, A., & Angelakis, A. N. (2018). Criteria for Wastewater Treatment and Reuse under Water Scarcity. In *Handbook of Drought and Water Scarcity*. CRC Press.
- Staben, N. (2008). *Technische Möglichkeiten der alternativen Gestaltung städtischer Wasser- und Abwasserinfrastruktur: Eine Technikrecherche im Rahmen des Projekts "Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft"*. Deutsches Institut für Urbanistik.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W. de, Wit, C. A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW. (2018). *Wasserversorgung der Schweiz*. Schweizerische Verein Des Gas- Und Wasserfaches. Retrieved 1 April 2020, from <http://wasserqualitaet.svgw.ch/index.php?id=874>
- Taylor, M., Clarke, W. P., & Greenfield, P. F. (2003). The treatment of domestic wastewater using small-scale vermicompost filter beds. *Ecological Engineering*, 21(2), 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2003.12.003>
- Thornton, J. (2013). *Choosing ecological water supply and treatment*. The Centre for Alternative Technology.
- Tolksdorf, J., & Technische Universität Darmstadt (2018). *Grau- und Schwarzwassertrennung in semizentralen Ver- und Entsorgungssystemen*. Darmstadt: IWAR.
- Trapp, J., & Libbe, J. (2016). *Neuartige Wasserinfrastrukturen - Optionen für Unternehmensstrategien und Innovation*. Deutschland: NetWORKS.
- United Nations Organisation UNO. (2018). *World Population Prospects*. Retrieved 1 July 2020, from <https://population.un.org/wpp/>
- U.S. Environmental Protection Agency USEPA. (2004). Abandoned Uranium Mines on the Navajo Nation, Arizona.
- Vaillant, N., Monnet, F., Sallanon, H., Coudret, A., & Hitmi, A. (2003). Treatment of domestic wastewater by an hydroponic NFT system. *Chemosphere*, 50(1), 121–129. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00371-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00371-5)
- Van der Zee, F. P., & Villaverde, S. (2005). Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes - A short review of bioreactor studies. *Water Research*, 39(8), 1425–1440. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.007>
- Veser, S., & Londong, J. (2017). *EVaSENS-Einsatz von Vakuum-Inlinern im Bestand. Integration von Unterdruck-Sanitärtechnik im bestehenden Gebäude zur Etablierung von NASS-Systemen*.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 380(1), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Weiterbildender Studiengang Wasser und Umwelt, & Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall DWA. (2015). *Neuartige Sanitärsysteme : Begriffe, Stoffströme, Behandlung von Schwarz-, Braun-, Gelb-, Grau- und Regenwasser, stoffliche Nutzung* (2. Auflage ed., Weiterbildendes Studium "Wasser und Umwelt"). Kromsdorf: Bauhaus-Universitäts-Verlag.

- Werner, C., Panesar, A., Rüd, S. B., & Olt, C. U. (2009). Ecological sanitation: Principles, technologies and project examples for sustainable wastewater and excreta management. *Desalination*, 248(1), 392–401.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.080>
- Wilcox, J., Nasiri, F., Bell, S., & Rahaman, Md. S. (2016). Urban water reuse: A triple bottom line assessment framework and review. *Sustainable Cities and Society*, 27, 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.021>
- Wong, N. H., Kwang Tan, A. Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D., Chiang, K., & Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Scopus*.
<https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/45879>
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., Fan, J., & Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 175, 594–601.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>
- Zhang, J. (2015). *Nachhaltige Wohngebäudesanierung in Deutschland und China: Untersuchung der konzeptionellen und strategischen Übertragungsmöglichkeiten*. Springer Verlag.
- Zou, J., Guo, X., Han, Y., Liu, J., & Liang, H. (2012). Study of a Novel Vertical Flow Constructed Wetland System with Drop Aeration for Rural Wastewater Treatment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(2), 889–900.
<https://doi.org/10.1007/s11270-011-0910-x>
- Kujawa-Roeleveld, K., & Zeeman, G. (2006). Anaerobic Treatment in Decentralised and Source-Separation-Based Sanitation Concepts. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 5(1), 115–139.
<https://doi.org/10.1007/s11157-005-5789-9>
- Kumar Gupta, V., Ali, I., A. Saleh, T., Nayak, A., & Agarwal, S. (2012). Chemical treatment technologies for waste-water recycling - An overview. *RSC Advances*, 2(16), 6380–6388. <https://doi.org/10.1039/C2RA20340E>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterteilung der verschiedenen Abwasserströme. Auf der Abbildung nicht dargestellt ist das Regenwasser. Eigene Darstellung nach Horn & Wolfgang (2009).	7
Abbildung 2: "FELZ ZWEI" befindet sich an der Girhaldenstrasse 20 in 8048 Zürich. Quelle:www.vbau.com.	11
Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung eines Sequencing Batch Reactor. Rote Linien stellen das Abwasser dar, Grüne Linien das gereinigte Brauchwasser und Braune Linien die Schlammrückführung. Eigene Darstellung nach DWA (2015) s.116.	16
Abbildung 4: Vereinfachter Membranbioreaktor für die Reinigung von Grauwasser. Rote Linien stellen das Abwasser dar, Grüne Linien das gereinigte Brauchwasser und Braune Linien den Überschussschlamm. Eigene Darstellung nach DWA (2015) s.120.	17
Abbildung 5: Links: Schematische Aufzeigung einer Einheit der lebenden Wände. Eigene Darstellung. Rechts: Fassadenbegrünung aus Castellar et al. (2018) S.216.	18
Abbildung 6: Schematische Darstellung eines bepflanzten Bodenfilters. Bild von Eawag Compendium.	18
Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung des Wasserkreislaufs mit Aquaponiksystem. Eigene Darstellung nach Bürgow et al. (2017).	19
Abbildung 8: Auswertung der Stufe 2.	25
Abbildung 9: Vergleich der Stufe 2.	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Informationen zu Vorkommen, Eigenschaft und Verwertung der Teilströme. Eigene Darstellung nach Paris & Schlapp (2006).	8
Tabelle 2: Überblick über die verschiedenen NASS im Vergleich zu dem herkömmlichen Abwassersystem (System 1). Eigene Darstellung nach DWA (2015).	10
Tabelle 3: Die Stufe 1 beschreibt die notwendigen Kriterien für eine Durchführung in urbanen Gebieten der Schweiz.	12
Tabelle 4: Operationalisierung der zweiten Stufe.	13
Tabelle 5: Kriterien der Stufe 3. Nach den Leitlinien von VBAU.	14
Tabelle 6: Übersichtstabelle für das Kriterium Hygiene.	20
Tabelle 7: Evaluation der Kriterien TRL- Level und Platzbedarf.	21
Tabelle 8: Evaluation der sozialen Kriterien.	22
Tabelle 9: Technische Kriterien der Stufe 2.	23
Tabelle 10: Ressourcenverbrauch der Stufe 2.	23
Tabelle 11: Wirtschaftliche Kriterien der Stufe 2.	24

Anhang 1 Verfahren zur Gelbwasseraufarbeitung

Verschiedene Verfahren zur Reinigung und Wiederaufarbeitung von Gelbwasser. Nach DWA (2015).

Verfahren	Zweck	Beschreibung
Lagerung	Reduktion pathogener Keime, Lagerung von Gelbwasser bis zur Verwertung oder dem Abtransport	Für eine Hygienisierung wird eine Lagerung von 6 Monaten bei 20 Grad empfohlen
Ansäuerung	Unterdrückung der Harnstoffhydrolyse, Schaffen bakteriostatischer Verbindungen	Vorbehandlung für Eindampfen, Nanofiltration oder Umkehrosmose. Wenig Beispiele aus der Praxis vorhanden
Eindampfung	Volumenreduktion, Aufkonzentrierung der Nährstoffe und Wiedergewinnung von Wasser	Das Gelbwasser muss vorbehandelt werden, damit keine Ausgasung von Ammoniak verhindert wird. Z.B durch Ansäuerung oder Nitrifikation. Die Vakuumdestillation braucht Strom
Ausfrieren	Volumenreduktion und Aufkonzentrierung der Nährstoffe	Eis enthält weniger Nährstoffe und Salze. Durch das Teilgefrieren der Gelbwasserlösung werden die Salze und Nährstoffe im flüssigen teil aufkonzentriert
Struvitfällung/MAP/AMP	P und N Elimination, Produktion eines Multikomponentendünger	Durch Zugabe von Magnesium zum Gelbwasser fällt Struvit (Amonium-Magnesium- Phosphat) aus. Nach der Sedimentation und Trocknung kann dies als Dünger eingesetzt werden. Hier ist weder vor, noch Nachbehandlung nötig. Technik ist ausgereift
Ca/Fe/Al-Fällung	P-Elimination	Zugabe von Ca/Fe/Al für die Fällung
Elektrodialyse	Volumenreduktion, Separierung von Mikroverunreinigungen, Nährstoffwiedergewinnung	Ionen wandern aufgrund eines elektrischen Feldes durch die Membran und werden dabei aufkonzentriert. Ungeladene Substanzen (inklusive Mikroverunreinigungen) bleiben im Eluat liegen
Ammoniak-Strippung	N-Elimination	Nach der vorangegangenen Harnstoffhydrolyse kann mittels Luft/Dampf Ammoniak angetrieben werden. Hydrolyse muss als Vorbehandlung stattgefunden haben durch beispielsweise Lagerung
Aktivkohle	Mikroverunreinigungen entfernen	Durch Aktivkohle werden Mikroverunreinigungen entfernt
Nitrifikation	Stabilisierung der Stickstoffkomponenten (Umwandlung zu Nitrat) und Elimination der biologisch abbaubaren, organischer Stoffe.	Nitrifizierende Bakterien wandeln Ammonium zu Nitrit 1.Stufe und Nitrat 2. Stufe um. Dabei wird der pH reduziert und die Ammoniakausgasung verhindert

	Stabilisierte Lösung kann einfach aufkonzentriert werden mittels Verdampfung. Produktion von Nitrat und Nitrit zur Denitrifikation	
Anamox	Stickstoffelimination	Ammonium wird zusammen mit Nitrat unter anaeroben Bedingungen zu Elementarem Luftstickstoff
Ozonierung	Beseitigung von Mikroverunreinigungen	Reaktion mit Radikalen und Abbau von Mikroverunreinigungen
Vakuumverdampfung	Gelbwasser kann in Klarwasser und in die Nährstoffe, aber auch z.B. Arzneimittelrückstände enthaltenes Konzentrat mit geringem Volumen separiert werden	Thermische Reaktion, bei der eine Flüssigkeit bei einem geringeren Druck als Umgebungsdruck verdampft wird.
Dampfstrippung	Austreiben flüchtiger Stoffe aus dem Urin und Überführung in die Gasphase mithilfe von Dampf (oder auch Luft)	Chemisch-physikalisches Verfahren
Fällung	Überführung gelöster Verbindungen in einen ungelösten Zusatz durch Zugabe geeigneter Chemikalien	Chemisches Verfahren

Nachteile/ Risiko (Wilderer und Paris, 2001)

- Ablagerungen und Verstopfungen in der Urinableitung durch Ausfällung
- Gefährdung durch pathogene Keimung und kranke Individuen oder Kreuzkontamination von Fäzes
- Sitzposition beim Urinieren ist erforderlich (Akzeptanzproblem)
- Falsche Reinigungsmittel können zu Schwierigkeiten führen
- Toilettenpapier muss zum Teil separat entsorgt werden

Potential/ Vorteile

- Von der Energieverbraucherin zur Energieproduzentin, von 11 KW Verbrauch pro Person können 2 KW erzeugt werden (Larsen & Lienert, 2007)
- Kostengünstig und wartungsarm (Wilderer und Paris, 2001)
- Wassersparend (Wilderer und Paris, 2001)
- Gelbwasser kann Kunstdünger substituieren (Wilderer und Paris, 2001)

Anhang 2 Braun- und Schwarzwasseraufarbeitung

Um eine optimale Behandlung zu ermöglichen, ist es wichtig die Teilströme Braun- und Schwarzwasser in eine Feststoffreiche und eine Feststoffarme Phase zu teilen. Nach der Teilung liegt eine feststoffreiche und feststoffarme Phase vor. Fäzes und Toilettenpapier bilden die feststoffreiche Phase. Die feststoffarme Phase besteht grösstenteils aus Wasser und feinsuspendierten gelösten Stoffen. Die Tabelle zeigt mögliche Verfahren für jede Phase (DWA, 2015).

Behandlungsmöglichkeiten für die Braun- und Schwarzwasseraufarbeitung

1. Teilung der Phasen	2. Feststoffreiche Phase	3. Feststoffarme Phase
Sedimentation	Thermische Kompostierung und aerobe Zersetzung von organischem Material	Membranbioreaktor oder normale Membran-Filtration
Zentrifugation	Wurmkompostierung	Fällung, Flockung und Eindampfung für die Aufkonzentrierung der Nährstoffe
Flotation	Anaerobe Behandlung	Aerobe Pflanzenkläranlage
Filtration	Trocknung der Fäzes mit oder ohne Kalkung	
Siebschnecke		
Bodensieb		

Anhang 3 Grauwasseraufarbeitung

Verschiedene Methoden und dazugehörige Reinigungsverfahren für die Grauwasseraufarbeitung.

Verschiedene Methoden nach Thornton (2013)	Verschiedene Reinigungsverfahren nach Kerpen und Zapf (2005)
Direkte Wiederverwendung (ohne Reinigung oder Sammlung) im Garten	Keine
Kurze Retentionssysteme mit einfacher Filtrierung	Sandfilter, Bodenfilter etc.
Filtration und chemische Desinfektion	Chlor oder Bromid Applikation
Biologische Systeme, vor allem Bakterien und aquatische Pflanzen	Aquaponikanlagen, Pflanzenkläranalgen (Bepflanzte Bodenfilter)
Biomechanische Systeme	Belebungsanlagen, SBR-Anlagen, Rotationstauch-/Tropfkörper-Anlagen, Membranfiltration
Hybride Systeme	Kombination der oberen

Beschreibung einer Auswahl an Grauwasseraufarbeitungssystemen nach DWA (2015)

Methoden	Verfahren	Vor und Nachbehandlung	Beispiel
Bepflanzte Bodenfilter	Aerobe biologische Behandlung. Bakterien im Wurzelbereich der Pflanzen und Filtermaterial bauen organischen Inhaltstoffe ab und reinigen das Wasser	Vorbehandlung: Ausgleichsbecken Nachbehandlung: UV Desinfektion	Lambertsmühle, Lübeck Flintenbreite
Belebungsverfahren	Aerobe biologische Behandlung durch suspendierte Biomasse.	Vorbehandlung: Ausgleichsbecken Nachbehandlung: Nachklärung, UV, Ozonierung	
Festbettverfahren	Aerobe biologische Behandlung durch sessile Biomasse. In Form eines Biofilms werden Biomasse und Bakterien auf einem Trägermaterial immobilisiert.		
Membranbioverfahren	Aerobe biologische Behandlung durch suspendierte Biomasse und vollständiger Rückhalt der Biomasse durch die Membran.	Vorbehandlung: Ausgleichsbecken und Feinsieb Nachbehandlung: UV, Ozonierung	Studentenwohnheim Mechnich und Hannover
Umkehrosmose	Diffuser Stofftransport durch Membran, vollständiger Rückhalt von Feststoffen und gelösten Substanzen.	Vorbehandlung: Feinsieb, MBR, Ausgleichsbecken. Nachbehandlung: nicht erforderlich	KIT Wassertechnik

Anhang 4 Anbieter verschiedener Grauwassersysteme

Verschiedene Anbieter für Grauwasserkonzepte 1a und 1b. Tabelle aus Jabornig (2014), S.366

Anbieter	Name	Kapazität	Beschreibung	Energie [kWh/m ³]	Kosten €
AquaClarus	Super Natural Grey	1300	Vorfiltrierung, Tropfbett, UF, UV, Wasserspeicher	1.46	n.a.
Aqua-Pluvia	Aquanus	300	Vorfiltrierung, grey water storage, UF, Wasserspeicher	n.a.	n.a.
Dehoust GmbH	GEP-Wassermanager WME-4	300	Vorfiltrierung, Membran, Wasserspeicher	6.00	5400
EwuAqua	iClear 200 indoor	200	Vorfiltrierung, Membran, Wasserspeicher	6.50	5800
Green Life GmbH	GW1 1.0-250 Indoor	250	Vorfiltrierung, Membran, Wasserspeicher	6.00	4800
Hans Grohe	Pontos AquaCycle 2500	2000	Vorfiltrierung, Biologische Reinigung, UV, Wasserspeicher	1.25	6000
Hans Huber AG	GreyUse	1500	Vorfiltrierung, Membran, Wasserspeicher	3.80	n.a.
Intewa	Aqualoop	400	Vorfiltrierung, Membran, Wasserspeicher	0.60	n.a.
Mall Umweltsysteme	GW / 600	600	Vorfiltrierung, Membran, Wasserspeicher	1.72	8900
Spin Flow	Spin Flow Grauwasser	500	Vorfiltrierung, Membran, Wasserspeicher	3.00	4300
Water Gurus	Nova Grey	600	Vorfiltrierung, Membran, UV, Wasserspeicher	n.a.	n.a.
Weise Water Systems	MicroClear® Aquacell 800	800	Vorfiltrierung, Membran, Wasserspeicher	2.00	4600

Anhang 5 Berechnung der Amortisationszeit

Amortisationszeitberechnungen mit Excel in Jahren

	SBR	MBR	Fassadenbegrünung
Kosten			
Investitionskosten in CHF	11000	11000	20000
Unterhaltskosten in CHF	500	700	1600
Doppelte Leitung in CHF	9000	9000	9000
Preis pro kWh in CHF	0.2	0.2	0.2
Energieverbrauch in kWh pro Jahr	1.75	2.5	3.2
Gewinn			
Trinkwasserpreis in CHF	1.85	1.85	1.85
Abwasserpreis in CHF	1.62	1.62	1.62
Trinkwassereinsparung	694	694	694
Abwassereinsparung	694	694	694
Amortisation in Jahren	8.54	8.67	12.80

Anhang 6 Punkteverteilung der Stufe 2

Punkteverteilung für die unterschiedlichen Variante in der Stufe 2.

	SBR	Membranbioverfahren	Fassadenbegrünung
Akzeptanz	3	3	3
Mehraufwand	2	3	3
Total Sozial	5	6	6
Schadenshäufigkeit	2	3	3
Sicherheit	2	2	2
Multifunktionalität	1	1	3
Total Technisch	5	6	8
TN	3	1	3
P-Po ₄	2	1	2
Wasser	3	3	3
Energie	2	3	2
Total Ressourcen	10	8	10
Initiale Kosten	2	2	1
Laufende Kosten	3	3	2
Amortisation	3	3	2
Total Wirtschaft	8	8	5
	27	27	29

Anhang 7 Punkteverteilung der Stufe 3

Kriterien der Stufe 3 für SBR

Bereich	Kriterien	Operationalisierung	Punkte	Begründung
Effizienz	Werden nachwachsende Rohstoffe verwendet?	Nein	0	Kunststoff Hülle (Hansgrohe, 2020)
	Wird der Materialverbrauch reduziert?	Nein	0	Ressourcenverbrauch wird reduziert, jedoch braucht es für zusätzliche Materialien, um dies zu erreichen
	Werden Elemente Mehrfach genutzt?	Ja	1	Kann nur zur Grauwasseraufbereitung benutzt werden
Dezentralisierung	Können lokale Materialien und Produkte verwendet werden	Nein	0	Firmen haben ihren Sitz nicht in der Schweiz
	Wird die Selbstversorgung gefördert?	Ja	1	Durch die eigene Grauwasserreinigung werden Infrastrukturelemente nicht mehr benötigt
Biodiversität	Wird eine naturnahe Umgebungsgestaltung erschaffen?	Nein	0	Die Reinigungsanlage schafft keinen Mehrwert für die Natur
	Wird Biodiversität geschaffen?	Nein	0	Biodiversität wird nicht gefördert
Resilienz	Werden flexible Low-Tech Technologien verwendet?	Nein	0	Durch die UV Filtrierung wird die Technologie eher komplex
	Sind die Systeme autonom?	Ja	1	Funktionieren eigenständig
Akzeptanz der Bevölkerung	Können Komforteinbussen verhindert werden?	Ja	1	Nein, das System verspricht einwandfreies Grauwasser
	Kann ein Zielpublikum ohne ökologische Ansprüche integriert werden?	Ja	1	Ja, die Aufbereitungsanlage befindet sich im Keller, Mehraufwand für die Bevölkerung ist gering
Total			5	

Kriterien der Stufe 3 für Membranbioverfahren

Bereich	Kriterien	Operationalisierung	Punkte	Begründung
Effizienz	Werden nachwachsende Rohstoffe verwendet?	Nein	0	Kunststoff Hülle (Dehoust GmbH, 2020)
	Wird der Materialverbrauch reduziert?	Nein	0	Ressourcenverbrauch wird reduziert, jedoch braucht es für zusätzliche Materialien, um dies zu erreichen
	Werden Elemente Mehrfach genutzt?	Ja	1	Kann nur zur Grauwasseraufbereitung benutzt werden
Dezentralisierung	Können lokale Materialien und Produkte verwendet werden	Nein	0	Firmen haben ihren Sitz nicht in der Schweiz
	Wird die Selbstversorgung gefördert?	Ja	1	Durch die eigene Grauwasserreinigung werden Infrastrukturelemente nicht mehr benötigt
Biodiversität	Wird eine naturnahe Umgebungsgestaltung erschaffen?	Nein	0	Die Reinigungsanlage schafft keinen Mehrwert für die Natur
	Wird Biodiversität geschaffen?	Nein	0	Biodiversität wird nicht gefördert
Resilienz	Werden flexible Low-Tech Technologien verwendet?	Nein	0	Durch das Membranbioverfahren wird die Technologie eher komplex
	Sind die Systeme autonom?	Ja	1	Funktionieren eigenständig
Akzeptanz der Bevölkerung	Können Komforteinbussen verhindert werden?	Ja	1	Das System verspricht einwandfreies Grauwasser
	Kann ein Zielpublikum ohne ökologische Ansprüche integriert werden?	Ja	1	Ja, die Aufarbeitungsanlage befindet sich im Keller, Mehraufwand für die Bevölkerung ist gering
Total			5	

Kriterien der Stufe 3 für Fassadenbegrünung

Bereich	Kriterien	Operationalisierung	Punkte	Begründung
Effizienz	Werden nachwachsende Rohstoffe verwendet?	Ja	1	Pflanzen sind Nachwachsende Rohstoffe
	Wird der Materialverbrauch reduziert?	Ja	1	Weniger Isolations- und Dämmungsmaterialien müssen durch die Fassadenbegrünung eingerechnet werden
	Werden Elemente Mehrfach genutzt?	Ja	1	Die Fassade dient als Grauwasserreinigungsanlage, als Kühlungs-, Dämmungs- und Isolationssystem (Pradhan et al., 2019c)
Dezentralisierung	Können lokale Materialien und Produkte verwendet werden	Ja	1	Es wird empfohlen lokale Pflanzenarten zu verwenden (VertECO, 2020)
	Wird die Selbstversorgung gefördert?	Ja	1	Grauwasserreinigung werden Infrastrukturelemente nicht mehr benötigt
Biodiversität	Wird eine naturnahe Umgebungsgestaltung erschaffen?	Ja	1	Ja, Pflanzen stellen einen Mehrwert für die naturnahe Umgebung dar
	Wird Biodiversität geschaffen?	Ja	1	Insekten und Vögel finden dort Futter und Habitat (Madre et al., 2015)
Resilienz	Werden flexible Low-Tech Technologien verwendet?	Ja	1	Die Reinigung durch die Pflanzen braucht keine komplexen Technologien
	Sind die Systeme autonom?	Ja	1	Funktioniert eigenständig
Akzeptanz der Bevölkerung	Können Komforteinbußen verhindert werden?	Ja	1	Das System verspricht einwandfreies Grauwasser
	Kann ein Zielpublikum ohne ökologische Ansprüche integriert werden?	Ja	1	Stellt keinen Mehraufwand oder Qualitätsminderung für Bewohner*innen dar
Total			11	