

Thermische & stoffliche Grauwassernutzung zur klimatisch wirksamen Gebäudebegrünung und erneuerbaren Warmwasserbereitung

greenWATERrecycling

K. Schlögl, R. Mixan, J. Völker, W. Huber,
M. Gräf, K. Hofbauer, U. Pitha, R. Allabashi,
B. Pucher, R. Hammer, P. Holzer, S. Hofer,
A. Türk, F. Wimmer, G. Jedliczka, B. Mayr

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

17/2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

DI Klemens Schlögl, Mag. Robert Mixan BSc, Schöberl & Pöll GmbH

DI Jakob Völker, DI Dr. Walter Huber, Gebe-Strebel GmbH

DI Dr. Michael Gräf, DI Katharina Hofbauer B.A., Priv.-Doz. DI Dr. Ulrike Pitha, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien

DI Dr. Roza Allabashi, DI Dr. Bernhard Pucher, Institut für Siedlungswasserbau, Industrieressourcenwirtschaft und Gewässerschutz, Universität für Bodenkultur Wien

DI Dr. Renate Hammer MAS, DI Dr. Peter Holzer, Susanne Hofer MSc, Andreas Türk MSc, DI Felix Wimmer BSc, Institute of Building Research & Innovation ZT GmbH

Mag. Günther Jedliczka, Mag. Barbara Mayr BSc MSc, OeAD-WohnraumverwaltungsGmbH

Wien, 2025

Thermische & stoffliche Grauwassernutzung zur klimatisch wirksamen Gebäudebegrünung und erneuerbaren Warmwasserbereitung

greenWATERrecycling

DI Klemens Schlögl, Mag. Robert Mixan BSc
Schöberl & Pöll GmbH

DI Jakob Völker, DI Dr. Walter Huber
Gebe-Strebel GmbH

DI Dr. Michael Gräf, DI Katharina Hofbauer B.A., Priv.-Doz. DI Dr. Ulrike Pitha
Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien

DI Dr. Roza Allabashi, DI Dr. Bernhard Pucher
Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Universität für Bodenkultur Wien

DI Dr. Renate Hammer MAS, DI Dr. Peter Holzer, Susanne Hofer MSc, Andreas Türk MSc, DI Felix Wimmer BSc
Institute of Building Research & Innovation ZT GmbH

Mag. Günther Jedliczka, Mag. Barbara Mayr BSc MSc
OeAD-WohnraumverwaltungsGmbH

Wien, Juni 2023

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract	9
3	Ausgangslage	11
3.1.	Der Ursprung der Idee der stofflichen und thermischen Grauwasser-Verwertung.....	11
3.2.	Stand der Technik / Stand des Wissens	11
3.2.1.	Bedeutung der Warmwasser-Bereitung für die Energiebilanz von Gebäuden	11
3.2.2.	Bedeutung des sorgsamem Umgangs mit der begrenzten Ressource Wasser	16
3.2.3.	Relevanz grüner Infrastrukturen im urbanen Raum.....	17
3.2.4.	Ausgewählte grüne Infrastrukturen des urbanen Raums	18
3.3.	Motivation und Ziel.....	26
4	Projekthalt	28
4.1.	Vorgangsweise und Methodik	28
4.1.1.	Technische Systementwicklung.....	28
4.1.2.	Analyse des STREBEL behandelten Grauwassers zur Bestimmung der pflanzlichen Anwendungsgrenzen	30
4.1.3.	Mikroklimaeffekte durch STREBEL behandeltes Grauwasser und Begrünung.....	37
4.1.4.	Prototypenbau zur Demonstration, Validierung und Verwertung.....	46
4.2.	Umsetzung der Methodik und aufgetretene Problemstellungen	48
4.2.1.	Technische Systementwicklung.....	48
4.2.2.	Analyse des STREBEL behandelten Grauwassers zur Bestimmung der pflanzlichen Anwendungsgrenzen	48
4.2.3.	Mikroklimaeffekte durch STREBEL behandeltes Grauwasser und Begrünung.....	49
4.2.4.	Demonstration, Validierung und Verwertung.....	49
5	Ergebnisse	50
5.1.	Technische Systementwicklung	50
5.1.1.	Grauwasser-Anfall und Tageverlauf	50
5.1.2.	Nutzungspotential der anfallenden Grauwasser-Mengen zur Abdeckung des Warmwasser-Wärmebedarfs, als Beitrag zur Gebäudekühlung und des Nutzwasser-Bedarfs 52	
5.1.3.	Prinzipschema der künftigen Anwendung für ein Wohngebäude mit 200 Bewohner:innen	53
5.2.	Ergebnisse der rechtlichen und pflanzenphysiologischen Eignung von Grauwasser für Bewässerungszwecke.....	54
5.2.1.	Grauwasseranalyse zur Bestimmung der rechtlichen Rahmenbedingungen zur Verwendung als Bewässerungswasser	54
5.2.2.	Untersuchung der Eignung von Grauwasser für Bewässerungszwecke: Pflanzenversuch 2020.....	60

5.2.3. Untersuchung der Eignung von Grauwasser für Bewässerungszwecke: Pflanzenversuch 2021.....	69
5.2.4. Vitalitätskontrolle.....	74
5.2.5. Versinterung.....	75
5.3. Einfluss der zusätzlichen Begrünung auf das Mikroklima des Innen- und Außenraums.....	76
5.3.1. Dimensionierung von Begrünungsflächen vor dem Hintergrund des Grauwasserangebots.....	76
5.3.2. Ergebnisse der Mikroklimasimulation: Klimatische Effekte im Außenbereich (GREENPASS®).....	78
5.3.3. Innenraumklimaeffekte durch Gebäudebegrünung.....	83
5.4. Prototypenbau zur Demonstration, Validierung und Verwertung.....	86
5.4.1. Prototypenbau.....	86
5.4.2. Ergebnisse der Validierungsmessungen.....	90
5.4.3. Verwertung und Anwendungsmöglichkeiten.....	92
5.5. Projektinnovationen, Weiterentwicklungen und Highlights.....	93
5.5.1. Technisch-ausgereifte Systemlösung.....	93
5.5.2. Hohe Energieeffizienz.....	93
5.5.3. Erfolgreiche Klimawandelanpassung.....	93
5.6. Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms „Stadt der Zukunft“.....	94
6 Schlussfolgerungen.....	96
6.1. Gewonnene Erkenntnisse und weitere Schritte bzw. Potentiale.....	96
6.2. Relevante Zielgruppen und deren Möglichkeiten.....	99
6.3. Markt- und Verbreitungspotenzial.....	99
7 Ausblick und Empfehlungen.....	100
8 Verzeichnisse.....	101
8.1. Abbildungsverzeichnis.....	101
8.2. Tabellenverzeichnis.....	103
8.3. Literaturverzeichnis.....	105
8.4. Abkürzungsverzeichnis.....	109

1 Kurzfassung

Motivation und Forschungsfrage

Im Bereich des Wärmeschutzes von Gebäuden, der Rückgewinnung von Lüftungswärmeverlusten und der Energieeffizienz von Elektroanwendungen findet aufgrund zahlreicher Forschungen ein stetiger technologischer Fortschritt statt. Im zeitgemäßen Baustandard hat sich dadurch der Anteil der Warmwasserbereitstellung zur größten Energieverbrauchskomponente des Gebäudes entwickelt. Hierbei sticht die fehlende Nutzung der Abwärme aus der Warmwasseraufbereitung hervor. Aktuelle Gesetzesentwicklungen, welche in der nahen Zukunft neue Effizienzstandards anordnen sowie auch den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen forcieren, untermauern die Dringlichkeit zu umfassenden Lösungen für den Gebäudesektor. Das Projekt greenWATERrecycling geht in diesem Sinne der Frage nach, inwieweit Wärmeenergie aus Grauwasser rückgewonnen und zugleich als Nutzwasser wiederverwertbar gemacht werden kann.

Ausgangssituation/Status Quo

Die Produkte aus der Abwasserwärmerückgewinnung werden derzeit für die Frischwasser-Vorwärmung oder das zentrale Heizsystem verwendet. Vorteile der dezentralen Nutzung liegen in den kurzen Transportwegen des Wassers und den daraus resultierenden geringen Verteilverlusten. Das Abwasser führt unweigerlich zu einer Verschmutzung (z.B. Biofilmbildung) des Wärmetauschsystems, sodass dessen Temperaturübertragungsgrad mit der Zeit abnimmt. Einige Systeme mit Speicherprinzip besitzen automatische Reinigungssysteme, erfordern in der Folge aber hohe Wartungskosten, um eine gute Wirkung der Wärmerückgewinnung zu erhalten. Durchlaufsysteme vermeiden einen direkten Kontakt des Schmutzes mit den Wärmetauschern und reinigen sich durch turbulente Filterströme selbst. Allerdings weisen sie dadurch erfahrungsgemäß einen grundsätzlich geringeren Wirkungsgrad auf.

Projekt-Inhalte und Zielsetzungen

Ziel dieses Projekts ist die Konzipierung einer technisch ausgereiften Systemlösung („STREBEL Grauwasserverwertungsanlage“) für die stoffliche und thermische Verwertung von Grauwasser, um das behandelte Grauwasser zu Bewässerungszwecken verwenden zu können und die bislang kaum genutzte Abwärme hocheffizient rückzugewinnen. Dadurch können Trinkwasser-Engpässe, die in trockenen Sommermonaten aufgrund des Klimawandels zu erwarten sind, entschärft und eine gleichzeitige Bewässerung von dringend benötigten Grünstrukturen zur Reduktion städtischer Hitzeinseln erreicht werden. Der Ansatz einer derart effizienten Verwertung von Grauwasser, nämlich sowohl in stofflicher als auch in thermischer Hinsicht, ist einzigartig und neuartig.

Durch das Projekt greenWATERrecycling ergeben sich vier visionäre Eckpunkte, die über den Stand der Technik hinausgehen und die zum energie- und wassereffizienten Betrieb eines Gebäudes beitragen können:

- Hoher Wärmerückgewinnungsgrad durch geringe Verteilverluste aufgrund der dezentralen Nutzung in Verbindung mit der Reinigung des Abwassers vor der Zufuhr zum Wärmetauscher.
- Nutzung des STREBEL behandelten Grauwassers als Wärmequelle für eine Wärmepumpe, die insbesondere der Warmwasserbereitung dient.

- Ausloten von Nutzungsmöglichkeiten des Kühlpotentials des STREBEL behandelten Grauwassers (nach Wärmeentzug), um einen Beitrag zur Kühlung von Gebäuden zu leisten.
- Grauwasserrecycling: Die Möglichkeit der Nutzung des STREBEL behandelten Grauwassers zur Bewässerung grüner Infrastruktur oder zum Einsatz als Nutz- und Brauchwasser.

Methodische Vorgehensweise

Es erfolgte eine technische Systementwicklung für einen Wohnbau mit 200 Bewohner:innen. Hierfür wurden die anfallenden Grauwassermengen und das Nutzungspotential der rückgewonnenen Energie analysiert. Die anfallende Menge des STREBEL behandelten Grauwassers wurde auf ihr physikalisches Potential (z.B. in Hinblick auf Schwebstoffe) zur Bewässerung unterschiedlicher Begrünungssysteme untersucht. In einem Versuchsgarten wurden ausgewählte Pflanzen gezielt mit dem STREBEL behandelten Grauwasser bewässert und mit einer Kontrollgruppe verglichen. Über zwei Vegetationsperioden wurden die Auswirkungen auf Wachstum und die relative Photosynthesierung sowie die Entwicklungsfähigkeit der Pflanzen untersucht. Die technische Systemauslegung aller Projektkomponenten erfolgte auf Basis der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse.

Weiters wurden die technischen, rechtlichen und hygienischen Rahmenbedingungen zur stofflichen Grauwassernutzung für die Bewässerung von Grünflächen, Gebäude- und Fassadenbegrünung analysiert. An einem konkreten Gebäude, das für das Projekt als Referenzgebäude dient, wurde eine Simulation und Auswertung von klimaverbessernden Wirkungen durch zusätzliche Begrünung (an der Fassade selbst wie auch auf dem Vorplatz), welche mit Grauwasser bewässert werden kann, durchgeführt.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Grauwasseranalysen ergaben, dass das STREBEL behandelte Grauwasser den in der ÖNORM EN 16941-2 & 1. AEVKA festgelegten Grenzwerten entspricht und die Qualitätsanforderungen erfüllt. Hinsichtlich der chemisch-physikalischen und mikrobiologischen Parameter eignet sich das STREBEL behandelte Grauwasser für die Anwendung zur WC-Spülung, Gartenbewässerung (ausgenommen Sprühanwendungen) und Reinigung (Spül- und Waschmaschine). Aus pflanzenphysiologischer Sicht eignet sich das STREBEL behandelte Grauwasser für die Bewässerung von grünen Infrastrukturen. Aufgrund von möglichen Rückständen im STREBEL behandelten Grauwasser (z.B. Medikamente) ist jedoch auf entsprechenden Umgang zu achten, sodass kein Kontakt zu Kräuter-, Obst- oder sonstigen Pflanzen und Bäumen mit essbaren Früchten möglich ist.

Ausblick

Auf Basis der Projektergebnisse konnte eine erste Demonstrationsanlage im Rahmen eines Forschungsprojekts aus dem Programm „Smart Cities Demo – Living Urban Innovation 2019“ des Klima- und Energiefonds entwickelt und zur Umsetzung vorbereitet werden. Mit dieser Anlage können erstmals unter Realbedingungen in einem Wohngebäude Erfahrungen und Messdaten zum gegenständlichen Thema der thermischen und stofflichen Verwertung von warmen Grauwasser gesammelt werden. Durch das Projekt konnte die tatsächliche Umsetzung im Maßstab eines Reallabors erfolgreich vorbereitet werden, um die Projektergebnisse optimal zu verwerten.

Untersuchungen können dazu beitragen, die Wahrnehmung, die Einstellungen und die Akzeptanz der Menschen gegenüber Grauwasser zu verstehen und geeignete Kommunikations- und Bildungsstrategien zu entwickeln, um eine breite Akzeptanz zu erreichen.

2 Abstract

Motivation and research question

In the field of thermal insulation of buildings, the recovery of ventilation heat losses and the energy efficiency of electrical applications, constant technological progress is taking place due to numerous research efforts. In contemporary building standards, the proportion of hot water provision has thus developed being the largest energy consumption component of the building. Here again, the lack of use of waste heat from hot water preparation stands out clearly. Current legislative developments, which will mandate new efficiency standards soon as well as the sustainable use of resources, underpin the urgency for comprehensive solutions for the building sector. The greenWATERrecycling project is investigating the extent to which heat energy can be recovered from greywater and at the same time greywater can be made recyclable as service water.

Initial situation/status quo

The products from wastewater heat recovery are currently used for freshwater preheating or the central heating system. Advantages of decentralised use lie in the short transport distances of the water and the resulting low distribution losses. The wastewater inevitably leads to fouling (e.g. biofilm formation) of the heat exchange system, so that its temperature transfer efficiency decreases over time. Some systems with storage principle have automatic cleaning systems but subsequently require high maintenance costs to maintain the effect of heat recovery. Continuous flow systems avoid direct contact of dirt with the heat exchangers and clean themselves through turbulent filter flows. However, experience has shown that they are fundamentally less efficient as a result.

Project contents and objectives

The aim of this project is to design a technically mature system solution ("STREBEL greywater recycling plant") for the material and thermal recycling of greywater to be able to use the treated greywater for irrigation purposes and to recover the waste heat, which has hardly been used so far, in a highly efficient way. In this way, drinking water shortages that are to be expected in dry summer months due to climate change can be alleviated and an irrigation of urgently needed green infra structures to reduce urban heat islands can be achieved at the same time. The approach of such an efficient utilisation of grey water, namely in terms of both material and thermal aspects, is unique and new.

The greenWATERrecycling project results in four visionary cornerstones that go beyond the state of the art and can contribute to the energy- and water-efficient operation of a building:

- High degree of heat recovery due to low distribution losses due to decentralized use in conjunction with cleaning of the wastewater before it is fed to the heat exchanger.
- Use of STREBEL treated greywater as a heat source for a heat pump, especially for water heating.
- Exploring the possibilities of using the cooling potential of STREBEL treated greywater (after heat extraction) to contribute to the cooling of buildings.
- Greywater recycling: The possible use of STREBEL-treated greywater for irrigation of green infrastructures or domestic water use is possible.

Methodical procedure

A technical system was compiled for a residential building with 200 residents. For this purpose, the greywater quantities produced, and the utilisation potential of the recovered energy were analysed. The accumulating amount of STREBEL treated greywater was analysed for its physical potential (e.g. regarding suspended matter) for the irrigation of different greening systems. In an experimental garden, selected plants were specifically irrigated with the STREBEL treated greywater and compared with a control group. Over two vegetation periods, the effects on growth and relative photosynthesis as well as the developmental ability of the plants were investigated. The technical system design of all project components was based on the knowledge gained in the project.

Furthermore, the technical, legal and hygienic framework conditions for the material use of greywater for the irrigation of green spaces, building and façade greening were analysed. A simulation and evaluation of the climate-improving effects of additional greening (on the façade itself as well as on the forecourt), which can be irrigated with greywater, was carried out on an actual building that serves as a reference building for the project.

Results and conclusions

The grey water analyses showed that the STREBEL treated grey water complies with the limit values specified in ÖNORM EN 16941-2 & 1. AEVkA and meets the quality requirements. With regard to the chemical-physical and microbiological parameters, the STREBEL treated greywater is suitable for use in toilet flushing, garden irrigation (except springle application) and cleaning (dishwasher and washing machine). From a plant physiological point of view, STREBEL treated greywater is suitable for the irrigation of green infrastructures. Due to possible residues in the STREBEL treated grey water (e.g. medicines), however, appropriate handling must be ensured so that no contact with herbs, fruit or other plants and trees with edible fruit is possible

Outlook

Based on the project results, an initial test plant was developed and prepared for implementation as part of a research project from the Climate and Energy Fund's "Smart Cities Demo - Living Urban Innovation 2019" programme. This plant will be used for the first time to gather experience and measurement data on the subject of thermal and material recycling of warm greywater under real conditions in a residential building. Through the project, the actual implementation on the scale of a real laboratory could be successfully prepared to optimally utilise the project results.

Research can help to understand people's perceptions, attitudes and acceptance of greywater and to develop appropriate communication and education strategies to achieve broad acceptance.

3 Ausgangslage

3.1. Der Ursprung der Idee der stofflichen und thermischen Grauwasser-Verwertung

Mit der jahrelang verfolgten Effizienzsteigerung der Heizungskessel ist das Potenzial für weitere Steigerungen bei Wirkungsgraden ausgeschöpft. Als Heizkessel-Erzeuger hat die Firma GEBE-STREBEL das Thema „Energieeffizienz bei Warmwasser“ aufgegriffen und nach einem Weg gesucht, wie Wärmeenergie aus dem Grauwasser verwertbar gemacht werden kann.

Im Rahmen von Filtrationen und verschiedenen anderen Versuchen hat sich deutlich gezeigt, dass der Wartungsaufwand solcher Grauwasseranlagen in keinem Verhältnis zum erzielten Wärmegewinn steht. GEBE-STREBEL hat aus diesen Ergebnissen gefolgert, dass das Grauwasser vor dem Prozess der Wärmerückgewinnung vollkommen sauber sein muss und die Idee geboren, eine Wärmerückgewinnung mit Filtration nach dem Grundprinzip einer Kläranlage (Belebung) zu versuchen. Im Zuge der Untersuchungen wurde erkannt, dass aufgrund der Reinigung eine nachgelagerte stoffliche Verwendung des STREBEL behandelten Grauwassers (STREBEL bGW) als Nutzwasser für WC-Spülung, Poolwasser oder Gartenbewässerung möglich ist.

3.2. Stand der Technik / Stand des Wissens

3.2.1. Bedeutung der Warmwasser-Bereitung für die Energiebilanz von Gebäuden

Die Europäische Gebäuderichtlinie (EPBD) in der Vorlage zur Abänderung durch das Europäische Parlament (März, 2023) schreibt für alle Wohngebäude-Neubauten ab 2030 das „Nullemissionsgebäude“ als neuen Standard verbindlich vor. Ab In-Kraft-Treten der EPBD soll im Neubau und bei „umfassender Sanierung“ keine mit fossilen Brennstoffen betriebenen Heizungsanlagen mehr eingebaut werden bzw. soll die Nutzung solcher Heizungsanlagen bis 2040 auslaufen. Laut EPBD wird die Gesamteffizienz eines Gebäudes durch den Energiebedarf für Heizung und Kühlung und durch den Wärmebedarf für (Trink-) Warmwasser dargestellt.

In den letzten Jahrzehnten stand in Österreich vor allem die Reduzierung des Heimwärmebedarfs im Vordergrund. Dabei hat sich die Warmwasserbereitung im zeitgemäßen Baustandard zur größten Energieverbrauchskomponente von Gebäuden entwickelt. Erfolge im Wärmeschutz von Gebäuden, in der Rückgewinnung von Lüftungswärmeverlusten und in der Effizienz von Elektroanwendungen haben dazu geführt, dass der Energieverbrauch für die Warmwasseraufbereitung bereits jenen der Raumheizung und auch des Haushaltsstroms übersteigt. Ebenso sind für das Erreichen des Warmwasserkomforts weitaus höhere Temperaturen erforderlich, als dies z.B. für den Vorlauf einer Fußbodenheizung nötig ist. Aus diesen Gründen steigt die Relevanz des Energiebedarfs für Warmwasser mit zunehmendem Dämmstandard von Gebäuden. Dementsprechend stellen die thermischen Verluste der Warmwasserbereitung auch das größte, bislang ungenutzte Potenzial zur Energiebedarfssenkung von Gebäuden mit Wohnnutzung und vergleichbaren Nutzungen dar.

Zu den Aufgaben von Trinkwasser-Erwärmungsanlagen zählen, das für technische und hygienische Zwecke erforderliche Warmwasser, auch Brauchwasser genannt, an den Gebrauchsstellen in der notwendigen Menge, Güte und Temperatur unter wirtschaftlich tragbaren Bedingungen zur Verfügung zu stellen (Laasch & Laasch, 2005). Bei der Ausführung von Trinkwasser-Erwärmungsanlagen sind (DIN 1988-2:1988-12, 1988; DIN 1988-4:1988-12, 1988; DIN 4753-1:2019-05, 2019) sowie weitere für bestimmte Ausführungen genannten Vorschriften zu beachten. Die Zapftemperaturen müssen zum Ausgleich für die Abkühlung des Brauchwassers in den Wannen und Becken um einige Grade höher sein als die Gebrauchstemperaturen.

Zur Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser innerhalb eines Gebäudes sind unterschiedliche dezentrale Systeme am Markt und im Einsatz. Der größte Vorteil der Abwasserwärmerückgewinnung ist jener Fakt, dass die Wärme dort zurückgewonnen wird, wo sie auch benötigt wird, insbesondere in Städten. Dies ist vor allem aufgrund der stetig voranschreitenden Urbanisierung ein wichtiger Punkt für die Zukunft.

Die Produkte aus der Abwasserwärmerückgewinnung werden derzeit für die Frischwasser-Vorwärmung oder das zentrale Heizsystem verwendet. Vorteile der dezentralen Nutzung liegen in den kurzen Transportwegen des Wassers und den daraus resultierenden geringen Verteilverlusten sowie in der klar abgegrenzten rechtlichen Situation, da sich das System innerhalb des Gebäudes befindet.

Das Abwasser führt unweigerlich zu einer Verschmutzung (z.B. Biofilmbildung) des Wärmetauschsystems, sodass dessen Temperaturübertragungsgrad mit der Zeit abnimmt. Einige Systeme mit Speicherprinzip besitzen automatische Reinigungssysteme, erfordern in der Folge aber hohe Wartungskosten, um die Wirkung der Wärmerückgewinnung zu erhalten. Durchlaufsysteme vermeiden einen direkten Kontakt des Schmutzes mit den Wärmetauschern und reinigen sich durch turbulente Filterströme selbst. Allerdings weisen sie dadurch erfahrungsgemäß einen grundsätzlich geringeren Wirkungsgrad auf. In diesem starken Spannungsfeld bewegen sich die aktuell am Markt befindlichen Systeme.

Zusätzlich ist für viele dezentrale Systeme, d.h. eine Wärmerückgewinnung im Gebäude selbst, eine Trennung von Grauwasser (z.B. Duschwasser) und Schwarzwasser (z.B. WC-Abwasser) notwendig. Bei Neubauten und Sanierungen soll diese Umsetzung jedoch problemlos möglich sein. Nach der Nutzung des Abwassers im Wärmerückgewinnungssystem kommt es bei den derzeit am Markt befindlichen Systemen zu keiner weiteren Verwendung und es erfolgt eine Einleitung in das Kanalnetz.

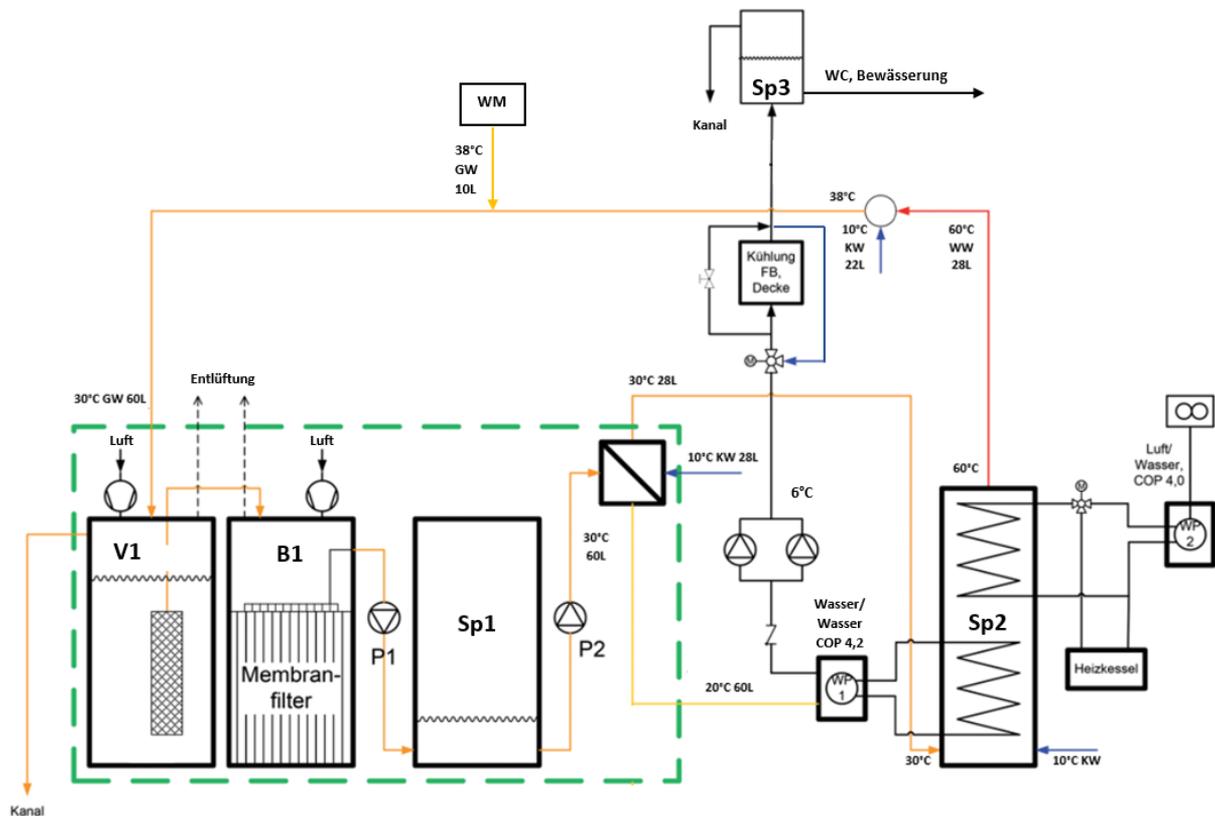
All diese Problempunkte greift die STREBEL Grauwasserverwertungsanlage (STREBEL GWVA) auf und kombiniert die Vorteile aktuell verfügbarer Lösungen. Abbildung 1 zeigt das Anlagenprinzip in Form eines Hydraulikschemas. Im ersten Schritt wird das Grauwasser biologisch und mechanisch gereinigt. Hieraus ergibt sich bereits ein großer Vorteil gegenüber der am Markt befindlichen Systeme, da es zu keiner Verschmutzung des Wärmetauschers kommt und dadurch bei der Wärmeübertragung Wirkungsgrade von über 95 % erreicht werden können.

Im verwendeten Plattenwärmetauscher gibt das STREBEL behandelte Grauwasser (STREBEL bGW) an das einströmende Frischwasser Wärme ab und kühlt ab. Das abgekühlte STREBEL bGW wird zu einer Wärmepumpe weitergeleitet. Dort wird es zur Erhitzung des Warmwasserspeichers, dem das zuvor erwärmte Frischwasser zugeführt wird, genutzt. Bei der Nutzung in der Wärmepumpe kühlt das STREBEL bGW auf ca. 6 °C ab.

Herkömmliche Systeme ermöglichen eine Frischwassererwärmung und dessen Zufuhr in einen Speicher. Durch das „Strebel Grauwasser-Verwertungsverfahren“ wird zusätzlich zur Frischwassererwärmung das STREBEL behandelte Grauwasser auch zum Betrieb der Wärmepumpe genutzt und so der Verbrauch anderer Energiequellen minimiert.

Ein weiterer innovativer Ansatz, dem bisher noch kein anderes System Beachtung schenkt, ist die Nutzung des Kältepotentials des STREBEL bGW zur Raumkühlung. Erst nach dieser Nutzung steht das STREBEL bGW endgültig als Nutzwasser zur Verfügung und kann zur Bewässerung oder auch für WC-Spülungen genutzt werden.

Abbildung 1: Hydraulikschema STREBEL Grauwasserverwertungsanlage (© GEBE-STREBEL GmbH)



Zusammenfassend ergeben sich durch die Verwendung der STREBEL GWVA vier visionäre Eckpunkte, die über den Stand der Technik hinausgehen und die zum energie- und wassereffizienten Betrieb eines Gebäudes beitragen können:

- Hoher Wärmerückgewinnungsgrad durch geringe Verteilverluste aufgrund der dezentralen Nutzung in Verbindung mit der Reinigung des Abwassers vor der Zufuhr zum Wärmetauscher.
- Nutzung des STREBEL bGW als Wärmequelle für eine Wärmepumpe, die insbesondere der Warmwasserbereitung dient.
- Nach dem Wärmetzug die Nutzung des Kühlpotentials des STREBEL bGW, um einen Beitrag zur Kühlung von Gebäuden zu leisten.
- Grauwasserrecycling: Die Möglichkeit der Nutzung des STREBEL bGW zur Bewässerung grüner Infrastruktur oder zum Einsatz als Nutz- und Brauchwasser.

Mit dem Erwärmungsgesetz kann die Wärmemenge Q , die als thermische Energie dem Grauwasser entzogen wird, berechnet werden:

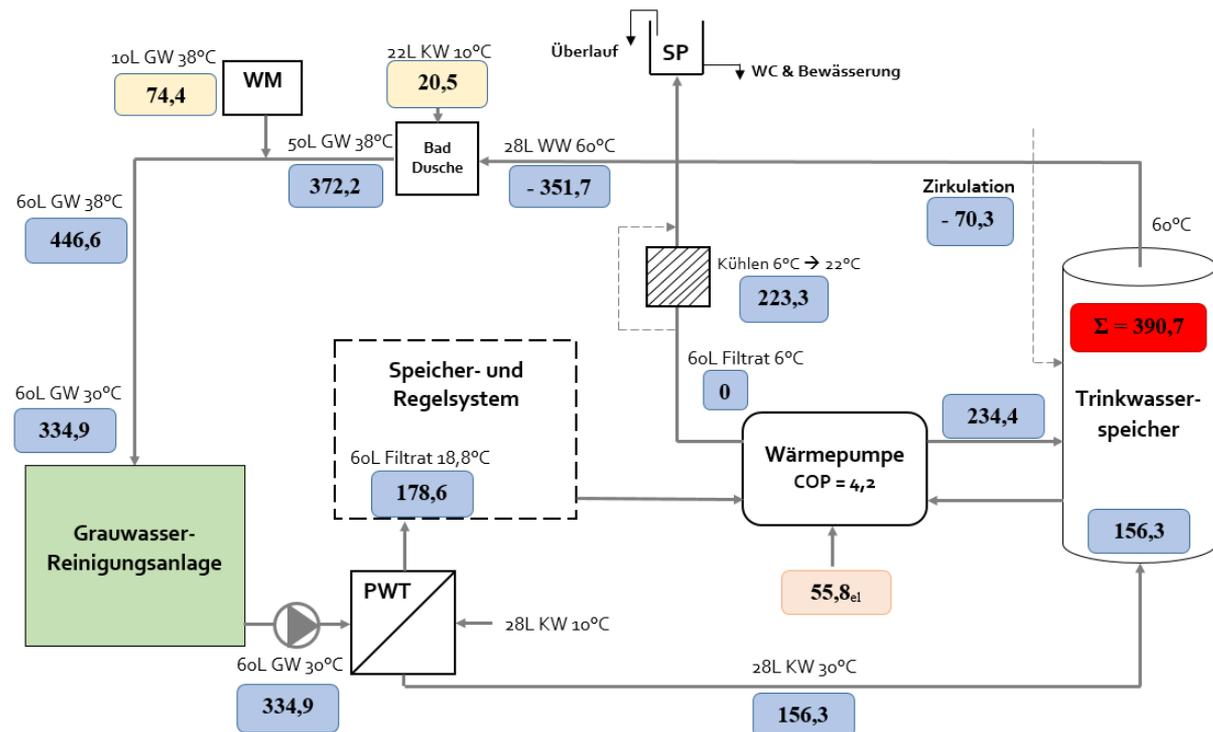
$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Dabei ist m die Masse, ΔT der Temperaturunterschied und c die spezifische Wärmekapazität.

Die spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser beträgt $4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ bzw. $1,163 \text{ Wh}$. Das bedeutet, dass man einem Kilogramm Wasser eine Wärme von $4,2 \text{ kJ}$ zuführen muss, um es um 1 K zu erwärmen.

Im Folgenden wird das Potenzial der Wärmerückgewinnung am Beispiel eines Mehrgeschoßwohnbaus mit 200 Bewohner:innen dargelegt (vgl. Abbildung 2).

Abbildung 2: Energieflussdiagramm der STREBEL Grauwasserverwertungsanlage. Die Zahlen geben Werte des Energiestroms in kWh/d für 200 Personen an (© GEBE-STREBEL GmbH).



Beispiel: Potenzial der Wärmerückgewinnung am Beispiel eines Mehrgeschoßwohnbaus mit 200 Bewohner:innen

Gegeben:

Mehrgeschoßwohnbau	200 Bewohner:innen
Grauwasseranfall	60 L / E*d 30°C
Warmwasserbedarf	28 L / E*d 60°C
Mittlere Grauwassertemperatur Eingang	30 °C
Mittlere Grauwassertemperatur Ausgang	6 °C
COP Wärmepumpe	4,2
Laufzeit Wärmepumpe	20 h pro Tag
Annahme Wassereigenschaft	1 L entspricht 1 kg
Mittlere Temperatur Kaltwasser	10 °C
Zirkulationsverluste:	20 %

Gesucht:

1. Wärmebedarf pro Tag
2. Wärmeanfall aus Grauwasser
3. Wahl der Wärmepumpe

1. Wärmebedarf pro Tag

$$Q_{WW} = m \cdot c \cdot \Delta T = 28 \text{ kg/d} \cdot 200 \cdot 1,163 \text{ Wh} \cdot (60-6) = 351.691,2 \text{ Wh/d} = 351,7 \text{ kWh/d}$$

$$Q_{Zirk} = Q_{Tag} \cdot 0,2 = 70,3 \text{ kWh/d}$$

$$Q_{Tag} = 422 \text{ kWh/d}$$

2. Wärmeanfall aus Grauwasser

$$\rightarrow Q_{WP} = 334,9 \text{ kWh/d} - 156,3 \text{ kWh/d} = \mathbf{178,6 \text{ kWh/d}}$$

$$\rightarrow Q_{el} = Q_2 / COP$$

$$Q_{el} = (Q_1 + Q_{el}) / COP$$

$$Q_{el} = (Q_1 / COP) + (Q_{el} / COP)$$

$$Q_1 / COP = Q_{el} - (Q_{el} / COP)$$

$$Q_1 = Q_{el} \cdot COP - Q_{el}$$

$$Q_1 = Q_{el} \cdot (COP - 1)$$

$$178,6 \text{ kWh/d} = Q_{el} \cdot (4,2 - 1)$$

$$Q_{el} = 178,6 \text{ kWh/d} / 3,2 = 55,8 \text{ kWh/d}$$

$$Q_{GW} = Q_{PWT} + Q_{WP} + Q_{el}$$

$$\rightarrow Q_{GW} = 390,7 \text{ kWh/d}$$

3. Wahl der Wärmepumpe

Gewählte durchschnittliche Laufzeit der Wärmepumpe: $t_{Lauf} = 20 \text{ h/d}$

Bestimmung der Leistung: $Q_{Kond} = Q_{GW} / t_{Lauf} = 390,7 \text{ kWh/d} / 20 \text{ h/d} = 19,5 \text{ kW}$

3.2.2. Bedeutung des sorgsamem Umgangs mit der begrenzten Ressource Wasser

Mehr als 70 % der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt. Die globalen Wasserressourcen sind begrenzt und belaufen sich auf etwa 1,38 Milliarden Kubikkilometer. Davon entfallen jedoch rund 97,5 % auf Salzwasser, 1,7 % sind in Gletschern, Eis und Schnee gebunden und 1 % stehen als lebensnotwendiges Süßwasser zur Verfügung (Fröhlich, 2006).

Wasser ist Grundlage allen Lebens und unser wichtigstes Lebensmittel. Die Vereinten Nationen haben im Jahr 2010 das Recht auf Zugang zu sauberem Trinkwasser und sanitärer Versorgung als Menschenrecht anerkannt. Die Wasserversorgung gehört als sechstes Ziel zu den 17 Nachhaltigkeitszielen (Sustainable Development Goals, kurz: SDG) der Vereinten Nationen. Der nachhaltige Einsatz und Gebrauch von Wasser ist zudem eines der sechs Umweltziele der EU-Taxonomie, welche im Zuge des „European Green Deal“ erlassen wurde und ebenso für den Gebäudesektor Klassifizierungen für nachhaltige Wirtschaftstätigkeiten beschreibt (Verordnung (EU) 2020/852, 2020).

Eine sichere Versorgung mit Trinkwasser, sanitären Einrichtungen und Hygiene für die menschliche Gesundheit ist unerlässlich. Den aktuellen Entwicklungen nach werden auch im Jahr 2030 noch Milliarden von Menschen nicht über diese grundlegenden Dienstleistungen verfügen. Die Nachfrage nach Wasser steigt aufgrund des raschen Bevölkerungswachstums, der Verstädterung und des zunehmenden Drucks durch Landwirtschaft, Industrie und Energiewirtschaft. Jahrzehntelanger Missbrauch, schlechte Bewirtschaftung und die übermäßige Entnahme und Verschmutzung von Süß- und Grundwasser haben den Wasserstress verschärft und die wasserbezogenen Ökosysteme beeinträchtigt. Dies wirkt sich wiederum auf die menschliche Gesundheit, die Wirtschaftstätigkeit sowie die Lebensmittel- und Energieversorgung aus. Es besteht dringender Handlungsbedarf, um den derzeitigen Trend umzukehren. Um eine nachhaltige und gerechte Verteilung von Wasser zur Deckung des gesamten Bedarfs zu gewährleisten, muss die durchschnittliche weltweite Umsetzungsrate einer verbesserten Wasserbewirtschaftung verdoppelt werden. Zusätzliche Anstrengungen sind erforderlich, um die Investitionen in die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung zu erhöhen und die Zusammenarbeit zwischen Ländern, die sich grenzüberschreitende Gewässer teilen, zu fördern (United Nations, 2022).

Die stoffliche Verwertung von Grauwasser hat besondere Bedeutung in wasserarmen Gegenden, die durch den Klimawandel zunehmen werden. Besonders in urbanen Gebieten hat sich gezeigt, dass aufgrund des Klimawandels unbehagliche Situationen, wie etwa besonders ausgeprägte Sommertage und Tropennächte, gehäuft auftreten werden. Um einen gesundheitsfördernden Innen- und Außenaufenthaltskomfort sicherstellen zu können, werden Klimawandelanpassungsmaßnahmen besonders an Bedeutung gewinnen. Dieser Nutzen zeigt sich insbesondere in der Bewässerung der Fassadenbegrünung, welche vor allem in länger andauernden Trockenphasen mehr Wasser benötigt, während Grauwasser weiterhin konstant anfällt und das städtische Frischwassernetz an systematisch bedingte Grenzen stoßen kann.

Durch die Wiederverwendung des Grauwassers kann in Zukunft der Wasserverbrauch nachhaltiger gestaltet werden. Dies bietet einerseits Einsparungspotential für die Personen, welche sich dem System bedienen und andererseits fördert es den achtsameren Umgang mit einem wertvollen Gut.

3.2.3. Relevanz grüner Infrastrukturen im urbanen Raum

Grüne Infrastrukturen (GI) – wie z.B. Baumpflanzungen oder Bauwerksbegrünungen (Anmerkung der Autor:innen) – leisten wesentliche Beiträge zur Anpassung urbaner Räume an den Klimawandel, dies geschieht u.a. durch Beschattung, Absorption der eintreffenden Sonnenstrahlung und Kühlung der Umgebungsluft durch Evapotranspiration (IBLB, BOKU Wien & GRÜNSTATTGRAU, 2019). Die exzessive Fragmentierung natürlicher Lebensräume und Trockenperioden beeinträchtigen diese Ökosystemdienstleistungen (Wagner et al., 2013). Deshalb ist es wichtig, dass die Pflanzen, vor allem in Hitzeperioden, ausreichend mit Wasser versorgt werden (Gräf et al., 2021). Dies hat einen höheren Wasserbedarf sowie Pflegeaufwand, wie etwa der manuellen Bewässerung von Stadtbäumen in den Sommermonaten zur Folge. Um die volle Wirkung im wichtigsten Zeitraum (Hochsommer) erfüllen zu können, benötigt klimawirksames Grün bedarfsorientiert Wasser. Einerseits sollen die klimawirksamen Funktionen insbesondere in diesen Zeiten erhalten werden, andererseits darf die Vegetation keinen dauerhaften Schaden davontragen (Winkler et al., 2019). Für den urbanen Raum bedeutet dies sowohl an das jeweilige Mikroklima angepasstes Pflanzenmaterial auszuwählen als auch die vorhandenen Pflanzungen zusätzlich zu bewässern. Je besser die Wasserversorgung der GI ist, desto effektiver können sie das Mikroklima beeinflussen und die volle Wirksamkeit ihrer Ökosystemleistungen entfalten.

Durch zunehmend trockenere Sommer ist auch in unseren Breitengraden eine Zusatzbewässerung an Extremstandorten, wie zum Beispiel Straßenbegleitgrün und Parks notwendig (Eppel et al., 2012). Die Stadt Wien strebt an, bei jedem Neu- bzw. Umbau von Grünstreifen und Baumscheiben Bewässerungsanlagen zu installieren (Hawliczek et al., 2012). Um dem Nutzungskonflikt der Verwendung von Trinkwasser als Gießwasser entgegenzuwirken, braucht es alternative Wasserquellen, um die Versorgung auch in Zukunft nachhaltig gewährleisten zu können.

Die Wiederverwendung von behandeltem (gereinigtem) Grauwasser (häusliches Abwasser ohne Fäkalien) bietet die Möglichkeit, aus einem Abfallprodukt, welches normalerweise in den Kanal geleitet wird, eine Ressource zu machen. Grauwasser stellt hier eine über den Jahresverlauf stabil anfallende Wassermenge bereit (Al-Jayyousi, 2003). Ein Weg, um den Gesamtverbrauch von Wasser zu reduzieren, ist die Substitution des Trinkwassers, in Bereichen in denen keine Trinkwasserqualität erforderlich ist. Das Prinzip „fit-for-purpose“ sieht die Anpassung der Wasserbehandlung auf die tatsächliche Nutzung vor, z.B. Nutzung zur Toilettenspülung oder zur Bewässerung von Pflanzen (Simlat, 2017). Dabei ist darauf zu achten, dass die jeweiligen Bestimmungen der Wasserqualitäten für den Verwendungszweck eingehalten werden. Bei der Verwendung von behandeltem Grauwasser zur Bewässerung grüner Infrastrukturen mit Bodenkontakt, sind die Grundwasserswellenwerte im Rahmen der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser (QZV Chemie GW, 2019). Grundsätzlich ist der Eintritt von Schadstoffen in das Grundwasser untersagt und das Verschlechterungsverbot von Grundwasser und Oberflächengewässer einzuhalten (Helmecke, 2018). Aufbereitetes Wasser muss für die Bewässerung die vorgegebene Wasserqualität aufweisen (ÖWAV, 2016). Der Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) stellt Empfehlungen für Bewässerungswasser zur Verfügung, deren Schwellenwerte bei der Grauwasserverwendung mitberücksichtigt werden müssen. In der Regel wird das Grauwasser sowohl physikalisch als auch biologisch gereinigt, um folgende vier Kriterien zu erfüllen: Hygienische Sicherheit, Ästhetik (Farbe und Geruch), Umweltverträglichkeit und technische bzw. ökonomische Durchführbarkeit (Al-Jayyousi, 2003). Eine Kontaminierung des Bodens sowie des Oberflächen- und Grundwassers muss vermieden werden (Helmecke, 2018). Je nach Zusammensetzung des Grauwassers kommen unterschiedliche Reinigungsmethoden zum Einsatz, um die Vitalität der Pflanzen zu erhalten und die verwendeten Bewässerungsanlagen nicht zu beschädigen

(Verstopfung der Wasserschläuche durch im Wasser vorhandene Schwebstoffe) (ÖWAV, 2001). Im Kapitel 5.3.1 werden die Anforderungen an die Grauwasserwiedernutzung in Österreich näher beschrieben.

3.2.4. Ausgewählte grüne Infrastrukturen des urbanen Raums

Der Fokus der folglich ausgewählten GI bezieht sich auf den urbanen Raum, da die Wirkung der begrünten Flächen inmitten von städtischen Hitzeinseln stärker entfaltet werden kann. Die mit GI verbundenen Ökosystemleistungen wie Kühlung und Luftfiltration werden besonders in stark verdichteten und versiegelten Gebieten benötigt (Pfoser, 2016; Stangl et al., 2019).

Dachbegrünung

Im Bereich der Dachbegrünung wird zwischen extensiven und intensiven Systemen unterschieden. Substrataufbau, Aufbauhöhe, Gewicht, Vegetation und Bewässerung sind zentrale Differenzierungsmerkmale zwischen extensiven und intensiven Dachbegrünungen (Köhler, 2012). Das Prinzip der extensiven Variante sieht vor, dass sich das System bezüglich Wasser- und Nährstoffversorgung weitestgehend selbst erhalten kann. Insofern wird bei extensiven Systemen keine Bewässerung installiert. Die verwendeten Pflanzenarten sind an Trockenstandorte angepasst und können auch Dürreperioden gut überstehen. Nur in der Anwuchsphase der Pflanzen und in besonders ariden Gebieten kommen Bewässerungssysteme ergänzend zum Einsatz (Köhler, 2012; Pfoser, 2016; Zimmermann, 2015). Der Wasserbedarf ändert sich diesbezüglich mit der Etablierung der Vegetation am jeweiligen Standort. Die Bewässerung extensiver Gründächer kann bei trocken-heißer Witterung eine deutliche Kühlleistung erzielen, wenn verdunstungsstarke Kräuter und Gräser-Mischungen eingesetzt werden (Walker et al., 2016). Intensive Dachbegrünungen werden hingegen meistens zusätzlich bewässert, um eine optimale Wasserversorgung zu gewährleisten (Abbildung 3). Diese Systeme weisen zwar einen wesentlich höheren Wasserbedarf als extensive Begrünungen auf, jedoch ist deren Kühlleistung deutlich höher (Köhler, 2012; Zimmermann, 2015).

Abbildung 3: Intensive Dachbegrünung mit Photovoltaik Anlage, Universität für Bodenkultur Wien (© Hofbauer 2021).



Fassadenbegrünung

Die Kategorisierung von Fassadenbegrünungen umfasst wesentlich zwei unterschiedliche Bauweisen: bodengebunden und wandgebunden (Pfoser, 2016). Bei bodengebundenen Fassadenbegrünungen haben entweder die Pflanzen selbst Kletterorgane entwickelt (Selbstklimmer: kommen ohne weitere Hilfe in die Vertikale), oder es wird ihnen das Wachsen durch eine Kletterhilfe aus Seilen, Stäben, Gittern oder Netzen entlang der Fassade ermöglicht (Abbildung 4). Je nach Wuchsform der Pflanze (Schlinger, Winder, Sprossranken, Spreizklimmer) befinden sich unterschiedliche Klettersysteme am Markt (GREEN4CITIES et al., 2019). Die Pflanzen und deren Wurzeln sind mit dem Erdreich direkt in Kontakt. Je nach Wuchshöhe, verfügbaren Wurzelraum und bautechnischen Vorhaben müssen entsprechende Arten und Klettersysteme geplant werden (Köhler, 2012). Durch den Bodenanschluss ist i.d.R. keine Bewässerung erforderlich, die Wasserversorgung erfolgt durch den natürlichen Niederschlag (Köhler, 2012; Pfoser, 2016; Schmauck, 2019). Eine weitere Form der Fassadenbegrünung stellt hier die troggebundene Begrünung mit Kletterpflanzen dar (ÖNORM L1136:2021 04 01, 2021): Die Pflanzbehälter, in denen die Pflanzen wurzeln, können hier entweder gebäudenah in der Erdgeschoßzone aufgestellt werden, oder befinden sich montiert an der Gebäudewand in der Vertikalfläche (siehe dazu weiter unten).

Abbildung 4: Bodengebundene Fassadenbegrünung - Rankhilfe mittels Stahlgerüst (Gräf et al., 2021).



Wandgebundene Fassadenbegrünungen, auch bekannt als „Living Walls“ (LWS), bestehen aus Pflanztrögen, -kästen oder -modulen, die auf eine Unterkonstruktion oder speziell ausgebildeten Fassaden montiert werden (Abbildung 5). Bei fassadengebundenen Systemen ist die Aufbaudicke der Substrate aus statischen Gründen gering, weshalb der Raum für die Wasserspeicherung sehr begrenzt ist. Eine Bewässerung dieser Systeme ist grundsätzlich erforderlich und erfolgt in der Regel über Tropf- bzw. Sprühschläuche (Eppel, 2015).

Abbildung 5: Wandgebundene Fassadenbegrünungen - linkes Bild: teilflächiger Vegetationskörper, rechtes Bild: vollflächiger Vegetationskörper (Gräf et al., 2021)



Troggebundene Fassadenbegrünung ermöglicht ohne Bodenanschluss die Begrünung von vertikalen Flächen (Begrünung von Gebäuden ausgehend von z.B. Gehsteigen, Terrassen, Balkonen). Darunter sind Pflanzbehälter zu verstehen, die mit einem technischen Aufbau ähnlich einer Dachbegrünung bestehend aus einer Filter-Drainage-Schicht und einer Vegetationstragschicht (technisches Substrat) ausgestattet sind. Darin werden Kletterpflanzen gepflanzt (Abbildung 6). Benötigen diese aufgrund ihrer Kletterstrategie eine Kletterhilfe, ist diese den Pflanzen zur Verfügung zu stellen, damit sie in die Vertikale wachsen. Die Wasserverfügbarkeit kann sehr unterschiedlich ausfallen, da diese aufgrund der Größe des Pflanzbehälters stark variieren kann. Hierbei kommen spezielle Substrate zum Einsatz, die eine hohe Speicherfähigkeit besitzen. Eine Bewässerung dieser Trogbepflanzungen ist unumgänglich (Medl et al., 2017).

Abbildung 6: Troggebundene Fassadenbegrünung mit einem BeRTA- Pflanztrog: Ein modulares System des Forschungsprojekts 50 grüne Häuser (© Hofbauer 2021)



Park- und Grünflächen

Parkflächen stellen großräumige Begrünungen dar (Abbildung 7). Hierbei werden Wiesen-/Rasen-, Stauden-, Gehölz- und Strauchflächen im urbanen Raum hinzugezählt (ÖNORM L1112:2010 09 01, 2010). Studien ergaben (Sanusi et al., 2017; Upmanis et al., 1998), dass die Kühlleistung von Parks durch eine hohe Grünflächendichte bedingt ist. Je mehr Biomasse desto mehr Transpirationsleistung ist möglich, desto höher die Senkung der Umgebungstemperatur. Zusätzlich erhöht die, durch dichte Baumkronen entstehende Schattenwirkung, die Kühlleistung (Sanusi et al., 2017; Stangl et al., 2019). In diesem Zusammenhang wird von „Park Cool Islands“ (PCIs) gesprochen, diese sind umso stärker, je größer die Parkfläche ist (Oliveira et al., 2011; Upmanis et al., 1998). Park- und Grünflächen können ihre Kühlleistung dann optimal entfalten, wenn die Vegetation ausreichend mit Wasser versorgt ist. Der Wasserbedarf ist demnach stark von der Art der Fläche (Rasen, Stauden, Gehölzflächen) abhängig (Stangl et al., 2019).

Abbildung 7: Türkenschanzpark in Wien (© Hofbauer 2021)



Stadtbäume

Je nach Pflanzenart und -sorte weisen Bäume unterschiedliche Charakteristika bezüglich der Blatt- und Kronenform auf. Je größer deren Fläche ausfällt, desto stärker ist die Kühlleistung, die durch Transpiration und Beschattung entsteht. Dementsprechend spielen Stadtbäume eine wesentliche Rolle bei der Minimierung städtischer Hitzeinseln (Kong et al., 2017; Sanusi et al., 2017). Der Wasserbedarf von Bäumen ist artabhängig. Im Durchschnitt benötigt ein 10 m hoher Baum jedoch 133 L Wasser pro Tag, das er sich über die Wurzeln aus dem Boden holen muss (Kramner 1987). Wenn der für einen mittelgroßen Stadtbaum verfügbare Platz mit 1,2 m x 1,2 m x 0,9 m angenommen wird und mit dem für städtische Lebensräume typischen kompakten Boden gefüllt ist, kann der Baum das gesamte gespeicherte Wasser innerhalb von nur 2 bis 3 Stunden verbrauchen (Vrecenak et Herrington 1984). Problematisch sind versiegelte Flächen, welche das Wasser direkt in den Kanal leiten und in weiterer Folge dieses nicht vom Boden aufgenommen werden kann. Lokale Maßnahmen bestehen aus technischen Lösungen, die darauf abzielen, das Regenwasser vor Ort oder in der Nähe zurückzuhalten. Beispiele dafür sind der Einsatz geeigneter Substrate und die ausreichende Versorgung mit Oberflächenabflusswasser (Wagner et al., 2013). Während längerer Trockenperioden werden Stadtbäume bedarfsorientiert bewässert.

Abbildung 8: Begrünungsinsel, Staudenbeet mit Baumpflanzung in der Neubaugasse, Wien (© Hofbauer 2021)



Bewässerungsarten

Die Art der Bewässerung ist ein wesentlicher Faktor für eine erfolgreiche Wasserversorgung der Grünen Infrastruktur. Durch die Menge des zugeführten Wassers werden die klimawirksamen Funktionen begünstigt: Soll ein starker Kühlungseffekt erzeugt werden, so erhöht sich die Bewässerungsmenge üppiger Fassadenbegrünungen (Köhler, 2012). Studien der Bayrischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (Eppel et al., 2012) ergaben, dass eine Automatisierung von Bewässerungsanlagen erst dann Arbeit einspart und eine ressourcenschonende Wassernutzung gewährleistet, wenn diese adäquat und standortgemäß geplant, errichtet und gewartet werden (Eppel et al., 2012; GREEN4CITIES et al., 2019; Zimmermann, 2015). Zentrale Elemente der Bewässerung sind die Steuerung und das Verfahren, mit dem das Wasser die Pflanze erreicht: Die Steuerung bestimmt die Menge der Wassergabe und kann, als Alternative zur händischen Bewässerung, vollautomatisiert mithilfe von Bewässerungscomputern erfolgen (Eppel et al., 2012). Zusätzlich können Sensoren im Boden und in der Luft (Wetterstation) mit der Steuerung verbunden werden. Diese ermitteln u.a. Daten zur aktuellen Bodenfeuchtigkeit, Lufttemperatur sowie Niederschlagsmenge und ermöglichen eine bedarfsgerechte Wassergabe (Eppel et al., 2012; GREEN4CITIES et al., 2019; Zimmermann, 2015). Grundsätzlich kann zwischen folgenden Bewässerungsverfahren unterschieden werden (ÖNORM EN 13635, 2001):

- Tropfbewässerung (Wasser wird in Form von Tropfen ausgegeben): Tropfrohr, Tropfband
- Mikrobewässerung (Wasser wird in Form von Sprühwasser oder Nebel ausgegeben)
- Beregnungsanlagen (Wasser wird in Form von Wasserstrahlen ausgegeben): Einfachregner, Mehrfachregner etc.

Die Tropfbewässerung ermöglicht eine gezielte Bewässerung einzelner Pflanzen und kann sowohl ober- als auch unterirdisch als Unterflurbewässerung erfolgen. Diese eignet sich besonders für Fassadenbegrünungen sowie Dachbegrünungen und kleinflächigere Grünflächen (Abbildung 9) (Eppel et al., 2012).

Abbildung 9: Bewässerungsarten – Bild links: Baumpflanzung mit einem sogenannten „Tregator“ zur Bewässerung (© Hofbauer); Bild rechts: Baumneupflanzung mit zusätzlicher Tröpfchenbewässerung (Gräf et al., 2021)



Im Zusammenhang mit der Wiedernutzung von behandeltem Grauwasser sind zusätzliche Faktoren zu bedenken. Um Verstopfungen in der Bewässerungsanlage zu vermeiden, ist laut ÖWAV-AB 011 (2001) bei der Grauwasserreinigung auf die Entfernung von Feststoffen zu achten (siehe Kapitel 4.1.2). Je nach der weiteren Nutzung kommen unterschiedliche Reinigungsstufen zum Einsatz (DWA-M 277:2017-10, 2017). Die Art der notwendigen Bewässerungstechnologie hängt von der bakteriologischen Belastung ab, die nach der Reinigung noch nachweisbar ist (ÖNORM EN 16941-2:2017, 2017). Unterschieden werden grundsätzlich Sprühanwendungen oder Anwendungen ohne Versprühen. Es kann auch eine unter- oder oberirdische Tröpfchenbewässerung eingesetzt werden. Das Rohrsystem wird unterirdisch verlegt und bewässert die Pflanzen durch kapillaren Aufstieg direkt im Wurzelraum. Im Gegensatz dazu, werden bei der oberirdischen Tropfbewässerung die Rohre auf dem Substrat verlegt (Fricke, 2018).

Definition Grauwasser

Grauwasser umfasst einen Sammelbegriff für häusliches Abwasser, das frei von Fäkalien (Kot und Urin) ist. Dabei können folgende Quellen unterschieden werden: Brauchwasser aus Maschinenabwässern (Spül-, Waschmaschine), Bad (Dusche, Badewanne, Handwaschbecken) und Küche (Abbildung 10). Es wird zwischen leicht und grob verschmutztem Grauwasser unterschieden, wobei Ersteres durch das Fehlen von Küchenabwässern definiert wird (ÖNORM EN 16941-2:2017, 2017). Demographische Faktoren (Wohndichte), Lebensstil (Art der verwendeten Reinigungsprodukte) bzw. geographische Lage beeinflussen die Zusammensetzung des Grauwassers und dessen Inhaltsstoffe. Global gesehen ist Grauwasser mit 60 – 80 % der größte Anteil des täglich produzierten Abwassers. In Österreich wird das Volumen pro Person und Tag mit mindestens 60 L angenommen (ÖNORM EN 16941-2:2017, 2017). Durch die nur leichte Verschmutzung im Vergleich zum gesamten Abwasser (8 % des gesamten biologischen Sauerstoffbedarfs, 9 % des Gesamtstickstoffs und 22 % des Gesamtphosphors) ist dieser Stoffstrom leicht zu reinigen und für die Wiederverwertung aufzubereiten (Masi et al., 2020).

Abbildung 10: Abgrenzung Begriff Grauwasser und Schwarzwasser (Icons: Kiranshastry, photo3idea_studio, Creaticca Creative Agency, freepik at flaticon.com)



Neben gelösten Stoffen wie Tensiden aus seifenhaltigen Produkten (Duschgel, Shampoo, Spülmittel etc.) sind Feststoffe, Salze und Bakterien im Grauwasser enthalten. Für die sichere Wiedernutzung gibt die ÖNORM EN 16941-2, das Merkblatt DWA M 277 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfälle e.V. (DWA) sowie die Verordnung der Europäische Union zur Wasserwiederverwendung (EU 2020/741) je nach Anwendungsart spezifische Parameter und Grenzwerte vor. Die Reinigung von Grauwasser folgt grundsätzlich den folgenden Stufen: mechanische Behandlung und biologische Reinigungsstufe (DWA M 277). Neben den klassischen chemischen und physikalischen Parametern sind für die Wiedernutzung vor allem die mikrobiologischen Parameter zu beachten. Diese sind sowohl in der ÖNORM EN 16941-2 als auch im Merkblatt der DWA M 277 maßgeblich für die Art der Wiedernutzung. In Österreich werden dabei vier Nutzungskategorien unterschieden:

- (1) Sprühanwendungen wie Hochdruckreinigung, Gartensprenger und Autowäsche
- (2) WC Spülung
- (3) Gartenbewässerung
- (4) Waschmaschine

Für die Anwendung im öffentlichen Raum schreibt die DWA jedenfalls eine nachgeschaltete Hygienisierung vor.

3.3. Motivation und Ziel

Gebäudebegrünung und gebäudenahe Grüninseln haben einen positiven Einfluss auf das städtische Mikroklima und wirken Phänomenen wie etwa dem Urban Heat Island Effekt entgegen. Bislang gibt es keine Studien, welche die Eignung und Konstruktionsaspekte der Bewässerung von Grünfassaden mittels Grauwasser behandeln. Besonderes Augenmerk ist bei diesem Thema unter anderem auch auf die Eignung des STREBEL behandelten Grauwassers (STREBEL bGW) zur Bewässerung und zur Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen und organischen Bestandteilen zu legen. Die Bewässerung von Grünfassaden mit Grauwasser ist somit mit einigen Herausforderungen verbunden.

Technisch-ausgereifte Systemlösung

Die bestehende Anwendung von Abwasser-Wärmerückgewinnung mit anschließender Verwertung des STREBEL bGW wirft eine Reihe von bautechnisch-haustechnischen Fragestellungen auf.

Ziel

Eine technisch ausgereifte Systemauslegung zu schaffen, sodass Nutzer:innen uneingeschränkt in ihrem Verhalten leben können, die Wärme rückgewonnen wird, und die Verwertung des STREBEL bGW die Bewässerung von Pflanzen in einer für sie optimalen Umgebung ermöglicht. Ziel ist die Weiterentwicklung und Erprobung des STREBEL Grauwasserverwertungsverfahrens im Labormaßstab hinsichtlich gleichzeitiger thermischer und stofflicher Verwertung von Grauwasser.

Hohe Energieeffizienz

Damit Gebäude einen Plus-Energie-Standard erreichen können, ist eine hohe Energieeffizienz besonders entscheidend. Durch erhöhte Anforderungen (erhöhter Kühlbedarf, größere Anzahl von Geräten in Haushalten, etc.) ist eine steigende Tendenz an Energiebedarf zu verzeichnen, die durch moderne und effiziente Technik eindämmbar ist. Auf Seiten der Energiebereitstellung sind alle Möglichkeiten der erneuerbaren Energiegewinnung auszuloten. Eine besondere Rolle spielen Photovoltaik- und Wärmepumpensysteme, wobei die Wärmerückgewinnung aus Grauwasser als „Energiequelle“ aktuell eine sehr untergeordnete Rolle einnimmt.

Ziel

Ein wartungsarmes und dauerhaftes Konzept zu entwickeln und entsprechende Lösungen, um die Anforderungen der EU-Gebäuderichtlinie zu erreichen.

Optimiertes Ressourcenmanagement: sorgsamer Umgang mit der Ressource „Wasser“

Ein optimierter Umgang mit der Ressource Wasser steht im Mittelpunkt der Untersuchungen. Nach einer erfolgten Reinigung des anfallenden Grauwassers werden passende Anwendungen gesucht, um den Wasserverbrauch des Plus-Energie-Gebäudes der Zukunft zu beschränken. Im Zuge eines optimierten Ressourcenmanagements wurden Pflanzen ermittelt, welche sich für eine Bewässerung mit Grauwasser eignen.

Ziel

Das Entwickeln verschiedener Einsatzmöglichkeiten des anfallenden Grauwassers, wie etwa zum Zweck der Gebäudebegrünung. Die Bestimmung der pflanzlichen Anwendungsgrenzen bei Einsatz von unbehandeltem und behandeltem Grauwasser für Bewässerungszwecke, sowie die Erstellung einer Liste an Pflanzen, die sich für die Bewässerung mit behandeltem Grauwasser eignen.

Erfolgreiche Klimawandelanpassung

Besonders in urbanen Gebieten zeigt sich deutlich, dass aufgrund des Klimawandels zunehmend unbehagliche Situationen, wie etwa sehr heiße Sommertage und -nächte, auftreten. Um einen gesundheitsfördernden Innen- und Außenaufenthaltskomfort sicherstellen zu können, werden Klimawandelanpassungsmaßnahmen an Bedeutung gewinnen. Dieser Nutzen zeigt sich insbesondere in der Installierung gebäudenaher Begrünung und dessen Bewässerung, welche vor allem in länger andauernden Trockenphasen einen höheren Wasserbedarf aufweisen. Grauwasser stellt eine konstant anfallende Ressource dar, während das städtische Frischwassernetz an systematisch bedingte Grenzen stoßen kann.

Ziel

Klimawandelanpassungsmaßnahmen auf Basis der Nutzungsmöglichkeiten von behandeltem Grauwassers entwickeln und erproben. Die Betrachtung einer gebäudenahen Begrünung (Dach-, Fassadenbegrünung und Straßenbäume), die mit dem anfallenden, behandelten Grauwasser bewässert werden kann sowie die Untersuchung der Mikroklimaeffekte auf das Gebäude und dessen Umgebung durch die geplante Begrünung.

4 Projektinhalt

4.1. Vorgangsweise und Methodik

4.1.1. Technische Systementwicklung

Analyse und Simulation des anfallenden Grauwasseraufkommens und deren Kontinuität über den Tagesverlauf

Aufgrund fehlender Datengrundlage der Referenzgebäude, sowie einer wissenschaftlichen Grundlage zum Grauwasseraufkommen wurde die ursprünglich angedachte Methode einer Simulation des Grauwasseraufkommens im Tagesverlauf verworfen und die anfallenden Grauwassermengen mithilfe einer Literaturrecherche untersucht. Es wurden verschiedene Lastprofile identifiziert, zusammengefügt, verglichen und analysiert. Dabei wurde zwischen dem Nutzungsbereich (Wohnen und Nicht-Wohnen) sowie den Quellen (Waschmaschine, Dusche, etc.) unterschieden.

Bei der Literaturrecherche wurde eine Kombination aus systematischer Recherche und einer anschließenden Schneeballsystem-Recherche angewandt.

Abdeckungspotential der rückgewonnenen Energie für den Warmwasserwärmebedarf und Kühlenergiebedarf

Im Rahmen des Projekts erfolgte eine Analyse zur Einschätzung des Abdeckungspotentials des Warmwasserwärmebedarfs, des Heizwärmebedarfs und des Kühlenergiebedarfs von Gebäuden, welche mit der gegenständlichen Grauwasserverwertungsanlage ausgestattet sind. Im Zuge der Anlagenentwicklung und Grundlagenerhebung wurde deutlich, dass die Anlage am besten zur vollständigen Abdeckung des Warmwasserwärmebedarfs samt Zirkulationsverluste und sonstiger Verluste ausgelegt werden soll, nachdem der Warmwasserbedarf ebenso wie der korrelierende Grauwasser-Anfall grundsätzlich im Jahresverlauf als konstant angenommen werden können. Dadurch wird ein kontinuierlicher Betrieb der Anlage im Jahresverlauf möglich, und das täglich anfallende Grauwasser wird ebenso laufend verwertet. Folglich können eine höhere Anlageneffizienz und eine verbesserte Wirtschaftlichkeit durch die optimierten Betriebsbedingungen und die hohe Anlagenauslastung erreicht werden. Eine Abdeckung des Heizwärmebedarfs hingegen wäre nur in der Heizsaison interessant und es ist zudem grundsätzlich kein ursächlicher Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und Grauwasseranfall anzunehmen.

Die auf Basis der Projektergebnisse optimale thermische Verwertung des Grauwassers dient somit im Sinne eines Kreislauf-Systems der Bereitstellung von frischem Warmwasser und in einer zweiten Verwertungsstufe zur Abdeckung eines gewissen Anteils des Kühlenergiebedarfs. Der Deckungsbeitrag ist dabei insbesondere vom anfallenden Grauwasser und dem Kühlenergiebedarf des Gebäudes abhängig. Die verfügbare Kühlenergie kann beispielsweise zur Stützkühlung verwendet werden, eine Kältemaschine unterstützen oder zur alleinigen Kühlung gewisser Teilbereiche eines Gebäudes. Dies wird anhand des folgenden Beispiels demonstriert:

Für ein Wohngebäude mit 200 Personen wird ein personenbezogener Warmwasserbedarf von 60 Liter pro Tag angenommen, was 4.380.000 Liter pro Jahr entspricht. Die Grauwasseranlage wird so dimensioniert, dass sie den gesamten Warmwasserwärmebedarf inklusive sämtlicher Verluste

abdecken kann. Die resultierende Grauwassermenge würde eine Kühlleistung der Grauwasserverwertungsanlage in der Größenordnung von 12 kW ermöglichen. Bei einer angenommenen jährlichen Laufleistung im Kühlbetrieb von 500 Betriebsstunden würde dies einer bereitgestellten jährlichen Kühlenergie von 6.000 kWh/a entsprechen. Auf Basis einer durchschnittlichen Wohnfläche pro Person in der Gemeindegrößenklasse Wien für das Jahr 2020 von 36,6 m² (Statistik Austria, 2021) kann eine Gesamt-Wohnfläche von 7.320 m² für das Beispielgebäude für 200 Personen angenommen werden. Folglich wäre für das gesamte Gebäude eine flächenspezifische Stützkühlung von ca. 1,6 W/m² erreichbar oder eine Kühlleistung von 50 W/m² für eine Gebäudeteilfläche von bis zu 240 m², was etwa einer Gewerbefläche in der Sockelzone entsprechen könnte.

Untersuchung der technischen Systemauslegung aller Projektkomponenten auf Basis der im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse

Die Untersuchung zielt darauf ab, alle Aspekte des technischen Systems der STREBEL Grauwasserverwertungsanlage (STREBEL GWVA) zu überprüfen und zu bewerten. Dazu gehören folgende Schritte:

1. Analyse der gesammelten Daten: Die im Verlauf des Projekts gesammelten Informationen und Daten über die STREBEL GWVA werden ausgewertet und analysiert. Hierbei können beispielsweise Messwerte, Leistungsdaten, Effizienzstatistiken oder Fehlerprotokolle berücksichtigt werden.
2. Überprüfung der Komponenten: Alle einzelnen Komponenten der Anlage, wie zum Beispiel Pumpen, Filter, Speichertanks, Wärmepumpe usw., werden hinsichtlich ihrer Leistung, Funktionalität und Zuverlässigkeit untersucht. Dabei werden mögliche Verbesserungen oder Optimierungen identifiziert.
3. Bewertung der Systemintegration: Es wird überprüft, wie gut die verschiedenen Komponenten der STREBEL GWVA zusammenarbeiten und ob es Möglichkeiten zur Verbesserung der Systemintegration gibt. Dies kann die Effizienz, den Energieverbrauch, die Bedienungsfreundlichkeit oder andere Faktoren betreffen.
4. Anpassung an gewonnene Erkenntnisse: Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Projekt werden Empfehlungen zur Anpassung oder Optimierung der technischen Systemauslegung gegeben. Hierbei können beispielsweise Änderungen an der Größe oder Anzahl der Komponenten, der Steuerung oder der Wartungsroutinen vorgeschlagen werden.

Das Ziel dieser Untersuchung besteht darin, sicherzustellen, dass die technische Auslegung aller Projektkomponenten der STREBEL GWVA den Anforderungen entspricht, effizient arbeitet und die gewünschten Ergebnisse liefert.

4.1.2. Analyse des STREBEL behandelten Grauwassers zur Bestimmung der pflanzlichen Anwendungsgrenzen

Grauwasseranalyse zur Bestimmung der pflanzlichen Anwendungsgrenzen

Im Zuge des Arbeitspakets „Filtratanalyse zur Bestimmung der pflanzlichen Anwendungsgrenzen“ wurden an der Universität für Bodenkultur Wien durch das Institut für Siedlungswasserbau, Industrierewasserwirtschaft und Gewässerschutz Laboranalysen des anfallenden Grauwassers der Referenzanlage (in Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt) sowie durch das Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau zwei Pflanzversuche durchgeführt. Die Referenzanlage diente zur Bereitstellung von STREBEL behandeltes Grauwasser, welches für die gegenständlichen Versuche entnommen werden konnte. Ziel war zu evaluieren,

- welche chemischen und mikrobiologischen Inhaltsstoffe im Grauwasser enthalten sind, und
- inwiefern die Bewässerung mit behandeltem und unbehandeltem Grauwasser die pflanzenphysiologischen Parameter (relativer Chlorophyllgehalt, stomatäre Leitfähigkeit) sowie das Wachstum und die Vitalität der Pflanzen beeinflusst.

Aus diesen Erkenntnissen wurde eine Liste von Pflanzenarten erstellt, die sich für eine Bewässerung mit Grauwasser eignen.

Methode der Laboranalysen zur Untersuchung des Grauwassers

Um Aussagen über die Wasserqualität für die Wiedernutzung zur Grünraumbewässerung treffen zu können, wurde eine Parameterliste erstellt (Tabelle 1). Diese Liste beinhaltet nachweisbare Parameter für die Wiedernutzung wie in der ÖNORM EN 16941-2 beispielsweise angeführt, sowie Parameter aus der wissenschaftlichen Literatur, um die Ergebnisse mit internationalen Studien (Boano et al., 2020) vergleichen zu können. Da die zu untersuchenden Parameter von der Nutzung des Grauwassers abhängig sind, wurden zusätzlich Parameter mit Interesse für das Pflanzenwachstum gewählt.

Tabelle 1: Parameterliste zur gesamtheitlichen Charakterisierung von Grauwasser (© Pucher 2021)

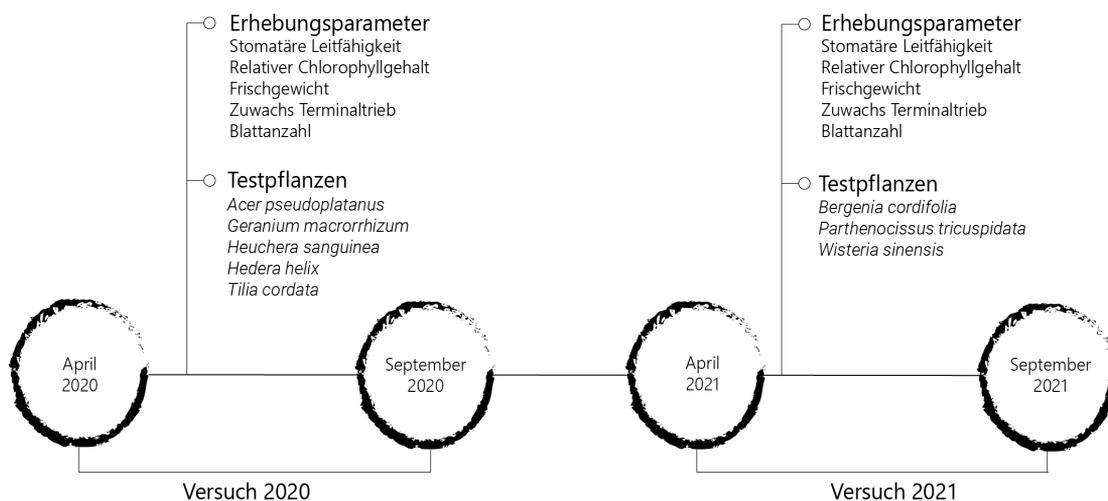
Chem. & physik. Parameter		Mikroelemente	
Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB ₅)	(mg/l O ₂)	Cl	(mg/l)
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	(mg/l O ₂)	B	(mg/l)
Gesamthärte	(°dH)	Mn	(mg/l)
Leitfähigkeit	(µS/cm)	Cu	(mg/l)
pH-Wert	(-)	Fe	(mg/l)
Tenside anionisch	(mg/l)	Mo	(mg/l)
Tenside kationisch	(mg/l)	Ni	(mg/l)
Tenside nichtionisch	(mg/l)	Zn	(mg/l)
Organischer Kohlenstoff (TOC)	(mg/l)	Cd	(mg/l)
Partikelgehalt (AFS)	(mg/l)	Co	(mg/l)
Abgesetzte Stoffe	(ml/l)	Cr	(mg/l)
gelöster Sauerstoff	(mg/l)	Pb	(mg/l)
Trübung	NTU	Al	(mg/l)
Makroelemente		Na	(mg/l)
NO ₃ ⁻	(mg/l)	As	(mg/l)
NH ₄	(mg/l)	Fe	(mg/l)
N ges.	(mg/l)	Mikrobiologische Parameter	
P ges.	(mg/l)	Ges. Coliforme	CFU/100ml
K	(mg/l)	E.Coli	CFU/100ml
Ca	(mg/l)	Enterokokken	CFU/100ml
Mg	(mg/l)	Legionellen	CFU/100ml
S (SO ₄)	(mg/l)		

Methode der Pflanzenversuche

Ziel der Pflanzenversuche war es, herauszufinden, ob die selektierten Arten für eine Bewässerung mit Grauwasser geeignet sind. Dazu wurde Frischwasser (FW), behandeltes Grauwasser (bGW) und unbehandeltes Grauwasser (uGW) zur Bewässerung verwendet. Die Untersuchungen umfassten jeweils eine gesamte Vegetationsperiode (April bis September) und fanden 2020 sowie 2021 statt (Abbildung 11). Nach Abschluss der Aufnahmen und Datenerhebungen vor Ort (Standort Universität für Bodenkultur Wien, Wien) wurden Teile der Testpflanzen auf einen weiteren Standort nach Wiener Neustadt transportiert, um diese fortführend mit Grauwasser zu bewässern und Vitalitätskontrollen zu unterziehen. Beide Pflanzenversuche wurden zusätzlich zum Projekt im Zuge zweier Masterarbeiten beforscht:

- Hofbauer, Katharina: Innovative Bewässerung durch Grauwasserrecycling – Untersuchung der Eignung von Grauwasser zur Bewässerung gebäudenaher Begrünung (2022). Masterarbeit. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau. Universität für Bodenkultur Wien.
- Elbert, Marian: Die Eignung von Grauwasser für die Bewässerung grüner Infrastrukturen (2022). Masterarbeit. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau. Universität für Bodenkultur Wien.

Abbildung 11: Zeitlicher Ablauf und Erhebungsparameter der Pflanzversuche 2020 und 2021



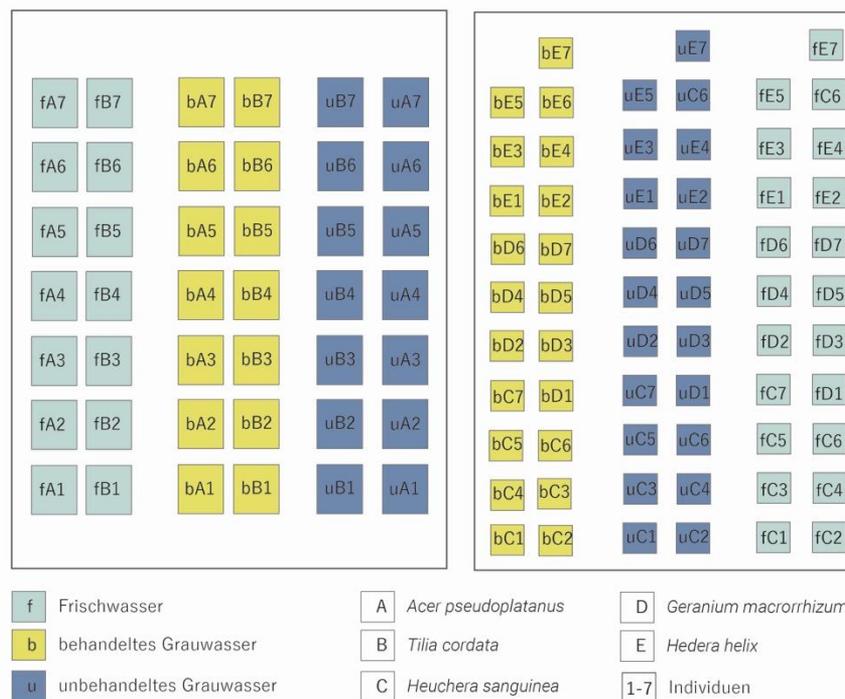
Versuchsaufbau 2020

Der erste Pflanzenversuch wurde im Zeitraum von April bis September 2020 in einem Gewächshaus der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt. Die Pflanzen waren unter Laborbedingungen keinem natürlichen Niederschlag ausgesetzt. Fünf Pflanzenarten wurden über diesen Zeitraum hinweg in je drei Bewässerungsgruppen mit a) Frischwasser (FW/f, Kontrollgruppe), b) behandeltem Grauwasser aus der Referenzanlage in Wiener Neustadt (bGW/b) und c) unbehandeltem Grauwasser (uGW/u), das synthetisch im Labor des Instituts für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz hergestellt wurde, bewässert. Infolgedessen erfolgte eine Untersuchung der stomatären Leitfähigkeit, des relativen Chlorophyllgehalts, des Zuwachses der Testpflanzen sowie der Bodenveränderungen. Die Auswahl der Pflanzen bezog sich auf Arten der gebäudenahen Begrünung, die häufig im urbanen Raum als Straßenbäume oder in Fassadenbegrünungen eingesetzt werden.

Insgesamt wurden 105 Testpflanzen mit jeweils sieben Individuen pro Bewässerungsgruppe untersucht (Abbildung 12):

- *Acer pseudoplatanus* (Bergahorn) | A
- *Tilia cordata* (Winterlinde) | B
- *Geranium macrorrhizum* (Balkan-Storchschnabel) | C
- *Heuchera sanguinea* (Purpurglöckchen) | D
- *Hedera helix* (Gemeiner Efeu) | E

Abbildung 12: Anordnung der Testpflanzen im Versuchsaufbau des Pflanzenversuches 2020



Die Straßebäume (*A. pseudoplatanus* und *T. cordata*) wurden in 11 L Töpfe, die Pflanzen für Fassadenbegrünungen (*G. macrorrhizum*, *H. helix* und *H. sanguinea*) in 1,5 L Töpfe gepflanzt und mit einem intensiven Containersubstrat (Mischung aus Erde, Kompost, Sand und Ziegelsplitt) der Firma Sonnenerde kultiviert. Im Gewächshaus wurden zwei Tanks installiert, die jeweils mit bGW und uGW befüllt waren. Mithilfe von Wasserpumpen der Type FG-GP 3.200 (Bornheim, Deutschland) wurde jeder Topf einzeln mit druckkompensierten Tropfspeießen jeweils Montag, Mittwoch, Freitag und Sonntag für zwei Minuten um acht Uhr morgens bewässert (Abbildung 13).

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

Abbildung 13: Bewässerungssystem im Gewächshaus mit Tropfspießen zur separaten Bewässerung jedes einzelnen Topfes

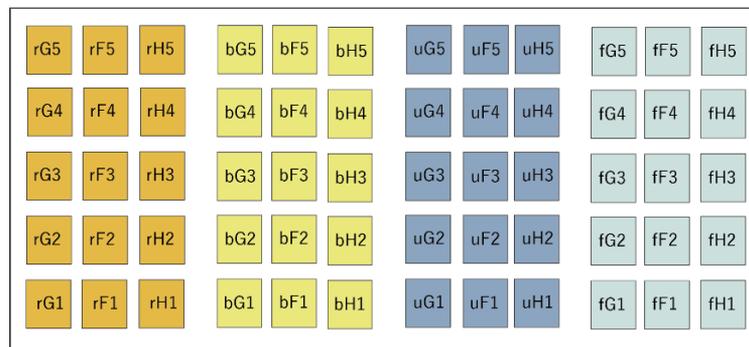


Versuchsaufbau 2021

Der zweite Pflanzenversuch fand zwischen April und September 2021 als Freilandexperiment statt, um realistische Bedingungen durch den Einfluss von Niederschlag zu schaffen. Es wurden drei Arten, die häufig in Fassadenbegrünungen eingesetzt werden (*Wisteria sinensis*, *Parthenocissus tricuspidata* und *Bergenia cordifolia*), getestet. Diese wurden in vier Bewässerungsgruppen eingeteilt: Frischwasser (FW/f), behandeltes Grauwasser (bGW/b), unbehandeltes Grauwasser (uGW/u) und Regenwasser (RW/r). Wobei letztere Gruppe keine externe Bewässerung erhielt, sondern nur durch den natürlichen Niederschlag bewässert wurde. Alle anderen Gruppen wurden zusätzlich zum Niederschlag bewässert. Der Versuch umfasste 60 Testpflanzen mit jeweils fünf Individuen pro Bewässerungsgruppe (Abbildung 14).

- *Wisteria sinensis* (Chinesischer Blauregen) | F
- *Parthenocissus tricuspidata* (Dreilappige Jungfernrebe) | G
- *Bergenia cordifolia* (Herzblättrige Bergenie) | H

Abbildung 14: Anordnung der Testpflanzen im Versuchsaufbau des Pflanzenversuches 2021



f Frischwasser	F <i>Wisteria sinensis</i>
b behandeltes Grauwasser	G <i>Parthenocissus tricuspidata</i>
u unbehandeltes Grauwasser	H <i>Bergenia cordifolia</i>
r Regenwasser	1-5 Individuen

W. sinensis, *P. tricuspidata* und *B. cordifolia* wurden in 11 L Töpfe mit dem gleichen intensiven Containersubstrat wie Versuch 2020 bepflanzt (siehe Versuch 2020). Der Aufbau der Bewässerung erfolgte für die behandelte (bGW) und unbehandelte Grauwassergruppe (uGW) nach demselben Prinzip wie im Jahr 2020 (siehe Versuch 2020). Die Bewässerung der Frischwassergruppe (FW) erfolgte in diesem Versuch mit dem Bewässerungscomputer Solem BL-IP (Solem, Wien, Österreich). Alle zwei Tage wurde um 08:00 Uhr morgens für zwei Minuten mittels druckkompensierter Tropfspeißer bewässert.

- 8 L/h= 1,06 L pro Woche/Topf Tropfspeißer bei *Bergenia cordifolia*, *Parthenocissus tricuspidata* und *Wisteria sinensis*

Erhebungsparameter

Stomatäre Leitfähigkeit und relativer Chlorophyllgehalt

Die stomatäre Leitfähigkeit ist ein Indikator für den Öffnungsgrad der Spaltöffnungen (Stomata), über die, der für die Photosynthese notwendige Gasaustausch, stattfindet. Je höher die stomatäre Leitfähigkeit, desto mehr Wasser wird über die Spaltöffnungen an die Umwelt abgegeben. Bei einem hohen Öffnungsgrad der Spaltöffnungen transpirieren Pflanzen mehr Wasser, was eine zusätzliche Kühlung für ihre Umgebung bewirkt. Das Chlorophyll, das in den Blättern u.a. für die grüne Färbung zuständig ist, ermöglicht es der Pflanze, die Spektralbereiche des Lichts zu absorbieren, die für die Photosynthese notwendig sind. Je höher der Chlorophyllgehalt, desto effizienter kann die Pflanze das benötigte Licht absorbieren (Kadereit et al., 2014). Die stomatäre Leitfähigkeit wurde an jeweils einem voll entwickelten, vitalen Blatt mit einem SC-1 Leaf Porometer (Metergroup, München, Deutschland) jeweils an sonnigen Tagen gemessen. Die Erhebung des relativen Chlorophyllgehalts erfolgte mit einem SPAD 502 (Konica Minolta Sensing, Osaka, Japan). Dazu wurden pro Pflanze fünf vitale Blätter gemessen und der Mittelwert daraus errechnet.

Zuwachs: Frischgewicht, Zuwachs Terminaltrieb und Blattanzahl

Um die Auswirkungen der Grauwasserbewässerung auf die Entwicklung und das Wachstum der Pflanzen beurteilen zu können, wurde der Zuwachs in Form von Frischgewicht, Länge der Terminaltriebe und Gesamtblattanzahl erhoben. Das Frischgewicht wurde zu Versuchsbeginn (hierfür wurden zusätzliche Individuen verwendet) und -ende erhoben. Dafür wurden die Pflanzen in Spross und Wurzel unterteilt und separat mit einer Präzisionswaage der Firm Entris (Sartorius/ Göttingen, Deutschland) gewogen. Um den Zuwachs der Gehölze zu ermitteln (*A. pseudoplatanus*, *P. tricuspidata*, *W. sinensis*, *T. cordata*) zu ermitteln, wurden zu Versuchsbeginn und -ende die Länge der Terminaltriebe gemessen. Begleitend dazu wurde an drei Erhebungstagen die Blattanzahl der Individuen aller Arten gezählt.

Bodenanalysen: pH-Wert, Nitrat, Phosphat

Nach Versuchsende wurden im Labor des Instituts für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur Wien, das Substrat auf pH-Wert, Nitrat und Phosphat analysiert. Zusätzliche Bodenanalysen des Ausgangssubstrats (Kontrollgruppe) wurden durchgeführt, um potenzielle Veränderungen im Substrat über den Versuchszeitraum hinweg vergleichen zu können.

Eignungstabelle

Die Eignungstabelle fasst alle erhobenen Parameter je untersuchter Pflanzenart zusammen und stellt die unterschiedlichen Ergebnisse der einzelnen Erhebungsparameter in einen direkten Vergleich miteinander. Ziel war es, je Art festzustellen, ob die Bewässerung mit bGW bzw. uGW einen Einfluss auf die Parameter hatte und wenn ja, ob die Bewässerungsart negative oder positive Auswirkungen auf die Testpflanze ausübte. Pro erhobenem Parameter (Stomatäre Leitfähigkeit, relativer Chlorophyllgehalt, Zuwachs Blattanzahl, Zuwachs Frischgewicht, Zuwachs Terminaltrieb) wurden die Mittelwerte der letzten Messung am Versuchsende der bGW- und der uGW-Gruppe mit denen der FW-Gruppe verglichen. Die FW-Gruppe galt als Kontrollgruppe, wobei alle Parameter gleich gewichtet wurden. Zusätzlich wurden in der Eignungstabelle für den Versuch 2021 die Ergebnisse der RW-Gruppe mitberücksichtigt. Folgender Beurteilungsschlüssel mit Punkten wurde pro Parameter und Pflanzenart verwendet:

-	Wenn FW bessere Ergebnisse erzielte als bGW/uGW	-1 Punkt
0	Wenn FW gleiche Ergebnisse wie bGW/uGW erzielte	0 Punkte
+	Wenn bGW/uGW bessere Ergebnisse als FW erzielte	+1 Punkt

Nach der Punktevergabe wurde die Summe der Punkte (innerhalb einer Pflanzenart) nach folgendem Schema ausgewertet.

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

Vitalitätskontrolle

Am Ende der Vegetationsperiode 2020 wurden randomisiert aus jeder Bewässerungsgruppe (FW, bGW, uGW) sieben Individuen der Arten *A. pseudoplatanus* und *T. cordata* ausgewählt. Diese Testpflanzen wurden in Wiener Neustadt auf dem Gelände der Firma STREBEL GmbH neu verpflanzt. Die Individuen der bGW- und uGW-Gruppen erhielten über den restlichen Projektzeitraum hinweg

eine Bewässerung mit bGW aus der Grauwasserfilteranlage in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt. Diejenigen Testpflanzen, die bereits im Versuch mit FW gegossen wurden, bekamen weiterhin FW. Dies diente dem Monitoring, inwiefern sich die Bewässerung mit bGW langfristig auf die Vitalität der untersuchten Arten auswirkte.

Erhoben wurden relativer Chlorophyllgehalt und der Zuwachs der Terminaltriebe. Es wurde dieselbe Methode wie in den Pflanzversuchen 2020 und 2021 angewandt. Zusätzlich wurden die Testpflanzen auf ihre Vitalität in Bezug auf Schadsymptome beurteilt. Hierbei wurde ein Beurteilungsschema des GALK Arbeitskreis-Stadtbäume (GALK, 2002) angewandt. Dieses erfolgt nach einem 5-stufigen Schema (Schadstufen):

0: gesund bis leicht geschädigt,	Schädigungsgrad	00 - 10 %
1: leicht bis mittelstark geschädigt,	Schädigungsgrad	> 10 - 25 %
2: mittelstark bis stark geschädigt,	Schädigungsgrad	> 25 - 60 %
3: stark bis sehr stark geschädigt,	Schädigungsgrad	> 60 - 90 %
4: sehr stark geschädigt bis absterbend/tot,	Schädigungsgrad	> 90 - 100 %

(GALK, 2002)

Beurteilt werden Wachstum sowie Entwicklung in Form von arttypischen Kronenaufbau, Verzweigung, Belaubung, Rinde, Verhalten bei Verletzungen bzw. Wurzelbildung.

Versinterung

Um zu untersuchen, inwiefern das bGW und uGW die Bewässerungstechnik beeinflussen kann, wurde am Ende des Pflanzenversuches 2020 ein Versinterungsversuch durchgeführt. Hierbei wurden die Durchflussmenge jedes Einzeltropfers der Bewässerungsgruppen nach fünf Minuten Laufzeit gemessen, um den Grad der Versinterung bzw. Verstopfung der Tropfer zu erheben.

4.1.3. Mikroklimaeffekte durch STREBEL behandeltes Grauwasser und Begrünung

Im Rahmen des Arbeitspakets „Mikroklimaeffekte durch Filtrat und Begrünung“ wurden folgende Aufgabenbereiche bearbeitet:

- Analyse der technischen, rechtlichen und hygienischen Rahmenbedingungen, um eine adäquate stoffliche Grauwassernutzung in der Bewässerung von Grünflächen zu gewährleisten.
- Die Ermittlung der Anwendungsmöglichkeiten bzw. -grenzen des behandelten Grauwassers (bGW).
- Die Vorstellung potenzieller Begrünungsarten und deren Wasserbedarf.
- Planung einer gebäudenahen Begrünung mit Grauwasserbewässerung rund um das Referenzobjekt in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt, sowie eine Simulation der mikroklimatischen und klimaverbessernden Wirkungen des Planungsvorhabens.

Analyse technischer, rechtlicher und hygienischer Rahmenbedingungen zur stofflichen Grauwassernutzung in der Grünflächenbewässerung

Die Anwendung der Wasserwiedernutzung kommt in Österreich selten zum Einsatz. Um die rechtlichen, technischen und hygienischen Rahmenbedingungen dafür zu untersuchen, wurden mittels

einer Literaturrecherche die (für Österreich geltenden) Grenzwerte für Wasserwiedernutzung sowie vorhandene internationale Standards eruiert.

Der Literatursuche liegt eine systematische Auswahl nach drei Stufen zugrunde: Literatursuche, Literaturauswahl und Literaturbeschaffung (Karall and Weikert, 2010; Sesink, 2003). Folgende Keywords wurden für die Suche verwendet: Wasserbedarf grüner Infrastrukturen; Wasserbedarf Stauden; Wasserbedarf Dachbegrünung; Wasserbedarf Fassadenbegrünungen; Wasserbedarf ÖNORM; Anforderungen an Bewässerungswasser; stoffliche Grauwassernutzung; Grauwasserrecycling; Grünflächenbewässerung.

Wissenschaftliche Literatur, vorwiegend Monographien, Zeitschriftenaufsätze und Hochschulschriften sowie rechtliche Literatur wurden verwendet, die nach den Qualitätskriterien *Validität*, *Aktualität*, *Zugänglichkeit*, *Transparenz* und *Relevanz* ausgewählt wurden (Karall and Weikert, 2010; Sesink, 2003).

Simulation und Auswertung der klimaverbessernden Wirkung der zusätzlichen Begrünung bewässert mit Grauwasser

Das Projektgebiet rund um das Wohngebäude in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt, weist einen hohen Grad an versiegelten Freiflächen auf (Abbildung 15 und Abbildung 16).

Abbildung 15: Aktueller Zustand des Projektgebiets rund um das Referenzgebäude in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt

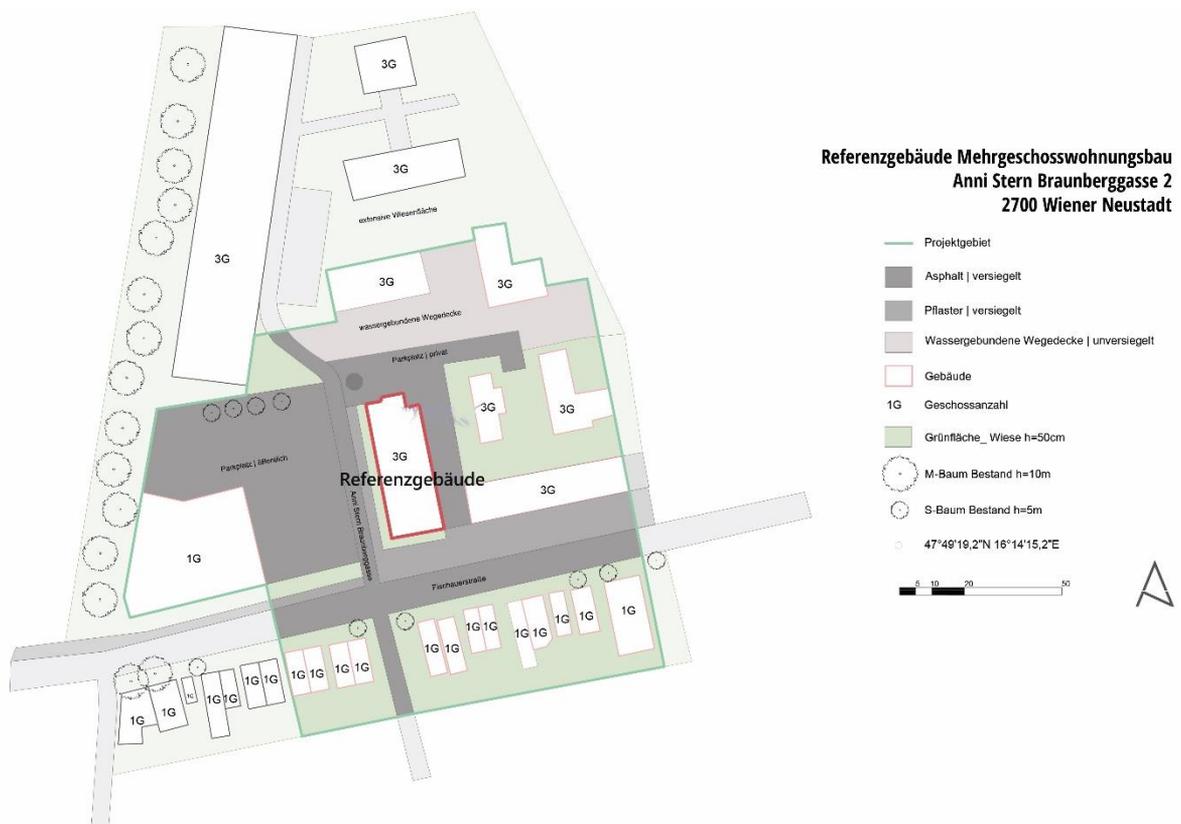
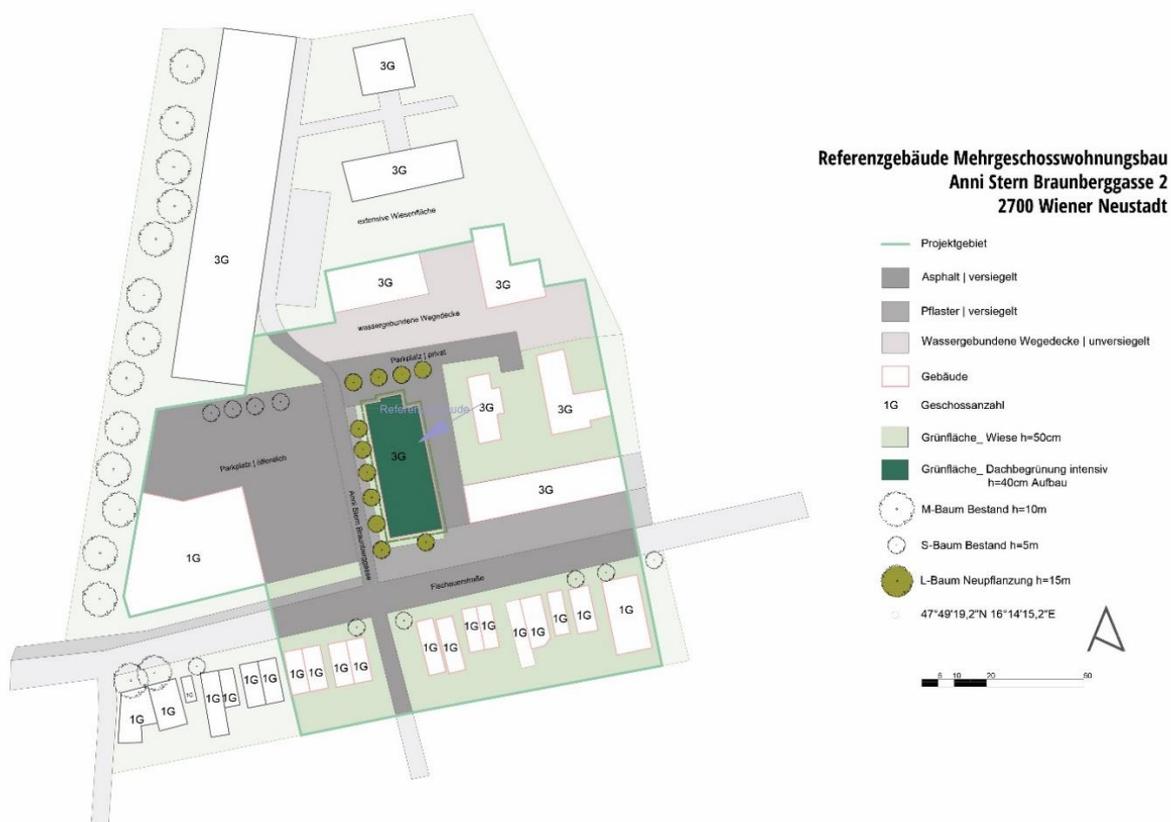


Abbildung 16: Aktueller Zustand des Referenzgebäudes mit hohem Versiegelungsgrad in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt (SGN Wohnen).



Abbildung 17: Planungsvorschlag für das Projektgebäude in der Anni Stern Braunberggasse 2 in Wiener Neustadt mit Fassaden-, Dachbegrünung und Neupflanzung von Bäumen



Dieser hohe Grad an Versiegelung hat u.a. eine vermehrte Bildung von Hitzeinseln an heißen Tagen sowie einen starken Regenwasserabfluss zur Folge. Um den genannten negativen Effekten entgegenzuwirken, wurde ein Planungsvorschlag (Abbildung 17) entwickelt. Die Gestaltung wurde so ausgelegt, dass sie mit dem anfallendem Grauwasser (bGW) des Gebäudes bewässert werden kann und umfasst eine Begrünung des Gebäudes in Form von bodengebundener Fassaden- und einer intensiven Dachbegrünung sowie einer zusätzlichen Neupflanzung von Gehölzen rund um das Gebäude (Abbildung 18).

Dies bedeutet eine Erhöhung an grünen Freiflächen mit folgenden Anteilen:

- 708 m² bodengebundene Fassadenbegrünung
- 688 m² intensive Dachbegrünung
- 11 Bäume (Höhe 5m/ Kronendurchmesser 5 m)

Abbildung 18: Visualisierung des Planungsvorschlags mit bodengebundener Fassadenbegrünung, intensiver Dachbegrünung und Bäumen



Parameter für die Mikroklimasimulation

In Zusammenarbeit mit der Firma GREENPASS® GmbH wurde eine Mikroklimasimulation des aktuellen Zustands und des Planungsvorschlags durchgeführt. Dies diente der Bestimmung der klimaverbessernden Eigenschaften der geplanten, gebäudenahen Begrünung.

Anhand der Wetterdaten aus Wiener Neustadt in den Jahren 2010 bis 2020 wählte GREENPASS® folgende Wetterparameter für die Simulation:

- Ein idealisierter Hitzetag im Juli mit min. 20,54 °C bis max. 31,45 °C
- Bei einer Windgeschwindigkeit von 3,5 m/s aus nordwestlicher Richtung kommend
- Mit einer Luftfeuchtigkeit zwischen min. 38 % bis max. 65 % (GREENPASS® 2021)

Die Simulation erfolgte nach einem standardisierten Prüfverfahren, das sowohl die Simulation als auch deren Analyse umfasst und weitere Optimierungsvorschläge bereitstellt. Folgende „Key Performance Scores“ und „Key Performance Indikatoren“ wurden untersucht:

- *Thermischer Abluftstrom (TLS)*: beschreibt den Wert für die, durch das Projektgebiet entstehende, Abluft und des dadurch entstehenden Luftpumpens sowie dessen Beeinflussung des Projektgebiets und der umliegenden Quartiere. Zur Ermittlung wird die Temperatur der Luft, die in das Gebiet einströmt, mit der, die aus dem Gebiet fließt, verglichen.
- *Thermischer Komfort (TCS)*: erfolgt als Einteilung in thermophysiologische Belastungsklassen („sehr kalt“ bis „sehr heiß“). Der Mittelwert der gefühlten Temperatur dient hierbei als Grundlage: je höher der Wert, desto besser ist der thermische Komfort des Gebiets.

- *Thermische Speicherfähigkeit (TSS)*: beschreibt die Speicherung von Energie (J) in den baulichen Körpern (Gebäude, Straßen, Parkplätze etc.) und deren Materialien. Ein niedriger Wert besagt, dass wenig Energie in den Baukörpern gespeichert wird und dementsprechend viel Energie abgestrahlt wird.
- *Abflussbeiwert (ROS)*: ist ein Wert für den Abfluss von Niederschlag. Er besagt, wieviel Wasser direkt in den Kanal fließt bzw. welche Menge an Wasser in Form von Vegetation, Boden bzw. Materialien gespeichert werden kann. (1= das gesamte Wasser fließt in den Kanal, 0= das gesamte Wasser wird zurückgehalten).
- *CO₂ Speicherung (CSS)*: ist ein Wert, der die CO₂ Speicherleistung (kg/Tag) der vorhandenen Vegetation (Biomasse, Boden) angibt. Sie wird an einem Hitzetag ermittelt. Je höher der Wert, desto mehr CO₂-Speicherung ist möglich.
- *Thermische Performance (PET)*: ist ein abstrakter Wert für die gefühlte Temperatur, die ein standardisierter Mensch verspürt. Hierbei werden Parameter wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit sowie Sonnenstrahlung miteinberechnet.
- *Strahlung (RAD)*: misst solare Strahlungsenergie (kW), die auf das Projektgebiet und dessen Oberflächenmaterialien einwirkt.
- *Albedo (ALB)*: beschreibt die Fähigkeit von Materialien, Strahlung zu reflektieren. Je näher der Wert bei 1 liegt, desto mehr Energie wird reflektiert (1: sämtliches Licht wird reflektiert, 0: sämtliche Energie wird absorbiert). Dies ist ein wichtiger Indikator für den Urban Heat Island Effect.
- *Evapotranspiration (EVA)*: umfasst die Summe aus Transpiration sowie Evaporation und beschreibt die Verdunstungsleistung von Vegetations-, Wasser- und Bodenoberflächen. Die Kühlleistung ist umso höher, je höher der Wert ist.
- *Beschattungsfaktor (SAF)*: steht für den Anteil beschatteter Flächen im Projektgebiet (1: 100 % Beschattung; 0: keine Beschattung).
- *Blattfläche (LA)*: bildet die Summe aller Blattflächen im Projektgebiet.

Simulation und Auswertung des Innenraumklimas durch Gebäudebegrünung

Für die Innenraumsimulation ebenso das Referenzgebäude für die Außenraumsimulation in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, in Wiener Neustadt verwendet. Es wird ein fiktiver Raum im Erdgeschoß und Dachgeschoß simuliert.

Parameter für die Innenraumsimulation

In diesem Kapitel sind die Parameter der Innenraumsimulation dargestellt. Als erstes werden die bautechnischen Randbedingungen des simulierten Gebäudes beschrieben. Danach folgen die Nutzungsparameter des Innenraums in Form von internen Lasten, Lüftungsverhalten, etc. Als letztes wird das Ersatzmodell der Fassadenbegrünung dargestellt.

Randbedingungen thermische Zone

Es wird jeweils eine Zone im Erdgeschoß und im Dachgeschoß simuliert, um die Unterschiede der thermischen Lage im Gebäude gegenüberzustellen. Die Ausrichtung der Räume ist süd-westlich, da bei dieser Ausrichtung mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit der Überhitzung zu rechnen ist.

Die Zone im Innenraum ist folgend definiert:

- Nutzfläche: 15 m²
- Lichte Raumhöhe: 2,5 m
- Ausrichtung: Süd-West, da bei dieser Ausrichtung mit erhöhter Überhitzung zu rechnen ist
- Platzierung im Gebäude: Eine Zone im Erdgeschoß, eine im Dachgeschoß
- Fensterflächenanteil an der Fassade: 27 %

Bautechnische Randbedingungen

Bei den bautechnischen Komponenten des Gebäudes wurden die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der zum Errichtungszeitpunkt, 2017, gültigen OIB-Richtlinie 6 angenommen. Die berücksichtigten Bauteilaufbauten sind den folgenden Tabellen zu entnehmen.

Der berücksichtigte Wärmebrückenzuschlag beträgt 15 % auf alle Bauteile. Dieser Wert ist angelehnt an ÖNORM B 8110-6 2019, Gleichung 11a (ÖNORM B 8110-6-1:2019 01 15, 2019), als realitätsnahe Korrektur gegenüber der deutlich überhöhten Festlegung laut (ÖNORM H 7500-1:2015 02 15, 2015). Hintergrund: Am Beispiel der Außenwand mit einem U-Wert von 0,4 W/m²K würde sich mit dem Heizlast-normgerechten Wärmebrückenzuschlag von 0,1 W/m²K eine Erhöhung des Transmissionsleitwerts durch die Außenwand von 25 % ergeben. Das ist unrealistisch. Es wird daher in den Simulationsrechnungen auf die jüngeren Rechenregeln laut ÖNORM B 8110-6 2019 zurückgegriffen.

Tabelle 2: Bauteilaufbau Dach (Innen nach Außen)

Komponente	Stärke cm	Wärmeleitfähigkeit W/(m.K)	Dichte kg/m³	Wärmespeicherkapazität J/(kg.K)
Gipsputz	2,0	0,22	970	1090
Stahlbeton	20,0	1,70	2300	880
Dämmung	8,0	0,04	20	1200
Außenputz	2,0	0,80	1800	790
Summe	32,0			
U-Wert (inkl. Wärmebrückenzuschlag)	0,4 W/(m ² .K)			

Tabelle 3: Bauteilaufbau Dach (Innen nach Außen)

Komponente	Stärke cm	Wärmeleitfähigkeit W/(m.K)	Dichte kg/m³	Wärmespeicherkapazität J/(kg.K)
Gipsputz	2,0	0,22	970	1090
Stahlbeton	20,0	1,70	2300	880
Dämmung	13,5	0,04	20	1200
Abdichtung	0,5	0,24	1200	1400
Schüttung	5,0	0,70	1800	1000
Summe	41,0			
U-Wert (inkl. Wärmebrückenzuschlag)	0,23 W/(m ² .K)			

Tabelle 4: Bauteilaufbau unterste Geschoßdecke (oben nach unten)

Komponente	Stärke cm	Wärmeleitfähigkeit W/(m.K)	Dichte kg/m ³	Wärmespeicherkapazität J/(kg.K)
Estrich	5,0	1,40	2300	880
Trittschalldämmung	3,0	0,04	20	1200
Schüttung	4,5	0,70	1800	1000
Stahlbeton	30,0	2,30	2300	1000
Dämmung	3,5	0,04	18	1030
Summe	46,0			
U-Wert (inkl. Wärmebrückenzuschlag)	0,46 W/(m ² .K)			

Strahlungsphysikalische Eigenschaften transparenter Bauteile

Bei den Fenstern wird die Referenzverglasung C laut EN 14501:2021 angewandt. Diese weist marktübliche Werte auf und ist innerhalb der Anforderungen an wärmeübertragende Bauteile beim Neubau gemäß OIB RL 6 2019.

Das verwendete Fenster weist folgende Eigenschaften auf:

Tabelle 5: Wärmeleitungs-Eigenschaften der verwendeten Fenster

	U-Wert Glas	g-Wert	U-Wert Rahmen
Doppelverglasung, Verglasung C	1,2 W/(m ² .K)	0,59	1,4 W/(m ² .K)

Der U-Wert des Fensterrahmens wurde gemäß vergleichbaren, marktkonformen Fenster abgeglichen und auf 1,4 W/(m².K) festgelegt.

Bei den Fenstern wird im Einklang mit ÖNORM B 8110-6-1:2019-01, Gleichung 40, ein Rahmenanteil von 30 % angenommen.

Es wird ein außenliegender Sonnenschutz berücksichtigt. Dieser weist in Kombination mit dem Fenster gemäß ÖNORM B 8110-6 2019 einen g_{tot} von 0,10 auf. Die Steuerung des außenliegenden Sonnenschutzes erfolgt mittels Zeitsteuerung. Von 8 bis 16 Uhr ist der Sonnenschutz vollständig aktiviert, von 16 bis 20 Uhr zu 50 %, danach wird der Sonnenschutz komplett hinaufgefahren.

Außenklimatische Bedingungen

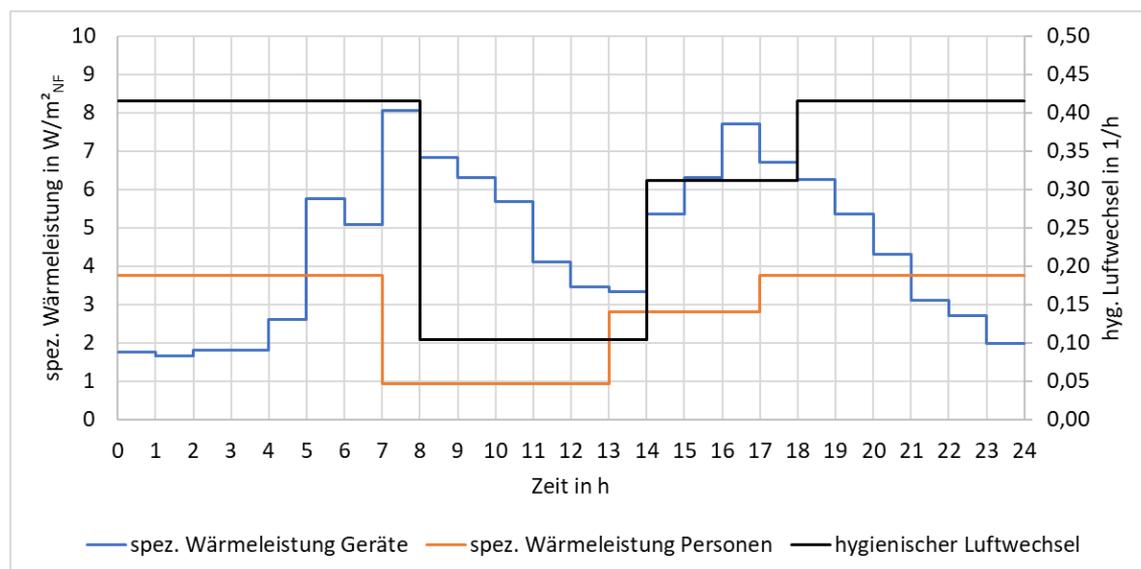
Die berücksichtigten Klimadaten stammen aus der internationalen Klimadatenbank Meteonorm für den Standort Wiener Neustadt. Der Klimadatensatz weist eine minimale Lufttemperatur von -14,3 °C, eine maximale Lufttemperatur von 35,2 °C und eine Jahresmitteltemperatur von 10,6 °C auf. Die Klimadatenbank Meteonorm arbeitet mit statistischen Methoden, um ein sogenanntes typisches meteorologisches Jahr zu erstellen. Dabei handelt es sich um Klimadaten welche mittels mathematischen Verfahrens, „typische“ Klimadaten für einen Standort erzeugen, die den vergangenen, realen, Klimadaten möglichst nahekommen. Die Methode der Bildung eines typischen meteorologischen Jahres berücksichtigt demnach die statistische Entwicklung der Klimadaten in einem bestimmten Zeitraum. In der Klimadatenbank Meteonorm befindet sich dieser Zeitraum derzeit zwischen 1996 und 2015.

Interne Lasten und Lüftung

Die Randbedingungen der internen Lasten durch Personen und Geräte sowie des hygienischen Luftwechsels sind in Abbildung 19 dargestellt. Die internen Lasten entstammen der Tabellen 2 und 3 der ÖNORM B 8110-3 2020, gültig für Wohngebäude (ÖNORM B 8110-3: 2020 06 01, 2020). Der Mittelwert der inneren Lasten durch Geräte beträgt $4,5 \text{ W/m}^2$, für Personen $2,9 \text{ W/m}^2$, bzw. $7,4 \text{ W/m}^2$ für Geräte und Menschen.

Bei der Lüftung wird von einem Lüftungsverhalten mittels Fenster ausgegangen. Die Randbedingungen der Lüftung sind der Tabelle 4 der ÖNORM B 8110-3 2020 entnommen. Der Mittelwert des hygienischen Luftwechsels beträgt $0,32 \text{ 1/h}$.

Abbildung 19: Interne Lasten und hygienischer Luftwechsel gemäß ÖNORM B 8110-3 2020, gültig für Wohngebäude



Laut ÖNORM B 8110-3 dürfen öffnungsfähige Fenster sowohl zur Sicherstellung des hygienischen Luftvolumenstromes als auch der erhöhten Nachtlüftung berücksichtigt werden. Bei der Steuerung wird der folgende Zeitplan berücksichtigt, sofern die Innenraumtemperatur $24 \text{ }^\circ\text{C}$ überschreitet und $20 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht unterschreitet, sowie die Außenlufttemperatur niedriger als die Innenraumtemperatur ist.

Der Zeitplan besitzt folgende Steuerung:

- Von 7 bis 8 Uhr ist das Fenster vollständig geöffnet
- Von 8 bis 22 Uhr ist das Fenster vollständig geschlossen
- Von 22 bis 7 Uhr ist das Fenster gekippt

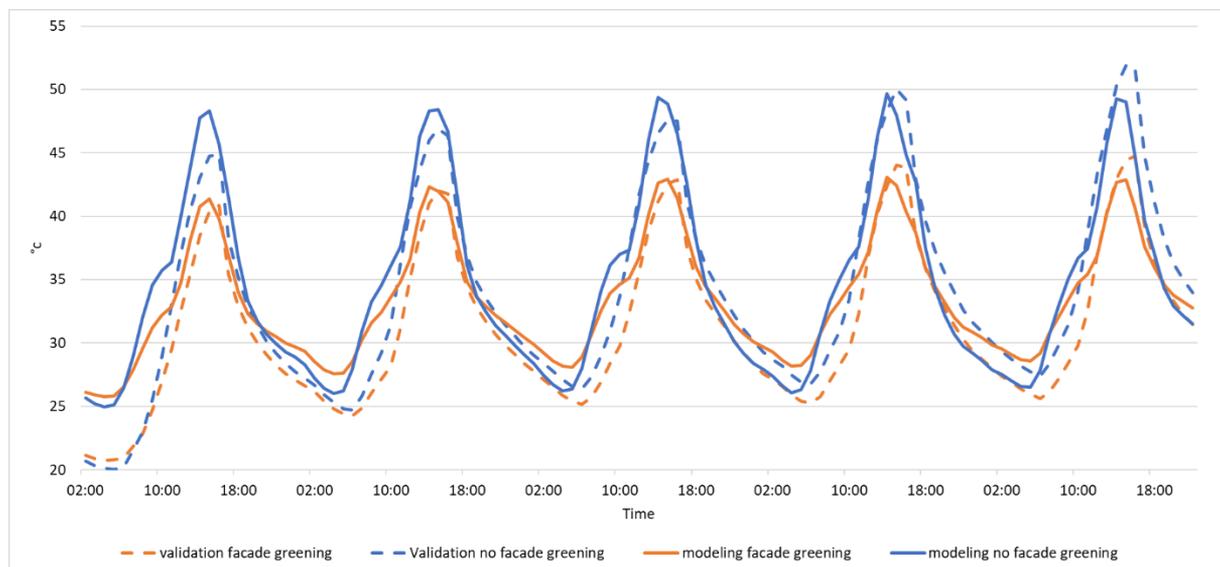
Fassadenbegrünung

In der verwendeten thermischen Gebäudesimulationssoftware IDA ICE kann derzeit eine Fassadenbegrünung standardmäßig nicht berücksichtigt werden. Es musste daher ein Ersatzmodell erstellt werden. Um die Genauigkeit der Nachbildung einer Fassadenbegrünung zu validieren, wird die Fassadentemperatur der Außenraumsimulation und jener der thermischen Gebäudesimulation verglichen. In den Untersuchungen der verschiedenen Varianten hat sich die Abbildung einer Glas-

Doppelfassade am geeignetsten und genauesten herausgestellt. Bei dieser Variante wird eine Glasscheibe, mit Öffnungen an der Ober- und Unterseite, vor die Außenwand gelegt. Die Glasscheibe wird dementsprechend manipuliert, um den Eigenschaften einer Fassadenbegrünung möglichst genau nachzubilden.

Bei dieser Vorgehensweise wird jedoch der Einfluss der Evapotranspiration der Pflanzen nicht im Modell berücksichtigt. In vorangegangenen Simulationen hat sich herausgestellt, dass die Parameter der Fassadenbegrünung je nach Modell adaptiert werden müssen. Als Validierung des Modells wird die Fassadentemperatur einer Außenraumsimulation angewandt. Im gegenständlichen Projekt wurde zwar eine Außenraumsimulation durchgeführt, es gibt jedoch keine Daten zur Fassadentemperatur. Daher wurde eine Konfiguration gewählt, welche in Projekten mit Validierungsmöglichkeit bereits eingesetzt wurden. Die Übereinstimmung der Fassadentemperatur des Ersatzmodells in IDA ICE mit jenen aus der Außenraumsimulation zeigt sowohl ohne als auch mit Fassadenbegrünung eine hohe Übereinstimmung (Abbildung 20). Bezüglich der Änderung der Fassadentemperatur durch eine Fassadenbegrünung zeigt sich eine Reduktion um ca. 5 K. Die Übereinstimmung zwischen Modellierung und Validierung zeigt eine hohe Übereinstimmung von 93 %, mit einer leichten Zeitverschiebung von ca. einer Stunde. Weiters sinken die Minimumtemperaturen der Modellierung nicht so stark ab wie bei der Validierung, es zeigt sich eine Differenz von ca. 3 K.

Abbildung 20: Vergleich der Fassadentemperatur des Ersatzmodells und der Außenraumsimulation



Software

Als Simulationssoftware wird die thermische Gebäudesimulationssoftware IDA ICE, in Version 4.8 verwendet. Diese Software berücksichtigt unter anderen den instationären Wärmefluss, Speichereffekte in den Bauteilen, Solar- und Wärmestrahlung im Zeitschrittverfahren.

4.1.4. Prototypenbau zur Demonstration, Validierung und Verwertung

Ausloten der Systemgrenzen durch verschiedene Anwendungsbereiche

Mit der Prototypenanlage wurden die Einsatzgrenzen der eingesetzten Wasser/Wasser-Wärmepumpe (Heliotherm) ausgelotet. Durch die Messungen hat sich für die Wärmepumpe ein optimaler Eingangstemperaturbereich von 7 – 20 °C herausgestellt. Als beschränkender Leistungsfaktor hat sich beim Prototyp die Rohrdimensionierung des verwendeten Presssystems erwiesen. Hier ist es wichtig bei zukünftigen Anlagen Wert auf ausreichenden Durchfluss zu legen.

Überwachung und Dokumentation des Demonstrationsprojekts in Hinblick auf die Optimierung des Systems

Die Prototypenanlage wurde mit Regeltechnikkomponenten der Firma Technische Alternative RT GmbH umgesetzt. Zum Einsatz kamen zwei freiprogrammierbare Regelungen und ein CAN Energiezähler.

An die freiprogrammierbaren Regelungen wurden über DL-Bus Volumenstromsensoren und ultraschnelle Temperatursensoren angeschlossen um Volumenströme, Temperaturen und daraus resultierend Wärmemengen aufzuzeichnen. An den CAN Energiezähler wurden Stromzähler angeschlossen und damit die Stromaufnahme der Wärmepumpe bestimmt. Die Regelungen und der CAN Energiezähler sind über CAN-Bus verbunden und eine Fernauslesung erfolgt mittels eines Controll-Monitoring-Interfaces.

Alle eingelesenen Daten wurden mit der Simulationssoftware WINSOL grafisch dargestellt. Aus diesen Daten haben wir Rückschlüsse auf die Anlage und können Optimierungen für zukünftige Systeme ziehen.

Wissensbasis in Bezug auf Abwasserwärmerückgewinnung und daraus folgend die Weiterverwendung des dabei anfallenden STREBEL behandelten Grauwassers schaffen

Das geschätzte Gesamtenergiepotenzial, das jedes Jahr in Abwasserströmen verloren geht, entspricht global dem Energiebedarf von über 150 Millionen Haushalten (Qadir et al., 2020). Die Rückgewinnung von Wasser, Nährstoffen und Energie aus diesen Strömen zur Unterstützung einer Kreislaufwirtschaft stellen somit entscheidende Faktoren für einen Wandel im Abwassermanagement dar (Batstone et al., 2015; Rao et al., 2017). Der Grundgedanke ist, dass nicht nur die Wasserversorgung, sondern auch die Rückgewinnung von Ressourcen aus dem erzeugten Abwasser wirtschaftliche und finanzielle Vorteile bieten kann (Otoo and Drechsel, 2018).

Die Entwicklung der städtischen Zentren geht mit einer Zunahme der Bevölkerungsdichte und einer Verringerung der für den Bau neuer Gebäude verfügbaren Flächen einher. Infolgedessen werden in den Städten überwiegend Hochhäuser mit hoher Bebauungsdichte errichtet. Abgesehen von den ökologischen Vorteilen solcher Bauten liegt das Potenzial für Trinkwassereinsparungen in diesen Gebäuden infolge der Wiederverwendung von Grauwasser zwischen 10 und 30 % des städtischen Wasserbedarfs (Campisano and Modica, 2010; Friedler and Galil, 2003).

Sowohl der Bedarf an Gartenbewässerung als auch die erforderliche Bewässerungsmenge in einem bestimmten Gebiet hängen von mehreren Faktoren ab: Niederschlagsmenge und -verteilung, Art des Bodens und Art der bewässerten Vegetation. Da Grauwasser das ganze Jahr über anfällt, kann es die für die Pflanzen benötigte Wassermenge über die Niederschlagsmenge hinaus ergänzen. Eine

intelligente Planung der Bewässerung kann zu Wassereinsparungen führen, die Gesundheit der Pflanzen verbessern und die (potenzielle) Umweltverschmutzung verringern, während die öffentliche Gesundheit erhalten bleibt.

Referenzmessungen zum tageszeitlichen Anfall der Warmwassermengen in einem Referenzgebäude

Referenzmessungen von Tagesprofilen einer Durchflussmessung in einer Wohnhausanlage in Krems am 07.03.2019 zeigen, dass der Warmwasserbedarf sowohl in den Morgenstunden zwischen 6 Uhr und 9 Uhr und in den Abendstunden zwischen 16 Uhr und 20 Uhr am höchsten ist. Die Temperatur des Kaltwassers ist im Durchschnitt mit 11,1 °C gegeben. Die Temperatur des Kaltwassers steigt in den Stunden, an denen kein Warmwasser benötigt wird, leicht an. Das ist darauf zurückzuführen, dass das Kaltwasser im Warmwasserspeicher erwärmt wird.

Errichtung der prototypischen Versuchsanlage für die Durchführung von Messungen und Systemoptimierungen

Um präzise Messungen durchführen zu können und die Effizienz der Wärmepumpe sowie die Regulierung des Gesamtsystems zu überprüfen, war die Errichtung einer speziellen prototypischen Versuchsanlage unerlässlich.

Die Errichtung dieser prototypischen Versuchsanlage stellte einen entscheidenden Schritt dar, um die Leistungsfähigkeit der Grauwasseranlage in einem realitätsnahen Umfeld zu evaluieren. Dabei wurden nicht nur die erforderlichen Komponenten, wie beispielsweise die Wärmepumpe installiert, sondern auch sämtliche erforderlichen Messinstrumente und Sensoren integriert, um präzise Daten erfassen zu können.

Stetige Verbesserung und Weiterentwicklung der einzelnen Komponenten des Systems

Durch die Errichtung dieser prototypischen Versuchsanlage konnten gezielte Messungen durchgeführt werden, um beispielsweise den Wärmegewinn, den Energieverbrauch, den Durchfluss und andere relevante Parameter zu erfassen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, verschiedene Systemoptimierungen vorzunehmen und die Regulierung der Anlage zu überprüfen, um eine maximale Effizienz und Funktionalität zu gewährleisten.

Die Errichtung dieser prototypischen Versuchsanlage stellt somit einen wichtigen Meilenstein in vorliegender Forschungsarbeit dar und bildet die Grundlage für weitere Erkenntnisse und Optimierungen im Bereich der Grauwassertechnologie.

4.2. Umsetzung der Methodik und aufgetretene Problemstellungen

4.2.1. Technische Systementwicklung

Bei der Umsetzung der Methodik für den Bau des Prototyps wurde ein systematischer Ansatz verfolgt, um die Effizienz und Funktionalität der STREBEL GWVA zu optimieren. Der Verlauf der Versuche und Untersuchungen wurde sorgfältig dokumentiert, um eine umfassende Analyse der Ergebnisse zu ermöglichen. Dabei wurden verschiedene Szenarien und Betriebsbedingungen simuliert, um die Leistung des Systems unter verschiedenen Belastungen zu bewerten. Während des Versuchsverlaufs sind auch einige Herausforderungen aufgetreten, insbesondere bei der Auswahl geeigneter Komponenten. Es war notwendig, eine gründliche Recherche durchzuführen, um die besten verfügbaren Optionen zu identifizieren, die den Anforderungen der STREBEL GWVA gerecht werden. Die technischen Parameter der ausgewählten Komponenten wurden genau dokumentiert, um eine genaue Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit und Eignung für das Gesamtsystem zu ermöglichen. Dieser Prozess war entscheidend, um sicherzustellen, dass der Prototyp den Anforderungen unserer Forschungsarbeit gerecht wird und aussagekräftige Ergebnisse liefert.

Die zentrale Herausforderung bei der technischen Systementwicklung war die Entwicklung des Systems im Kontext der derzeitigen Normenlandschaft und technischen Machbarkeit. Da das entwickelte System als zentrales Warmwassersystem geplant und ausgeführt wird, ist gemäß ÖNORM B 5019 (ÖNORM B 5019: 2020 03 01, 2020) die Speicherung von vorgewärmtem Trinkwasser nicht zulässig. Diese fehlende Vorwärmung hat zur Folge, dass die Eintrittstemperatur auf der Primärseite der Wärmepumpe häufig zwischen 20 °C und 30 °C liegen kann. Diese hohen Temperaturen sind für den Großteil der aktuell marktüblichen Wärmepumpen bereits im Grenzbereich bzw. liegen möglicherweise bereits außerhalb ihres Einsatzbereichs. Weiters bedarf gemäß ÖNORM B 5019:2020-3 eine zentrale Warmwasserbereitung Temperaturen am Austritt in die Trinkwasserverteilung von jedenfalls 60 °C. Dies erfordert Speichereintrittstemperaturen von über 60 °C (üblicherweise rund 63 °C). Solche hohe Temperaturen auf der Sekundärseite der Wärmepumpe stellen sich aktuell ebenfalls als problematisch für viele gängige Wasser-Wasser- bzw. Sole-Wasser-Wärmepumpen dar. Es ist davon auszugehen, dass eine gesteigerte Verbreitung von Anwendungsfällen wie dem gegenständlichen System auch eine spezifische Weiterentwicklung von Wärmepumpensystemen und damit eine entsprechende Marktverfügbarkeit mit sich bringen können.

Weitere Probleme waren die unbekanntenen Profile zum Anfall von Grauwasser in Wohngebäuden. Dies hatte Auswirkungen auf die angewandte Methodik des Arbeitspakets, da von einer Simulation der Grauwassermenge auf eine Literaturrecherche zu Profilen von Grauwasseranfall gewechselt wurde.

4.2.2. Analyse des STREBEL behandelten Grauwassers zur Bestimmung der pflanzlichen Anwendungsgrenzen

Das anfallende unbehandelte und behandelte Grauwasser der Referenzanlage in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt wurde nach obenstehender Methode auf die in Tabelle 1 gezeigten Parameter unter Einhaltung der erforderlichen Regelwerke getestet, wobei chemische und mikrobiologische Inhaltstoffe im Vordergrund standen.

4.2.3. Mikroklimaeffekte durch STREBEL behandeltes Grauwasser und Begrünung

Die Modellierung von Gebäudebegrünung ist nicht in der verwendeten Gebäudesimulationssoftware implementiert. Daher wurde ein alternatives Modell erstellt. Als Validierung der Wirksamkeit des Modells wird die Fassadentemperatur herangezogen. Da die simulierte Fassadentemperatur der Außenraumsimulation in diesem Projekt nicht bekannt war wurde auf Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt NORM (New Options for Resilient Measures for human health and wellbeing in the construction industry under climate change in Austria), gefördert durch das Programm ACRP des Klima- und Energiefonds in der 12. Ausschreibung, aufgebaut. Es wurden dabei verschiedene Varianten simuliert und jeweils die Fassadentemperaturen miteinander verglichen. Es hat sich herausgestellt, dass jene Abbildung die höchste Übereinstimmung, von 0,7 K im Mittel, über einen Zeitraum von fünf Tagen, ergab in welcher die Fassadenbegrünung durch eine transparente Doppelfassade modelliert wurde. Dieser Ansatz sowie die Modellierungsparameter wurden daher für die Simulation im gegenständlichen Projekt übernommen. Bezüglich der Implementierung von Fassadenbegrünung in Gebäudesimulationssoftwarepakete wurde erhöhter Forschungsbedarf identifiziert.

Die Analyse der technischen, rechtlichen und hygienischen Rahmenbedingungen zum Thema Grauwassernutzung erlaubt Aussagen zur stofflichen Grauwassernutzung für Bewässerungszwecken von Grünflächen zu tätigen. Möglichkeiten und Grenzen der Anwendbarkeit von behandeltem Grauwasser wurden aufgezeigt, und der Wasserbedarf von potenziellen Begrünungsarten abgeleitet.

Die in der Literatur gefundenen Wasserbedarfsdaten sind vorrangig Erfahrungswerte, die jedoch bei der Planung und Auswahl der grünen Infrastrukturen für das Referenzobjekt in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt herangezogen werden konnten. Darauf aufbauend, erfolgte die Simulation der mikroklimatischen und klimaverbessernden Wirkung.

4.2.4. Demonstration, Validierung und Verwertung

Aufgrund der weltweiten Lieferengpässe im Projektzeitraum, ausgelöst durch die COVID-19 Pandemie, verzögerte sich der Aufbau des Prototyps sowie der Validierung um mehrere Monate.

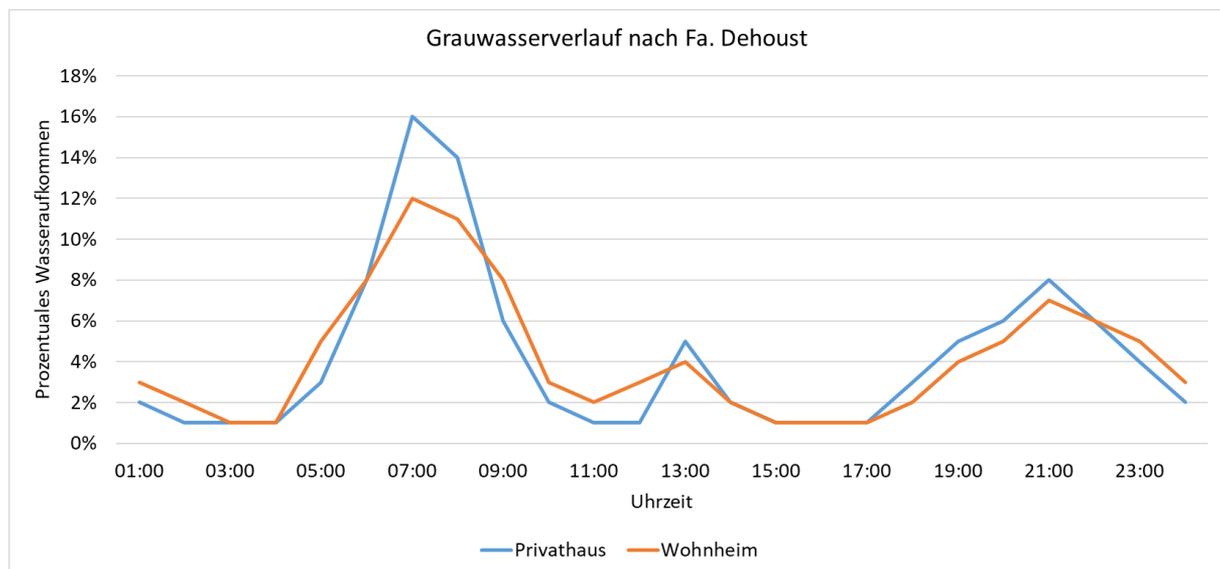
5 Ergebnisse

5.1. Technische Systementwicklung

5.1.1. Grauwasser-Anfall und Tagesverlauf

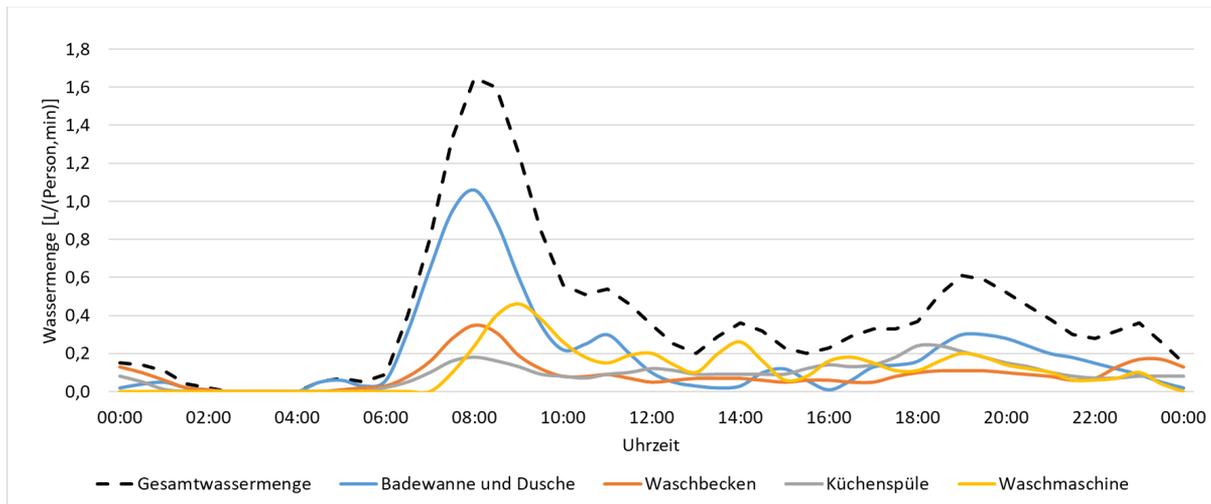
Für die Simulation wurde der Grauwassererlauf anhand einer Literaturrecherche definiert. Im Zuge der Literaturrecherche wurde ein erhöhter Forschungsbedarf im Bereich des Aufkommens von Grauwasser in Gebäuden festgestellt. Zwei wesentliche Literaturquellen konnten identifiziert und analysiert werden. Bei der ersten handelt es sich um eine Untersuchung der Firma DEHOUST GmbH welche sich bereits langfristig mit der Thematik Grauwasseraufbereitung beschäftigt (Abbildung 21). Der Grauwassererlauf zeigt eine geringe Differenzierung zwischen den Nutzungen Privathaus und Wohnheim. Lediglich in den Morgenstunden, zwischen 7 und 8 Uhr weist das Privathaus einen höheren Anteil an Grauwasser auf. In den restlichen Tagesstunden weist das Grauwasseraufkommen, unabhängig von der Nutzung, eine große Ähnlichkeit auf – die Unterschiede liegen im Bereich von weniger als 2 %.

Abbildung 21: Grauwassererlauf nach Firma Dehoust für die Privathäuser und Wohnheime



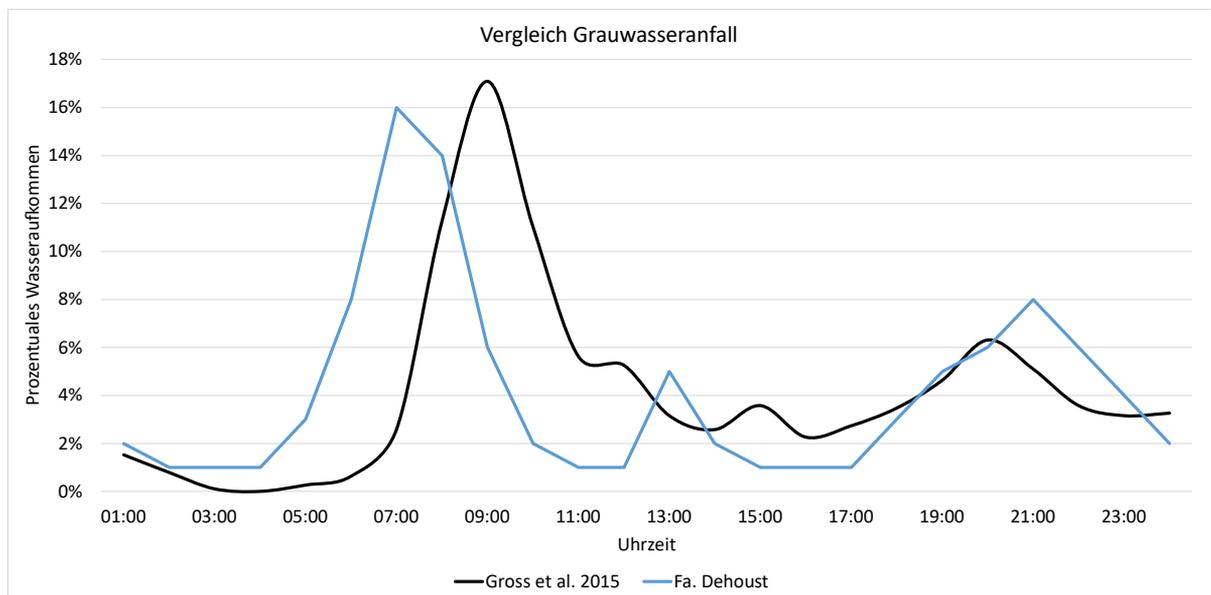
Wird der Grauwassererlauf je nach Grauwasserquelle (Badewanne und Dusche, Waschbecken, Küchenspüle oder Waschmaschine) analysiert (s. Abbildung 22) zeigt sich, dass Badewanne und Dusche den größten Anteil, vor allem in den Morgenstunden, einnehmen. Als zweitgrößter Verbraucher wird die Waschmaschine identifiziert, Waschbecken und Küchenspüle haben einen nahezu identischen Anteil am Grauwasseraufkommen.

Abbildung 22: Anfallendes Grauwasseraufkommen unterteilt in verschiedene Quellen (Gross et al., 2015)



Werden die beiden Quellen verglichen (Abbildung 23) zeigen sich hohe Übereinstimmungen, wenn auch etwas zeitversetzt. In (Gross et al., 2015) ist die Abendspitze um ca. eine Stunde nach vorne verschoben, um ca. 20 Uhr, dafür tritt die Morgenspitze später um 9 Uhr auf. Eine Ursache der Zeitversetzung könnte eine Berücksichtigung der Sommerzeit sein. Dies würde die Morgenspitzen zusammenlegen, jedoch die Abendspitzen zeitlich weiter auseinanderbringen. Alternativ wären kulturelle Unterschiede als Ursache denkbar.

Abbildung 23: Gegenüberstellung des Grauwasseranfalls der untersuchten Quellen



5.1.2. Nutzungspotential der anfallenden Grauwasser-Mengen zur Abdeckung des Warmwasser-Wärmebedarfs, als Beitrag zur Gebäudekühlung und des Nutzwasser-Bedarfs

Je nach Ausgangslage, die von den Gewohnheiten und Verhalten der jeweiligen Bewohner:innen hinsichtlich der Wassernutzung bzw. des Wassersparens abhängig sein wird, darf anhand der Referenzanlage in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wr. Neustadt, davon ausgegangen werden, dass je BewohnerIn und Tag zwischen 36 und 60 Liter unbehandeltes Grauwasser anfallen. Das aus diesem Volumen gewonnene behandelte Grauwasser ist stofflich und energetisch nutzbar.

Stoffliche Verwertung von behandeltem Grauwasser

Durch die Grauwasserbehandlung (Mikrofiltration) gibt es keinen Wasserverlust, daher kann das Volumen des unbehandelten Grauwassers mit dem des behandelten Grauwassers gleichgesetzt werden. Daraus ergibt sich bei einem Wohnhaus mit 200 Bewohner:innen ein behandelter Grauwasseranfall von 7,2 m³ bis 12,0 m³ täglich, der – unabhängig von einer nachgeschalteten Gebäudekühlung – für die Bewässerung von Pflanzen und (sofern gesetzlich zulässig) zur WC-Spülung zur Verfügung steht. Die stoffliche Verwertung von Grauwasser stellt somit einen wesentlichen Beitrag zur Bewältigung der Ziele zu Klimawandel und der knapper werdenden Ressource Trinkwasser dar.

Energetische Verwertung von behandeltem Grauwasser

Es wird angenommen, dass das behandelte Grauwasser ebenfalls über die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser von rund 4,18 kJ/(kg.K) verfügt. Bei den folgenden Berechnungen wird ebenso angenommen, dass 1 dm³ Wasser 1 kg (Masse) entspricht (d.h. die wärmebedingte Ausdehnung von Wasser im Bereich von über bzw. unter 4 °C wird hier außer Acht gelassen).

Nutzung der Wärmeenergie

Ausgehend von einer Eingangstemperatur von 30 °C in den energetischen Teil der Strebel-Grauwasserwertungsanlage beträgt die Temperatur des behandelten Grauwassers nach der energetischen Nutzung zirka 6 °C. Demnach liefert jeder Liter Grauwasser eine Energie von 100,32 kJ bzw. 0,02786 kWh. Skaliert auf ein Wohnhaus mit 200 Bewohner:innen wird pro Tag zwischen 200,64 kWh und 334,4 kWh Wärmeenergie gewonnen.

Neben der Energieeinsparung werden im Vergleich zu Erdgas für eine Wohnhausanlage mit 200 Personen eine tägliche CO₂-Äquivalent-Einsparung zwischen zirka 50 und 85 kg erreicht (anhand des CO₂-Rechners des österreichischen Umweltbundesamts: „Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger“).

Bei der Optimierung der Grauwasserwertungsanlage geht es vor allem darum, die Energieverbräuche der einzelnen Anlagen (insbesondere durch Pumpen, Stellantriebe, Regelungen etc.) soweit zu minimieren, um einen möglichst hohen Netto-Wärmeenergieertrag zu erlangen. Durch den Einsatz hocheffizienter Wärmepumpen kann das Potential weiter gehoben werden.

Nutzung des behandelten Grauwassers nach dem Wärmeentzug

Vor allem im urbanen Raum wird sich die Energielast eines Wohngebäudes vom Heizen zum Kühlen verlagern. Umso wichtiger wird es sein, diese Gebäudekühlung möglichst energieeffizient auszulegen. Nach Entzug der Wärmeenergie kann das behandelte Grauwasser zusätzlich zur saisonalen Gebäudekühlung verwendet werden. Erste Einschätzungen im Zuge des Projekts zeigten, dass der

Beitrag zur Deckung des Kühlbedarfs mit Hilfe des abgekühlten STREBEL behandelten Grauwassers in Abhängigkeit der Bauart des Gebäudes in der Größenordnung von 5 % bis 15 % liegen könnte.

Ein neuerlicher Wärmeenergieentzug des Rücklaufs aus dem Kühlkreis wurde nicht untersucht, könnte jedoch beim Einsatz von (systemisch getrennten) Niedertemperaturheizungen (Fußboden-/Deckenheizungen) in Verbindung mit der Speicherung der weggekühlten Wärmeenergie für die Übergangszeit im Herbst eine sinnvolle Weiterentwicklung sein.

Insgesamt leistet die energetische Nutzung von behandeltem Grauwasser einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des Gebäudeenergieverbrauchs und der CO₂-Reduktion im Gebäudesektor. Das Potential der Strebel Grauwasserverwertungsanlage liegt insbesondere im großvolumigen Wohnbau in Verbindung mit dem verstärkten gesetzlichen Fokus auf Energie- und Ressourceneffizienz und grünen Infrastrukturen (vgl. EU-Gebäuderichtlinie, EU-Taxonomie, Erneuerbare-Wärme-Gesetz).

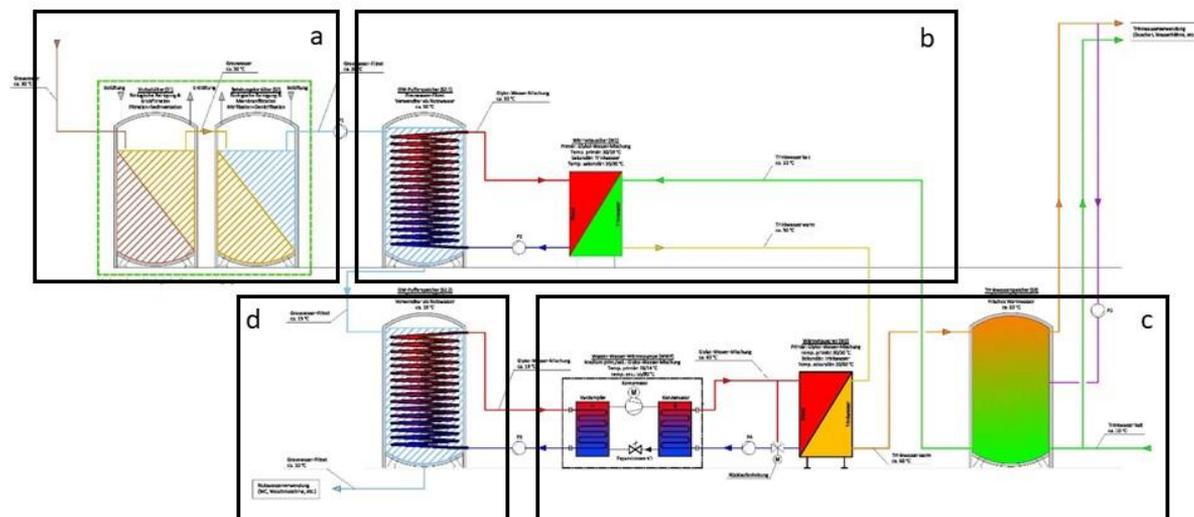
5.1.3. Prinzipschema der künftigen Anwendung für ein Wohngebäude mit 200 Bewohner:innen

Das Prinzipschema der Grauwasserverwertungsanlage ist ausführlich in den Patenturkunden AT520271 vom 15. Oktober 2020 und AG 522055 vom 15. Februar 2021 beschrieben und wurde für die verwendete prototypischen Versuchsanlage geringfügig adaptiert.

Die Strebel-Grauwasserverwertungsanlage erledigt folgende Funktionen (Abbildung 24):

- (biologische und mechanische) Reinigung des zufließenden unbehandelten Grauwassers
- Energetische Nutzung der im behandelten Grauwasser enthaltenen Wärmeenergie durch Übertragung auf Frischwasser über Plattenwärmetauscher (Vorwärmung)
- Temperaturerhöhung des vorgewärmten Frischwassers durch Sole-Wasser-Wärmepumpen unter Ausnutzung der restlichen Wärmeenergie des behandelten Grauwassers
- Bereitstellung des abgekühlten behandelten Grauwassers für weitere Anwendungen (WC-Spülung, Pflanzenbewässerung, Gebäudekühlung etc.)

Abbildung 24: Prinzipschema der Strebel-Grauwasserverwertungsanlage (© GEBE-STERBEL)



Das in den Grauwassersammelleitungen aus Dusche, Bad, Waschmaschine, Geschirrspüler etc. gesammelte unbehandelte Grauwasser wird einer mechanischen (Abscheidung von groben Schwebstoffen) und einer biologischen Behandlung (Belebung) unterzogen und soweit gereinigt, dass es als Nutz- oder Brauchwasser („STREBEL behandeltes Grauwasser“) verwendet werden kann. Anschließend wird über einen Plattenwärmetauscher in einer ersten Stufe diesem behandelten Grauwasser ein Teil der Wärmeenergie entzogen und auf das Frischwasser (Vorwärmung) übertragen. In einer zweiten Stufe wird dem (nunmehr etwas abgekühlten) behandelten Grauwasser die restliche Wärmeenergie durch eine Sole-Wasser bzw. Wasser-Wasser-Wärmepumpe nahezu vollständig entzogen und auf das vorgewärmte Frischwasser übertragen, sodass es zur Nutzung als Warmwasser zur Verfügung steht. Das nunmehr abgekühlte behandelte Grauwasser wird letztlich für weitere Anwendungen gespeichert oder, falls es keine Verwendung findet, in den Kanal abgeleitet.

5.2. Ergebnisse der rechtlichen und pflanzenphysiologischen Eignung von Grauwasser für Bewässerungszwecke

5.2.1. Grauwasseranalyse zur Bestimmung der rechtlichen Rahmenbedingungen zur Verwendung als Bewässerungswasser

Inhaltsstoffe im Grauwasser

Die Untersuchung der Grauwasserqualität wurde im Labor des Instituts für Siedlungswasserbau, Industrierewasserwirtschaft und Gewässerschutz (BOKU) durchgeführt. Die Analytik umfasst physikalische, chemische sowie mikrobiologische Parameter (Tabelle 1). Im Zuge des Projektablaufs wird zwischen drei verschiedene Probenahmen unterschieden:

- a) Zulauf und Ablauf der untersuchten Grauwasserreinigungsanlage (Tabelle 6),
- b) das für den Bewässerungsversuch eingesetzte behandelte Grauwasser (bGW), und
- c) unbehandeltes, synthetisch hergestelltes Grauwasser (uGW) (Tabelle 7).

Die Charakterisierung der Grauwasserreinigungsanlage in Wiener Neustadt wurde anhand von fünf Probenahmen des Zu- und Ablaufs durchgeführt.

Es lassen sich anhand der ÖNORM EN 16941-2 zur Wiedernutzung von behandeltem Grauwasser folgende Schlüsse ziehen, wobei die Wiedernutzung in vier Kategorien eingeteilt wird:

1. Sprühanwendungen wie Hochdruckreinigung, Gartensprenger und Autowäsche
2. WC Spülung
3. Gartenbewässerung
4. Reinigung (Spül- und Waschmaschine)

Die Qualität des Ablaufes (Tabelle 6) ist hinsichtlich der chemischen und physikalischen Parameter für alle vorgegebenen Nutzungen geeignet. Die Standardabweichung der jeweiligen Parameter lässt den Schluss zu, dass, wie auch in der Literatur diskutiert wird (Eriksson et al., 2002) Grauwasser eine hohe Variabilität aufweisen kann. Bei der Betrachtung der filterbaren Stoffe (AFS) kann eine gute Reinigungsleistung der Anlage vor Ort beobachtet werden (Tabelle 6). Parameter, die stark mit dem Feststoffgehalt verbunden sind (CSB, TOC, P gesamt und N gesamt), zeigen ebenfalls eine ausreichende

Reinigung. Ebenfalls von den AFS abhängig, ist die Trübheit. Dieser Parameter ist für die Wiederverwendung nach ÖNORM 16941-2 ausschlaggebend. Der Grenzwert dafür wird erst nach der Reinigung erreicht. Auf Basis der mikrobiologischen Parameter *E. Coli* und *Enterokokken* ist eine Nutzung für die Kategorien 2 bis 4 möglich.

Tabelle 6. Grauwasseranalytik der Aufbereitungsanlage in Wiener Neustadt, Probenahme vor Ort in Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt.

Parameter	ZULAUF		ABLAUF		ÖNORM EN 16941-2			
	Mittelwert	Std. Abw.	Mittelwert	Std. Abw.	Kat. 1	Kat. 2	Kat. 3	Kat. 4
Feststoffgehalt AFS (mg/L)	326	±273.59	2.4	±1.96				
NH4-N (mg/L)	5.7	±2.49	3.2	±3.32				
BSB ₅ (mg/L)	210	±112.04	< 3	-				
CSB (mg/L)	746	±497	21	±3				
Leitfähigkeit (µS/cm)	847	±29.33	987	±30.26				
Gesamthärte (°dH)	6.7	±0.35	7.4	±0.67				
pH-Wert (-)	7.5	±0.14	8.5	±0.32		5-9,5		
P gesamt (mg/L)	2.5	±1.26	1.4	±0.39				
Gelöster O ₂ (mg/L)	2.06	±3.58	3.72	±3.12		>1		
Tenside anionisch (mg/L)	37.1	±24.17	0.3	±0.1				
Tenside kationisch (mg/L)	0.7	±0.24	< 0.2	-				
Tenside nichtionisch(mg/L)	3.6	±0.37	1.3	±1.5				
N gesamt (mg/L)	36.8	±20.29	6.8	±2.6				
TOC (mg/L)	259	±180.52	6.6	±0.69				
Trübung (NTU)	290	±285.88	1.5	±1.72	<10 UV Desinfektion	<5		
Calcium (mg/L)	33.5	±6.33	34.4	±1.21				
Kalium (mg/L)	6.2	±1.11	7.4	±0.82				
Magnesium (mg/L)	8.7	±2.09	14.2	±2.57				
Nitrat (mg/L)	0.7	±0.20	14.4	±9.52				
Sulfat (mg/L)	60	±12.07	81	±9.72				
<i>E. Coli</i> (KBE/100mL)	2590909	±0	1.5	±0.5	0	250	250	250
<i>Enterokokken</i> (KBE/100mL)	109091	±0	0.5	±0.5	0	100	100	100
<i>Legionella pneumophila</i> (KBE/100mL)	0	±0	0	±0	10	N/A	N/A	N/A

Tabelle 7: Analytik des behandelten und unbehandelten Grauwassers welches für die Bewässerung der Pflanzen der Pflanzenversuche eingesetzt wurde.

Parameter	bGW		uGW		ÖNORM EN 16941-2			
	Mittelwert	Std. Abw.	Mittelwert	Std. Abw.	Kat. 1	Kat. 2	Kat. 3	Kat. 4
Feststoffgehalt AFS (mg/L)	1.5	±0.5						
NH4-N (mg/L)	0.5	±0.165	11.2	±1.435				
BSB ₅ (mg/L)	3	±0						
CSB (mg/L)	16	±0	330	±80				
Leitfähigkeit (µS/cm)	1005.5	±34.5						
GH (°dH)	7.20	±0.20						
pH-Wert (-)	8.6	±0.1				5-9,5		
P gesamt (mg/L)	1	±0.305						
Tenside anionisch (mg/L)	0.2	±0						
Tenside kationisch (mg/L)	0.2	±0						
Tenside nichtionisch(mg/L)	0.3	±0.005						
N gesamt (mg/L)	2.3	±0.6						
TOC (mg/L)	6.4	±0.15	65.6	±16.45				
Trübung (NTU)	0.3	±0.03				<10; UV Desinfektion <5		
Calcium (mg/L)	31.5	±1.45						
Kalium (mg/L)	8.02	±0.72						
Magnesium (mg/L)	19.8	±4.80						
Nitrat (mg/L)	0.8	±0.55	0.1	±0.01				
Sulfat (mg/L)	82	±6						

Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen zur stofflichen Grauwassernutzung in der Grünflächenbewässerung

Die Anforderungen an Bewässerungswasser in Österreich sind einerseits durch die ÖNORM EN 16941-2:2017 (Vor-Ort-Anlagen für Nicht-Trinkwasser-Teil 2: Anlagen für die Verwendung von behandeltem Grauwasser) reglementiert, andererseits bietet der Österreichische Wasser- und

Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) Empfehlungen für die Bewässerung (ÖWAV, 2016). Zur qualitativen Beurteilung der Eignung des Grauwassers für die Wiederverwendung sind die physikalische, chemische und mikrobiologische Beschaffenheit maßgeblich. Die ÖNORM EN 16941-2 gibt vier Nutzungskategorien vor, die unterschiedliche Grenzwerte aufweisen:

- 1) Garten und Auto waschen
- 2) WC Spülung
- 3) Gartenbewässerung
- 4) Waschmaschine

Physikalische Eigenschaften des Grauwassers

Die Temperatur und die Trübung werden grundsätzlich als Hauptparameter herangezogen, um die physikalische Eignung des Grauwassers zu prüfen. Der ÖWAV empfiehlt eine Wassertemperatur von 20 – 25 °C, wobei eine Maximaltemperatur von 35 °C bzw. eine Minimaltemperatur von 10 °C eingehalten werden sollten (ÖWAV, 2016).

Die Trübung des Wassers entsteht durch darin enthaltene Schwebstoffe, die als organische und anorganische Festkörper charakterisiert sind. Eine Prüfung der Schwebstoffe auf mögliche Schadstoffe wird empfohlen. Grundsätzlich können Schwebstoffe besonders bei Bewässerungsanlagen zu Störungen führen, da sie eine Verstopfung der Leitungen bewirken können (ÖWAV, 2016). Laut ÖNORM EN16941-2 darf ein Wert von <10 NTU nicht überschritten werden (ÖNORM EN16941-2; ÖWAV 407 2 2016).

Chemische Eigenschaften des Grauwassers

Die elektrische Leitfähigkeit gibt Auskunft über den Salzgehalt des Wassers und stellt somit einen zentralen Faktor für Bewässerungszwecke dar. Tabelle 8 gibt einen Überblick zu den vier Güteklassen von Bewässerungswasser, deren Richtwerte für die elektrische Leitfähigkeit und dem damit vergleichbaren Salzgehalt (ÖWAV, 2016).

Tabelle 8: Richtwerte der elektrischen Leitfähigkeit und des Salzgehalts (ÖWAV, 2016)

Geeignete Pflanzen	Elektrische Leitfähigkeit (µS/cm)	Salzgehalt (mg/l)
Geringe Wahrscheinlichkeit einer Versalzung: für die meisten Pflanzen tolerierbar	0-250	0-160
Pflanzen mit mäßiger Salztoleranz: ausreichende Auswaschung muss gewährleistet sein	250-750	160-480
Pflanzen mit guter Salztoleranz: gute Bodendrainage, zusätzliche Bodenauswaschung u.U. erforderlich	750- 2250	480-1440
Pflanzen mit hoher Salztoleranz: sehr gute Bodendrainage und zusätzliche Bodenauswaschung erforderlich	2250-5000	1440-3200

Weitere chemische Bestandteile, die für die Qualität des Grauwassers wesentlich sind, umfassen Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium, Hydrogencarbonat, Sulfat, Chlorid und Nitrat bzw. nur in Spuren nachweisbare Nebenbestandteile wie Aluminium, Arsen, Barium, Blei, Bor, Eisen, Fluor, Cobalt, Nickel, Quecksilber etc. (ÖWAV, 2016) listet die wesentlichen chemischen Parameter auf, die gesetzlich bei der Grauwassernutzung in Österreich nicht überschritten werden dürfen (Tabelle 9).

Tabelle 9: Chemische Kennwerte für die Eignung des Grauwassers für Bewässerungszwecke (ÖNORM EN 16941-2:2017, 2017; ÖWAV, 2016)

Parameter	Grenzwerte	Bemerkung
Magnesium (mval/l)	50	
Chlorid (mg/l)	< 70	geeignet für nahezu alle Pflanzen
	140	für chloridverträgliche Pflanzen geeignet; leichte Schäden bei chloridempfindlichen Pflanzen
	140-280	für chloridverträgliche Pflanzen geeignet; mittlere Schäden bei chloridempfindlichen Pflanzen
	> 280	mittlere Schäden bei chloridverträglichen Pflanzen
Kalium (mg/l)	200	
Natrium (mg/l)	100	
Rest- Brom (mg/l)	< 2	
Rest-Chlor (mg/l)	< 0,5	
Sulfat (mg/l)	1200	
NO ₃ - (mg/l)	399	
Bor (mg/l)	0,3 - 1,0	geeignet für nahezu alle Pflanzen
gelöster O ₂ (mg/l)	> 1	
pH-Wert (-)	5,0 - 9,5	
Leitfähigkeit (µS/cm)	2000 - 3000	salzempfindliche Pflanzen/ salztolerante Pflanzen
CSB (mg/L)	60	
BSB ₅ (mg/L)	10	
NH ₄ -N (mg/L)	1	
Trübung (NTU)	< 10;	<1 wenn UV-Desinfektion eingesetzt wird

Mikrobiologische Eigenschaften des Grauwassers

Wichtige Indikatorbakterien für die Prüfung der Eignung des Grauwassers sind *Escherichia coli* und Enterokokken. Bei einem Nachweis dieser Bakterien kann auf eine mikrobiologische Verschmutzung geschlossen werden (ÖWAV, 2016; Pflieger, 2009). Zusätzlich schreibt die ÖNORM EN 19461-2 eine Untersuchung auf Legionellen vor. Die Verordnung (EU) 2020/741 beinhaltet zudem europäisch-rechtliche Standards für die Wasserwiederverwendung (Tabelle 10).

Tabelle 10: Mikrobiologische Kennwerte für die Eignung des gereinigten Grauwassers für Bewässerungszwecke (eigene Bearbeitung 2021; ÖWAV-407 2 2016; ÖNORM EN 16941-2; EU 2020/741) Anmerkung: k.a. - keine Angaben der jeweiligen Parameter in den jeweiligen Dokumenten

Parameter	EU 2020/741	ÖNORM EN 16941-2	ÖWAV-407 2 2016
<i>E. coli</i> [KBE/100ml]	100	250	200
<i>Legionella pneumophila</i> [KBE/100ml]	<1000	100	k.A.
Intest. Enterokokken [KBE/100ml]	k.A.	100	k.A.
Coliforme gesamt [KBE/100ml]	k.A.	1000	k.A.

5.2.2. Untersuchung der Eignung von Grauwasser für Bewässerungszwecke: Pflanzenversuch 2020

Stomatäre Leitfähigkeit

Die Auswertung der stomatären Leitfähigkeit zeigte, dass es einen statistischen Einfluss der Art der Bewässerung bei *G. macrorrhizum*, *H. helix*, *H. sanguinea* und *T. cordata* gab (Tabelle 11). Hier bewirkte die FW- und uGW-Bewässerung eine ähnliche Reaktion, die Unterschiede bestehen jeweils zur bGW-Gruppe. Bei *A. pseudoplatanus* konnten zwischen allen Bewässerungsgruppen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Die Bewässerung mit bGW und uGW führte bei *A. pseudoplatanus* zwar zu einer etwas erhöhten stomatären Leitfähigkeit im Vergleich zur FW-Gruppe, diese ist jedoch statistisch nicht signifikant. So konnte die bGW-Gruppe zu Versuchsende höhere Werte (286,6 mmol/m²/s) als die FW-Gruppe (164,1 mmol/m²/s) und die uGW-Gruppe (244,9 mmol/m²/s) erzielen (Tabelle 11). Bei *G. macrorrhizum* und *H. helix* konnten im Versuchsverlauf bei den Testpflanzen, die eine Bewässerung mit uGW erhielten, keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zur FW-Gruppe beobachtet werden (Tabelle 11). *G. macrorrhizum* in der bGW-Gruppe (179 mmol/m²/s) erzielte jedoch im Vergleich dazu die geringsten Werte und unterschied sich signifikant von uGW (387,6 mmol/m²/s) und FW (390,4 mmol/m²/s). Bei *H. helix* wurden wesentliche Unterschiede zwischen der bGW- und uGW-Gruppe identifiziert: bGW verursachte mit 93 mmol/m²/s eine geringere stomatäre Leitfähigkeit als

uGW (154,7 mmol/m²/s), zeigte wiederum aber keine Unterschiede zu einer Bewässerung mit FW (139,7 mmol/m²/s). Die stomatäre Leitfähigkeit der Arten *H. sanguinea* und *T. cordata* war in der bGW-Gruppe (120,9 mmol/m²/s sowie 221,3 mmol/m²/s) im Vergleich zu FW (251,9 mmol/m²/s sowie 367,4 mmol/m²/s) deutlich verringert. Zwischen der Bewässerung mit FW und uGW unterschied sich die stomatäre Leitfähigkeit hingegen nicht signifikant (Tabelle 11).

Tabelle 11: Stomatäre Leitfähigkeit - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von *Acer pseudoplatanus*, *Geranium macrorrhizum*, *Hedera helix*, *Heuchera sanguinea*, *Tilia cordata*; Anmerkung: **a**, **b**, **ab** bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Stomatäre Leitfähigkeit (mmol/m ² /s)	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Geranium macrorrhizum</i>	<i>Hedera helix</i>	<i>Heuchera sanguinea</i>	<i>Tilia cordata</i>
FW	164,1 a ±40,23	390,4 a ±128	139,7 ab ±31,5	251,9 a ±54,1	367,4 a ±106,3
bGW	286,6 a ± 116,9	179,7 b ±59,5	93 a ±29,8	120,9 b ±44,4	221,3 b ±60,54
uGW	244,9 a ±84,8	387,6 a ±129,6	154,7 b ±38,9	197,6 ab ±88,2	304,4 ab ±91,32

Relativer Chlorophyllgehalt - SPAD

Die Untersuchung des relativen Chlorophyllgehalts ergab, dass sich die Testpflanzen der Arten *A. pseudoplatanus*, *G. macrorrhizum* und *H. sanguinea*, die mit bGW und uGW bewässert wurden, nicht signifikant von denen mit FW-Bewässerung unterschieden (Tabelle 12). Die Bewässerung mit FW hatte bei *T. cordata* und *H. helix* einen niedrigeren Chlorophyllgehalt zur Folge als mit einer bGW- oder uGW-Bewässerung (Tabelle 12).

Die Testpflanzen der Arten *H. helix* und *T. cordata* hatten unter der Bewässerung mit uGW (52,9 SPAD bzw. 37 SPAD) zu Versuchsende signifikant höhere Chlorophyllwerte als diejenigen der FW-Gruppe (42 SPAD bzw. 28,5 SPAD). Diese Entwicklung wurde auch bei *H. helix* beobachtet, was schlussendlich zu einem relativen Chlorophyllgehalt von 52,9 SPAD in der uGW-Gruppe führte (Tabelle 12). Die Bewässerung mit bGW unterschied sich bei diesen Arten nicht signifikant von FW. Der Chlorophyllgehalt bei *A. pseudoplatanus*, *G. macrorrhizum* und *H. sanguinea* wies keine Unterschiede bezüglich der Bewässerungsart auf, alle Gruppen verhielten sich bezüglich des relativen Chlorophyllgehalts ähnlich.

Tabelle 12: Relativer Chlorophyllgehalt - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von *Acer pseudoplatanus*, *Geranium macrorrhizum*, *Hedera helix*, *Heuchera sanguinea*, *Tilia cordata*; Anmerkung: a, b, ab bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Chlorophyllgehalt (SPAD)	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Geranium macrorrhizum</i>	<i>Hedera helix</i>	<i>Heuchera sanguinea</i>	<i>Tilia cordata</i>
FW	32,54 a \pm 2,7	28,7 a \pm 2,2	42 a \pm 7,1	29,5 a \pm 3,6	28,5 a \pm 2,7
bGW	34,4 a \pm 2	26 a \pm 2,5	48,9 ab \pm 3,8	26,9 a \pm 2,4	34,5 ab \pm 4,2
uGW	34,8 a \pm 5,1	24,6 a \pm 4,1	52,9 b \pm 3,5	30,7 a \pm 3,6	37 b \pm 3,6

Blattanzahl

Die Bewässerungsart bewirkte bei allen untersuchten Arten, *G. macrorrhizum* ausgenommen, keine signifikanten Unterschiede bezüglich des Zuwachses an Blättern. Die Bewässerung mit FW und bGW führte bei *G. macrorrhizum* zu einem gleichen Zuwachs an Blättern, lediglich die Testpflanzen mit uGW-Bewässerung wiesen im Vergleich zu FW und bGW niedrigere Blattanzahlen auf (Tabelle 13).

A. pseudoplatanus, *H. helix*, *H. sanguinea* und *T. cordata* verzeichneten in allen Bewässerungsgruppen einen gleichen Zuwachs an Blättern und wiesen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen auf (Tabelle 13). Die Arten *H. helix* und *H. sanguinea* erreichten mit der uGW-Bewässerung (87,1 und 103,3 Blätter) im Vergleich zu den anderen Bewässerungsgruppen die durchschnittlich höchste Blattanzahl. Bei *G. macrorrhizum* konnte zu Versuchsende ein umgekehrter Trend festgestellt werden. So wies *G. macrorrhizum* im Schnitt 64,6 Blätter pro Testpflanze in der bGW-Gruppe sowie 48,6 in der uGW-Gruppe auf, im Gegensatz dazu wurden in der FW-Gruppe 80,5 Blätter gezählt.

Tabelle 13: Blattanzahl - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von *Acer pseudoplatanus*, *Geranium macrorrhizum*, *Hedera helix*, *Heuchera sanguinea*, *Tilia cordata*; Anmerkung: a, b, ab bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Blattanzahl (n)	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Geranium macrorrhizum</i>	<i>Hedera helix</i>	<i>Heuchera sanguinea</i>	<i>Tilia cordata</i>
FW	54,1 a \pm 12,1	80,5 a \pm 13,8	81 a \pm 26,2	81,1 a \pm 11,5	40,3 a \pm 16
bGW	55,1 a \pm 15,5	64,6 ab \pm 16,2	72,6 a \pm 19,6	75,4 a \pm 15,8	58 a \pm 20,3
uGW	52 a \pm 9	48,6 b \pm 13,3	87,1 a \pm 29,3	103,3 a \pm 32,9	53 a \pm 17

Zuwachs - Terminaltrieb

Sowohl *A. pseudoplatanus* als auch *T. cordata* reagierten in allen Bewässerungsgruppen mit ähnlichen Zuwächsen der Terminaltriebe und wiesen keine signifikanten Unterschiede auf (Tabelle 14). Die mittleren Zuwächse von *A. pseudoplatanus* in der FW-Gruppe waren zwar mit 42,56 cm etwas höher als jene in der bGW-Gruppe mit 29,74 cm sowie in der uGW-Gruppe mit 31,5 cm, statistisch konnte jedoch zwischen allen Bewässerungsgruppen kein relevanter Unterschied festgestellt werden. Derselbe Trend spiegelte sich auch bei *T. cordata* wider (Tabelle 14).

Tabelle 14: Zuwachs gemessen am Terminaltrieb – Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende der Straßenbäume *Acer pseudoplatanus* und *Tilia cordata*; Anmerkung: **a** bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Zuwachs Terminaltrieb (cm)	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Tilia cordata</i>
FW	42,56 a ±22,47	34,41 a ±13,8
bGW	29,74 a ±18,35	28,67 a ±14,72
uGW	31,5 a ±14,29	37,86 a ±17,61

Zuwachs – Biomasse Wurzel und Spross

Der Zuwachs von Spross- und Wurzelmasse bei *G. macrorrhizum*, *H. helix* und *H. sanguinea* reagierte auf die bGW- und uGW-Bewässerung artabhängig (Tabelle 15, Tabelle 16). Der Zuwachs an Biomasse bei *H. sanguinea* verhielt sich in allen Bewässerungsgruppen gleich. Hingegen konnten bei *H. helix* unterschiedliche Zuwächse bei Spross-, sowie bei den Testpflanzen der Art *G. macrorrhizum* beim Wurzelwachstum festgestellt werden.

Verglichen mit der FW-Gruppe (89,62 g) wies *H. helix* einen signifikant geringeren Sprosszuwachs in der bGW-Gruppe mit 45,03 g sowie in der uGW-Gruppe mit 43,39 g auf (Tabelle 15). Die Bewässerung mit bGW und uGW führte bei *G. macrorrhizum* und *H. sanguinea* zu keinen statistisch relevanten Unterschieden bei der Zunahme an Sprossmasse (Tabelle 15). Dieser Trend setzte sich auch im Hinblick auf das Wurzelwachstum von *H. sanguinea* sowie *H. helix* fort (Tabelle 16). Es konnten keine Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen festgestellt werden. Lediglich *G. macrorrhizum* verzeichnete in der bGW-Gruppe (21,85 g) und FW-Gruppe (19,52 g) größere Zuwächse an Frischgewicht von Wurzeln als die Testpflanzen unter uGW-Bewässerung (6,85 g) (Tabelle 16).

Tabelle 15: Ermittlung des Zuwachses (Frischgewicht des Sprosses) – Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende der Arten *Geranium macrorrhizum*, *Hedera helix* und *Heuchera sanguinea*; Anmerkung: **a**, **b** bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Zuwachs Frischgewicht Spross (g)	<i>Geranium macrorrhizum.</i>	<i>Hedera helix</i>	<i>Heuchera sanguinea</i>
FW	16,40 a ±18,42	89,62 a ±25,36	27,41 a ±14,68
bGW	10,7 a ±11,55	45,03 b ±21,59	54,4 a ±16,13
uGW	6,25 a ±4,54	43,39 b ±21,2	44,81 a ±24,18

Tabelle 16: Ermittlung des Zuwachses (Frischgewicht der Wurzeln) – Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende der Arten *Geranium macrorrhizum*, *Hedera helix* und *Heuchera sanguinea*; Anmerkung: **a**, **b** bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Zuwachs Frischgewicht Wurzel (g)	<i>Geranium macrorrhizum</i>	<i>Hedera helix</i>	<i>Heuchera sanguinea</i>
FW	19,52 a ±12	34,32 a ±17,09	36,65 a ±5,76
bGW	21,85 a ±7,27	28,8 a ±15,33	38,69 a ±11,63
uGW	6,85 b ±6,94	40,78 a ±22,87	51,36 a ±17,23

Bodenanalysen

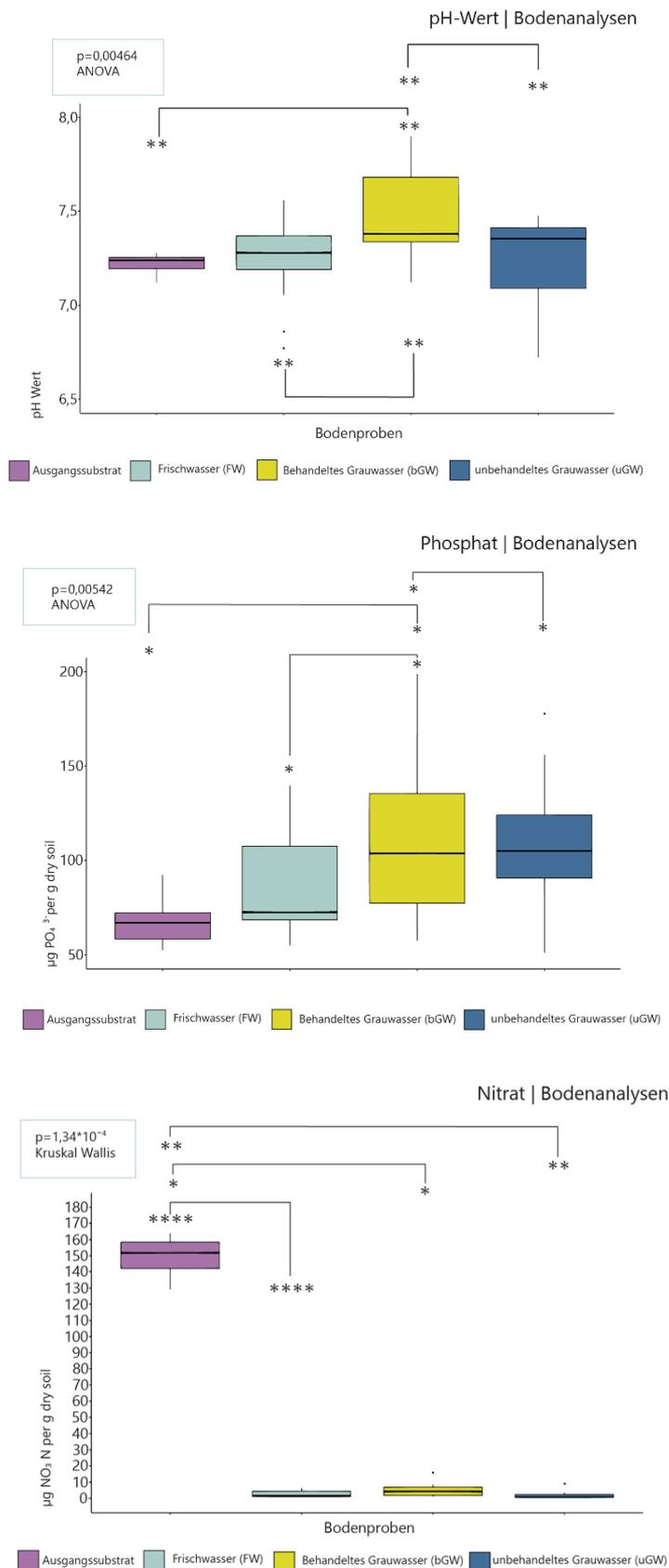
Die Untersuchung der Bodenanalysen ergaben, dass während des Pflanzenversuchs die Bewässerung mit bGW und uGW im Vergleich zu FW nur leichte Einflüsse auf Boden-pH, Phosphat- sowie Nitratgehalt hatten und sich somit für die Bewässerung aus Hinsicht dieser Parameter eignen könnte (Tabelle 17).

Die Bewässerung mit bGW hatte eine leichte Erhöhung pH-Werts des Bodens von gemittelt 7,22 (Ausgangssubstrat) auf 7,47 zur Folge (Tabelle 17). Die Bewässerung mit uGW verhielt sich bezogen auf den Boden-pH-Wert mit 7,23 ähnlich wie FW und unterscheidet sich nicht signifikant vom Ausgangssubstrat (7,22). Der Nitratgehalt im Substrat aller Bewässerungsgruppen ist signifikant gefallen, da während der Versuchslaufzeit keine Düngerzugabe erfolgte. Es wurde gänzlich von den Pflanzen aufgebraucht, unabhängig der Bewässerung. So enthielt das Ausgangssubstrat anfänglich 154,82 µg NO₃-N/g und sank im Laufe des Versuches in allen Bewässerungsgruppen auf ein Minimum von 1,32 µg NO₃-N/g in der FW-Gruppe, auf 3,58 µg NO₃-N/g in der bGW-Gruppe sowie auf 2,36 µg NO₃-N/g in der uGW-Gruppe. Der Phosphatgehalt des Substrats, das mit bGW (107,2 µg anorganischer P/g) und uGW (106,86 µg anorganischer P/g) bewässert wurde, ist signifikant höher als der des Ausgangssubstrats mit 62,27 µg anorganischer P/g Boden. Die FW-Gruppe unterschied sich in der Hinsicht mit 73,18 µg anorganischer P/g nicht signifikant vom Ausgangssubstrat.

Tabelle 17: Bodenanalysen – Mittelwerte und Standardabweichung des pH-Werts, Phosphat und Nitrat der Bewässerungsgruppen und des Ausgangssubstrats. Anmerkung: **a**, **b** bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen. Die Einheiten des Phosphats und Nitrats sind pro g Trockenmasse zu rechnen.

Bodenanalysen	pH-Wert	Phosphat (μg organischer P)	Nitrat (μg $\text{NO}_3\text{-N}$)
FW	7,25 a $\pm 0,1$	73,18 a $\pm 29,71$	1,32 a $\pm 2,32$
bGW	7,47 b $\pm 0,2$	107,20 b $\pm 41,54$	3,58 a $\pm 4,36$
uGW	7,23 a $\pm 0,2$	106,86 b $\pm 32,64$	2,36 a $\pm 2,86$
Ausgangssubstrat	7,22 a $\pm 0,05$	62,27 a $\pm 18,59$	154,82 b $\pm 17,40$

Abbildung 25: Ermittlung des Boden-pH-Wertes, Phosphat- und Nitratgehalts der drei Bewässerungsgruppen im Vergleich mit dem Ausgangssubstrat



Eignungstabelle Versuch 2020

Basierend auf dem Vegetationsversuch 2020 kann festgehalten werden, dass sich behandeltes Grauwasser zur Bewässerung von Pflanzen eignen könnte. Für die Bewässerung mit uGW eignen sich *A. pseudoplatanus*, *T. cordata*, *H. helix* und *H. sanguinea*. *G. macrorrhizum* entwickelte sich unter der Bewässerung mit uGW schlechter als im Vergleich zu GW und FW, *Hedera helix* hingegen entwickelte sich mit bGW schlechter.

Tabelle 18: Eignungstabelle Versuch 2020. Je Art wurden die einzelnen Versuchsparameter und deren Ergebnisse aufgelistet und jeweils für bGW und uGW mit Trinkwasser verglichen.

VERSUCH 2020	Stomatäre Leitfähigkeit	Chlorophyll-Gehalt	Zuwachs Terminaltrieb	Zuwachs Frischgewicht	Blattanzahl	Punktzahl	Eignung	
	bGW uGW	bGW uGW	bGW uGW	bGW uGW	bGW uGW	bGW uGW	bGW uGW	
<i>A. pseudoplatanus</i>	0 0	0 0	0 0	nicht erhoben	0 0	0 0	✓	✓
<i>T. cordata</i>	- 0	0 +	0 0	nicht erhoben	0 0	-1 +1	o	✓
<i>G. macrorrhizum</i>	- 0	0 0	nicht erhoben	+ -	0 -	0 -2	✓	-
<i>H. helix</i>	- 0	0 +	nicht erhoben	- -	0 0	-2 0	-	✓
<i>H. sanguinea</i>	- 0	0 0	nicht erhoben	0 0	0 0	-1 0	o	✓

Punktevergabe pro Pflanzenart und Parameter

- Wenn FW bessere Ergebnisse erzielt als bGW/uGW
- 0 Wenn FW gleiche Ergebnisse wie bGW/uGW erzielt
- + Wenn bGW/uGW bessere Ergebnisse als FW erzielt

- 1 Punkt
- 0 Punkte
- +1 Punkt

Beurteilungsschema für Eignung

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

5.2.3. Untersuchung der Eignung von Grauwasser für Bewässerungszwecke: Pflanzenversuch 2021

Stomatäre Leitfähigkeit

Die Ergebnisse der Messungen zeigten, dass bei den Arten *P. tricuspidata* und *W. sinensis* die Bewässerungsart einen Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit ausübte. Bei *P. tricuspidata* und *W. sinensis* konnte in der Regenwasser-Gruppe eine signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeit festgestellt werden. Zusätzlich bewirkte die Bewässerung mit bGW bei *W. sinensis* im Vergleich zu den anderen Bewässerungsgruppen die höchste stomatäre Leitfähigkeit. Bei *B. cordifolia* zeigte die Bewässerung keine wesentliche Wirkung auf den erhobenen Parameter (Tabelle 19).

Die Auswertungen der Messergebnisse im Hinblick auf die stomatäre Leitfähigkeit ergaben, dass die Arten *P. tricuspidata* und *W. sinensis* in den RW-Gruppen eine signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeit (79,4 mmol/m²/s sowie 68,96 mmol/m²/s) aufwiesen als jene Individuen, die mit FW (302,64 mmol/m²/s bzw. 77,48 mmol/m²/s), bGW (282,28 mmol/m²/s bzw. 114,88 mmol/m²/s) und uGW (299,28 mmol/m²/s bzw. 110,22 mmol/m²/s) bewässert wurden. Bei den zuletzt genannten Gruppen FW, bGW und uGW konnten keine wesentlichen Unterschiede bezüglich der stomatären Leitfähigkeit festgestellt werden. Zusätzlich konnte bei *B. cordifolia* kein maßgeblicher Einfluss der Bewässerungsart identifiziert werden (Tabelle 19), was vor allem auf die Trockenheitstoleranz dieser Art zurückzuführen ist. Daraus lässt sich schließen, dass jegliche Zusatzbewässerung bei geringem Niederschlag förderlich für die Transpiration der Pflanzen ist.

Tabelle 19: Stomatäre Leitfähigkeit - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von *Bergenia cordifolia*, *Parthenocissus tricuspidata* und *Wisteria sinensis*; Anmerkung: **a**, **b** bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Pflanzenart verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Stomatäre Leitfähigkeit (mmol/m ² /s)	<i>Bergenia cordifolia</i>	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	<i>Wisteria sinensis</i>
FW	260,98 a ±36,93	302,64 a ±74,79	77,48 a ±22,83
bGW	315,78 a ±58,13	282,28 a ±57,35	114,88 b ±19,35
uGW	284,9 a ±81,92	299,28 a ±51,93	110,22 b ±24,17
RW	282,38 a ±45,47	79,4 b ±39,32	68,96 a ±15,24

Relativer Chlorophyllgehalt - SPAD

Die Bewässerungsart hatte bei *B. cordifolia* sowie *W. sinensis* keinen Einfluss auf den relativen Chlorophyllgehalt aller Testpflanzen. Die Bewässerung mit uGW und RW zeigte bei *P. tricuspidata* wesentliche Unterschiede, was sich darin äußerte, dass die uGW-Gruppe den geringsten sowie die RW-Gruppe den höchsten relativen Chlorophyllgehalt innerhalb dieser Pflanzenart aufwies (Tabelle 20).

Sowohl *B. cordifolia* als auch *W. sinensis* zeigten keine Unterschiede zwischen den Bewässerungsgruppen bezüglich des relativen Chlorophyllgehalts. Alle Gruppen beider untersuchter Arten zeigten über den Versuch hinweg denselben Trend (Tabelle 20). Bei *P. tricuspidata* kam es zu bewässerungsabhängigen Einflüssen: Die Bewässerung mit uGW bewirkte einen signifikant niedrigeren Chlorophyllgehalt (23,92 SPAD) im Vergleich zu den restlichen Bewässerungsgruppen (FW= 30,26 SPAD, bGW= 28,74 SPAD, RW= 35,18 SPAD). Die Bewässerung mit RW führte hingegen zu signifikant hohen relativen Chlorophyllwerten (35,18 SPAD).

Tabelle 20: Relativer Chlorophyllgehalt - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von *Bergenia cordifolia*, *Parthenocissus tricuspidata* und *Wisteria sinensis*; Anmerkung: **a**, **b** bezieht sich jeweils nur auf eine Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Chlorophyllgehalt (SPAD)	<i>Bergenia cordifolia</i>	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	<i>Wisteria sinensis</i>
FW	45,74 a ±3,90	30,26 a ±3,22	32 a ±3,03
bGW	46,16 a ±4,28	28,74 a ±5,24	27,96 a ±7,54
uGW	42,7 a ±4,07	23,92 b ±3,02	30,22 a ±4,04
RW	49,3 a ±5,73	35,18 c ±6,67	26,44 a ±3,50

Blattanzahl

Die Art der Bewässerung hatte bei *B. cordifolia* keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf die Zunahme der Blätter bewirkt. Zusätzlich hatte die Bewässerung mit bGW und uGW bei *P. tricuspidata* und *W. sinensis* keinen Einfluss auf die Blattzunahme. Die Wasserversorgung über den natürlichen Niederschlag (RW-Gruppe) führte bei diesen Arten zu einer verringerten Blattanzahl (Tabelle 21).

Der Zuwachs an Blättern wurde bei *B. cordifolia* durch die Art der Bewässerung nicht beeinflusst: die Bewässerungsgruppen wiesen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Blattanzahl auf (Tabelle 21). Bei *P. tricuspidata* zeigte die RW-Gruppe eine deutlich geringere Zunahme an Blättern (116,2 Blätter) als die Testpflanzen, die mit FW (242 Blätter), bGW (265,2 Blätter) sowie uGW (250 Blätter) bewässert wurden. Ein ähnlicher Trend konnte auch bei *W. sinensis* festgestellt werden. Wiederum führte die RW-Bewässerung zur geringsten Blattanzahl (84,6 Blätter), hingegen die Bewässerung mit uGW zu einer doppelt so großen Zunahme an Blättern (168 Blätter) (Tabelle 21).

Tabelle 21: Blattanzahl - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von *Bergenia cordifolia*; *Parthenocissus tricuspidata* und *Wisteria sinensis*; Anmerkung: **a, b, ab** bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Blattanzahl (n)	<i>Bergenia cordifolia</i>	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	<i>Wisteria sinensis</i>
FW	58,8 a $\pm 11,57$	242 a $\pm 32,57$	126,4 ab $\pm 29,15$
bGW	53,2 a $\pm 17,35$	265,2 a $\pm 57,7$	138,6 ab $\pm 31,32$
uGW	63 a $\pm 21,75$	250 a $\pm 24,37$	168 a $\pm 37,37$
RW	45,2 a $\pm 11,14$	116,2 b $\pm 29,05$	84,6 b $\pm 9,31$

Zuwachs-Terminaltrieb

Die Entwicklung der Terminaltriebe wurde bei *P. tricuspidata* durch die Art der Bewässerung nicht negativ beeinflusst (Tabelle 22). Die Testpflanzen in der RW-Gruppe reagierten bei *W. sinensis* mit einem deutlich geringeren Zuwachs der Terminaltriebe als im Vergleich mit den anderen Bewässerungsgruppen.

Die Art der Bewässerung wirkte sich bei *P. tricuspidata* statistisch gesehen nicht auf den Zuwachs der Terminaltriebe aus (Tabelle 22). Bei *W. sinensis* zeigte sich hingegen ein deutlich geringerer Zuwachs in der RW-Gruppe (65,8 cm), die nur mit natürlichem Niederschlag bewässert wurde. Die Testpflanzen der FW- (293,6 cm), der bGW- (283,6 cm) und der uGW-Gruppe (319,8 cm) wiesen keine statistisch signifikanten Unterschiede untereinander auf (Tabelle 22).

Tabelle 22: Zuwachs Terminaltrieb - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von *Parthenocissus tricuspidata* und *Wisteria sinensis*; Anmerkung: **a, b** bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Zuwachs Terminaltrieb (cm)	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	<i>Wisteria sinensis</i>
FW	71,8 a $\pm 3,37$	293,6 a $\pm 55,94$
bGW	54 a $\pm 10,75$	283,6 a $\pm 112,14$
uGW	91,6 a $\pm 28,39$	319,8 a $\pm 80,83$
RW	56 a $\pm 29,69$	65,8 b $\pm 87,42$

Zuwachs- Biomasse Wurzel und Spross

Die Zunahme an Wurzel- und Sprossbiomasse wurde bei *B. cordifolia* nicht durch die Art der Bewässerung beeinflusst. Alle Bewässerungsgruppen konnten denselben Zuwachs erzielen (Tabelle 23 und Tabelle 24).

Die Untersuchung der Biomasse von Wurzel und Spross bei *B. cordifolia* ergab, dass die Art der Bewässerung keinen signifikanten Einfluss auf die Zunahme des untersuchten Parameters ausübte. Zwar konnten die Testpflanzen der uGW-Gruppe sowohl bei der Spross- (134,3 g) als auch bei der Wurzelmasse (109,4 g) die höchsten Zuwächse erzielen, jedoch sind die Unterschiede nicht statistisch relevant (Tabelle 23).

Tabelle 23: Ermittlung des Zuwachses (Frischgewicht von Spross und Wurzel) – Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende der Art *Bergenia cordifolia*. Anmerkung: a bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.

Zuwachs Frischgewicht <i>Bergenia cordifolia</i>	Spross(g)	Wurzel (g)
FW	104,6 a ±29,51	79,7 a ±32,99
bGW	94,6 a ±32,39	69,7 a ±32,38
uGW	134,3 a ±48,51	109,4 a ±48,51
RW	95,1 a ±47,39	95,1 a ±47,39

Eignungstabelle Versuch 2021

Die Bewässerung mit bGW eignet sich für *B. cordifolia*, *P. tricuspidata* und *W. sinensis*. Somit kann diese Art der Bewässerung für alle untersuchten Arten empfohlen werden. Dies bestätigt das Ergebnis des Versuchs im Jahr 2020.

Ergänzend dazu führte die Bewässerung mit uGW bei den Arten *B. cordifolia* und *W. sinensis* zu keinen negativen Einflüssen und kann für diese Arten entsprechend auch verwendet werden. Für *P. tricuspidata* kann nur eine bedingte Eignung ausgesprochen werden.

Die Bewässerung mit natürlichem Niederschlag bewirkte bei *B. cordifolia* keine negativen Veränderungen der Untersuchungsparameter. Dies lässt sich vor allem auf die Trockenheitstoleranz dieser Art zurückführen. Bei den Arten *P. tricuspidata* und *W. sinensis* war dies jedoch nicht der Fall, diese entwickelten sich in der Niederschlagsgruppe schlechter als unter der Bewässerung mit Grauwasser. Eine zusätzliche Bewässerung mit GW, ob behandelt oder unbehandelt ist aus pflanzenphysiologischer Sicht keiner Bewässerung vorzuziehen.

Tabelle 24: Eignungstabelle Versuch 2021: Je Art wurden die einzelnen Versuchsparameter und deren Ergebnisse aufgelistet und jeweils für bGW-, uGW- und RW- Bewässerung bewertet. Endergebnis ist die Beurteilung der Eignung.

VERSUCH 2021	Stomatäre Leitfähigkeit	Chlorophyll-Gehalt	Zuwachs Terminaltrieb	Zuwachs Frischgewicht	Blattanzahl	Punktzahl	Eignung		
	bGW uGW RW	bGW uGW RW	bGW uGW RW	bGW uGW RW	bGW uGW RW	bGW uGW RW	bGW	uGW	RW
<i>B. cordifolia</i>	0 0 0	0 0 0	nicht erhoben	0 0 0	0 0 0	0 0 0	✓	✓	✓
<i>P. tricuspidata</i>	0 0 -	0 - +	0 0 0	nicht erhoben	0 0 -	0 -1 -1	✓	○	○
<i>W. sinensis</i>	+ 0 -	0 0 0	0 0 -	nicht erhoben	0 0 0	+1 0 -2	✓	✓	—

Punktevergabe pro Pflanzenart und Parameter

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

Beurteilungsschema für Eignung

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

5.2.4. Vitalitätskontrolle

Die Ergebnisse der Vitalitätskontrollen (2021 und 2022) zeigten, dass die Bewässerung mit bGW im Vergleich zu FW bei den untersuchten Arten *A. pseudoplatanus* und *T. cordata* keinen signifikanten Einfluss auf den relativen Chlorophyllgehalt sowie den Zuwachs der Terminaltriebe hatte. Die Beurteilung nach Schadsymptomen ergab, dass sämtliche Testpflanzen als gesund einzustufen sind und die Bewässerungsart keinen Einfluss auf die Vitalität der Testpflanzen aufwies (Abbildung 26 bis Abbildung 28).

Abbildung 26: Vitalitätskontrolle April 2021: Frischwassergruppe (Hofbauer 2021)



Abbildung 27: Vitalitätskontrolle April 2021: bGW (Hofbauer 2021)



Abbildung 28: Vitalitätskontrolle April 2021: bGW-Gruppe (Hofbauer 2021)



In Abbildung 26 bis Abbildung 28 sind die am Ende des Glashausversuch verpflanzten Versuchspflanzen am Gelände der Firma Strebel zu sehen. An welchen in den folgenden Jahren 2021 und 2022 Vitalitätskontrollen durchgeführt wurden. Dabei stellte sich heraus, dass die Art der Bewässerung (behandeltes Grauwasser/bGW oder Frischwasser/FW) weder bei *A. pseudoplatanus* noch bei *T. cordata* einen Einfluss auf den relativen Chlorophyllgehalt sowie den jährlichen Zuwachs der Terminaltriebe hatte.

Tabelle 25: Ergebnisse der Vitalitätskontrolle der Versuchspflanzen *Acer pseudoplatanus* und *Tilia cordata* welche nach Ende des Glashausversuchs 2021 nach Wr. Neustadt zur Firma Strebel gebracht und dort weiter mit GW bewässert wurden. Gemessen wurde der Zuwachs der Terminaltriebe und der relative Chlorophyllgehalt der Pflanzen, dargestellt als Mittelwerte mit Standardabweichung und statistischer Signifikanz. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede (a, b) innerhalb der Art (es wurden keine Vergleiche zwischen den Arten durchgeführt).

	2021		2022	
	Relativer Chlorophyllgehalt	Zuwachs	Relativer Chlorophyllgehalt	Zuwachs
FW – A. pseudoplatanus	23,4 a ± 8,3	42,1 a ± 17,6	26,7 a ± 4,2	8,0 a ± 12,1
bGW – A. pseudoplatanus	22,7 a ± 5,1	36,9 a ± 15,4	30,3 a ± 6,1	12,3 a ± 4,9
FW – T. cordata	28,6 a ± 4,3	49,7 a ± 8,7	29,1 a ± 6,7	4,5 a ± 9,9
bGW – T. cordata	24,7 a ± 3,7	34,2 a ± 12,2	30,3 a ± 4,3	6,7 a ± 13,7

5.2.5. Versinterung

Am Ende der Versuche (jeweils eine Vegetationsperiode) wurde die Durchflussmenge (mL) der Einzeltropfer gemessen, um herauszufinden, ob die Tropfer aufgrund Bewässerung mit Grauwasser verstopfen. Die Bewässerung mit bGW und uGW hatten jedoch keinen Einfluss auf die Versinterung (Tabelle 26) der Tropfspieße im Vergleich zur FW-Gruppe nach einer Vegetationsperiode. Dies bedeutet, dass nach dem Lauf einer Vegetationsperiode dieselbe Menge Wasser aus den Tropfer trat wie zu Beginn, unabhängig von der Bewässerung. Dies liegt daran, dass das bGW mechanisch gefiltert wurde und das uGW synthetisch hergestellt wurde und somit auch keine Schwebstoffe enthielt.

Tabelle 26: Ergebnisse des Versinterungsversuch der Einzeltropfer (4 L/h und 8 L/h) aller Bewässerungsgruppen. Es wurde die Durchflussmenge in mL in einem Zeitraum von 5 Minuten gemessen. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen festgestellt werden. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede (a) innerhalb der Art

	Frischwasser	Behandeltes GW	Unbehandeltes GW
4 L/h	292,1 a ± 42,1	298,35 a ± 48,7	275 a ± 33,9
8 L/h	698,3 a ± 24,8	704,6 a ± 36,8	717,4 a ± 41,4

5.3. Einfluss der zusätzlichen Begrünung auf das Mikroklima des Innen- und Außenraums

5.3.1. Dimensionierung von Begrünungsflächen vor dem Hintergrund des Grauwasserangebots

Tabelle 27 gibt einen Überblick zu dem durchschnittlichen Wasserbedarf verschiedener grüner Infrastrukturen im urbanen Raum. Die Daten sind gemittelte Werte aus der Literatur bzw. Praxis und können als Hilfestellung für die Konzipierung von Bewässerungssystemen herangezogen werden. Für das Pflanzenwachstum ist eine ausreichende Versorgung der Wurzeln mit Wasser und Bodenluft erforderlich. Die Menge und die zeitliche Verteilung der Ausbringung des Bewässerungswassers sind abhängig von Witterung, Boden, Pflanzenart, Pflegeziel, Exposition der Vegetationsfläche und Jahreszeit (GREEN4CITIES et al., 2019). Aufgrund der variierenden Faktoren sind die folgenden Werte des Wasserbedarfs als grobe Orientierung anzusehen. Für eine detaillierte Planung muss die Bewässerungsmenge der jeweiligen grünen Infrastruktur bedarfsgerecht ermittelt werden (Köhler, 2012). Für den Wasserbedarf von Pflanzen, die in direktem Bodenkontakt stehen (Gehölzpflanzungen, bodengebundene Fassadenbegrünungen, Rasen, Staudenflächen), ist nur in den ersten Jahren nach der Pflanzung eine Bewässerung zu berücksichtigen (Anwuchs- und Entwicklungspflege). Diese Pflege soll eine artgerechte Entwicklung und Etablierung am Standort der jeweiligen Vegetation ermöglichen (ÖNORM L1120:2016 07 01, 2016).

Die Wasserbedarfstabelle war die Grundlage der Dimensionierung der Grünflächen in der Anni-Stern-Braunberggasse 2. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass

- 1) eine bodengebundene Fassadenbegrünung 0,8 L/m²/Tag (Matzinger et al., 2017),
- 2) eine intensive Dachbegrünung mit Stauden 0,25 L/m²/Tag (Walker et al. 2016), und
- 3) die Bewässerung der Gehölze in den ersten 15 Jahren 13,3 L/Individuum/Tag (ÖNORM L1112) benötigen.

Bei einer potenziell zu begrünenden Fassadenfläche von 708 m², einer Dachfläche von 688 m² sowie elf Gehölzpflanzungen ergibt sich ein Wasserbedarf von 844 L/Tag für die gesamte neu zu begrünende Fläche. Dies würde mit der anfallenden Grauwassermenge in der Anni-Stern-Braunberggasse 2 von rund 2000 L/Tag abgedeckt werden können.

Tabelle 27: Durchschnittlicher Wasserbedarf unterschiedlicher grüner Infrastrukturen (Allabashi et al., 2022).

Grüne Infrastruktur		Wasserbedarf innerhalb einer Vegetationsperiode (L/m ²)	Quelle
Dachbegrünung	extensiv Sedum	keine Bewässerung	ÖNORM L1112:2010-09-01 (Walker et al., 2016)
	extensiv Stauden	0,25 / Tag	
	intensiv	1,3 / Tag	ÖNORM L1112:2010-09-01
Fassadenbegrünung	Teilflächiger Vegetationsträger	2 / Tag	Fa. Tech Metall Erzeugungs- Handel u. Montage GesmbH Fa. Optigrün Simlat 2017 Fa. 90 DEGREEEN Eppel 2015 Fa. Optigrün
		2,8 / Tag	
	Living Wall	10 / Tag	
		2,7 / Tag	
Topf- und Trogbepflanzung	Bodengebunden	3 / Tag	(Matzinger et al., 2017)
		2,8L / Tag	
	abhängig nach Pflanzen- und Behältergröße	0,5-0,8 / Tag	
Park- und Grünflächen	Rasen	10-15x pro Monat	ÖNORM L1112:2010-09-01
		4,5 / Tag	(Eppel et al., 2012)
		4 x 20 / Monat	ÖNORM L1112:2010-09-01
	Stauden- und Gehölzflächen	3,5 / Tag	(Eppel et al., 2012)
	Staudenbeet	4 x 30 / Monat	ÖNORM L1112:2010-09-01
Gehölze	Strauchfläche	4 x 20 / Monat	ÖNORM L1112:2010-09-01
	Baum bis 15 Jahre	2 x 200 / Monat	ÖNORM L1112:2010-09-01
	Obstgehölze	87 / Monat	(Eppel et al., 2012)

Dimensionierung der Begrünungsflächen zur Simulation der mikroklimatischen Einflüsse der Begrünung vor dem Hintergrund des Grauwasserangebots

Der in Österreich durchschnittliche Pro-Kopf-Wasserverbrauch liegt bei 130 L täglich. Das Grauwasser, das aus Wasserhähnen (Bad, WC, Küche), Dusche und Badewanne anfällt, liegt nach der Berechnung des BMNT (2017) bei 63,7 L/Kopf/Tag, mit zusätzlichem Grauwasser aus Spül- und Waschmaschine bei rund 80 L/Kopf/Tag. In der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wr. Neustadt fallen pro Person pro Tag durchschnittlich nur 42 L an, was somit deutlich unter dem österreichischen Durchschnitt liegt. Bei der Referenz-Grauwasseranlage fallen somit aus 19 Wohneinheiten, in der zum Zeitpunkt der Abschätzung durchschnittlich 2,5 Personen lebten (48 Personen insgesamt), täglich rund 2000 L behandeltes Grauwasser (bGW) an. Bei einem Wasserbedarf für die Begrünung von 844 L und einer anfallenden Menge an 2000 L ist nach wie vor ausreichend Brauchwasser für andere Zwecke wie zum Beispiel der Toilettenspülung verfügbar.

In Anbetracht der Skalierung von gebäudenahen Begrünungsmaßnahmen, welche mit GW versorgt werden, ist die Anzahl der Personen pro Wohnfläche auf Begrünungsfläche entscheidend. Es ist davon auszugehen, dass ein Wohngebäude mit 200 Personen bei effektiver Flächenausnutzung weitaus mehr GW produziert, als für Bewässerungszwecke verwendet werden kann. Bei einer durchschnittlichen GW-Menge von 80 L pro Person und einem Wasserbedarf für wandgebundene Fassadenbegrünungen (Living Wall) von 5 L pro m², kann beispielsweise pro Person 40 m² Fassadenfläche begrünt werden.

5.3.2. Ergebnisse der Mikroklimasimulation: Klimatische Effekte im Außenbereich (GREENPASS®)

Die Begrünung des Gebäudes und die Pflanzung zusätzlicher Bäume in gebäudenähe führen zu einer verbesserten Klimaresilienz des gesamten Projektgebiets. Infolgedessen kann eine Verbesserung aller untersuchten Indikatoren verzeichnet werden, dies lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- *Thermischer Abluftstrom (TLS)*: das Projektgebiet wird durch die Planung um -0,058°C gekühlt.
- *Thermischer Komfort (TCS)*: Erhöhung des thermischen Komforts auf 1,74 TCS
Reduktion der gefühlten Temperatur um 15,5°C (um 15 Uhr)
Reduktion der Lufttemperatur um zu 0,3°
- *Thermische Speicherfähigkeit (TSS)*: Reduktion um 6,5%
- *Abfluss (ROS)*: -2% weniger Regenabfluss, um 2% mehr Speicherung durch Vegetation
- *CO₂ Speicherung (CSS)*: Erhöhung um 11% an einem Hitzetag
- *Blattfläche (LA)*: Erhöhung um 12%

In Abbildung 29 ist sind die zwei Simulationsobjekte in der Software Envimet zu sehen, was die Grundlage für die weiteren Berechnungen darstellte. In Abbildung 30 sind die Klimaindikatoren des aktuellen Zustandes angeführt, im Vergleich dazu in Abbildung 31 jene der neuen Variante mit den Begrünungsmaßnahmen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bereits die Begrünung von einem Gebäude zur Verbesserung der Klimaresilienz des gesamten Projektgebiets beiträgt. Durch die Begrünungsmaßnahmen wird der Thermische Komfort des Projektgebiets in der Planungsvariante verbessert. Der Abflussbeiwert wird durch den Einsatz einer Dachbegrünung von 0,66 im status-quo auf 0,64 in der Planung reduziert, d.h. 36 % des Regenwassers können versickern, gespeichert und verdunstet werden. Die Begrünungsmaßnahmen reduzieren den Regenwasserabfluss des gesamten Projektgebiets um 2 %.

Abbildung 29: Envimet Klimasimulationsmodell des Wohnhauses in Wiener Neustadt. Planungsvariante mit Begrünung (links) und Bestandsobjekt (rechts).

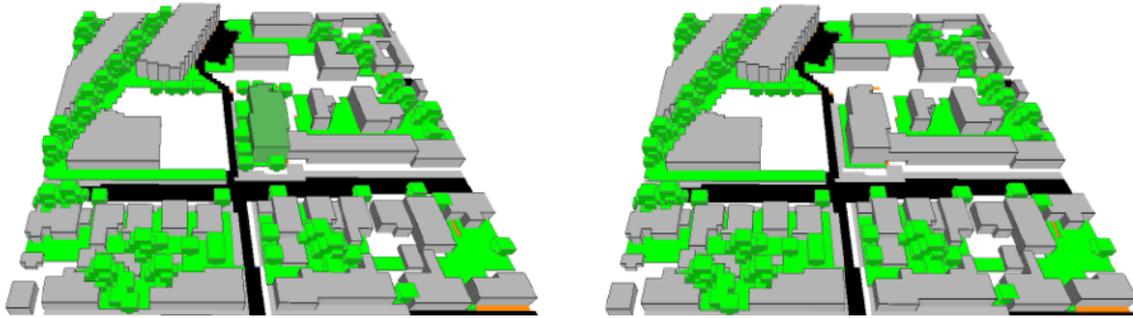


Abbildung 30. Analyse der Keyperformance-Scores (blau) und der Keyperformance-Indikatoren (gelb) des aktuellen Zustandes (GREENPASS® 2021)

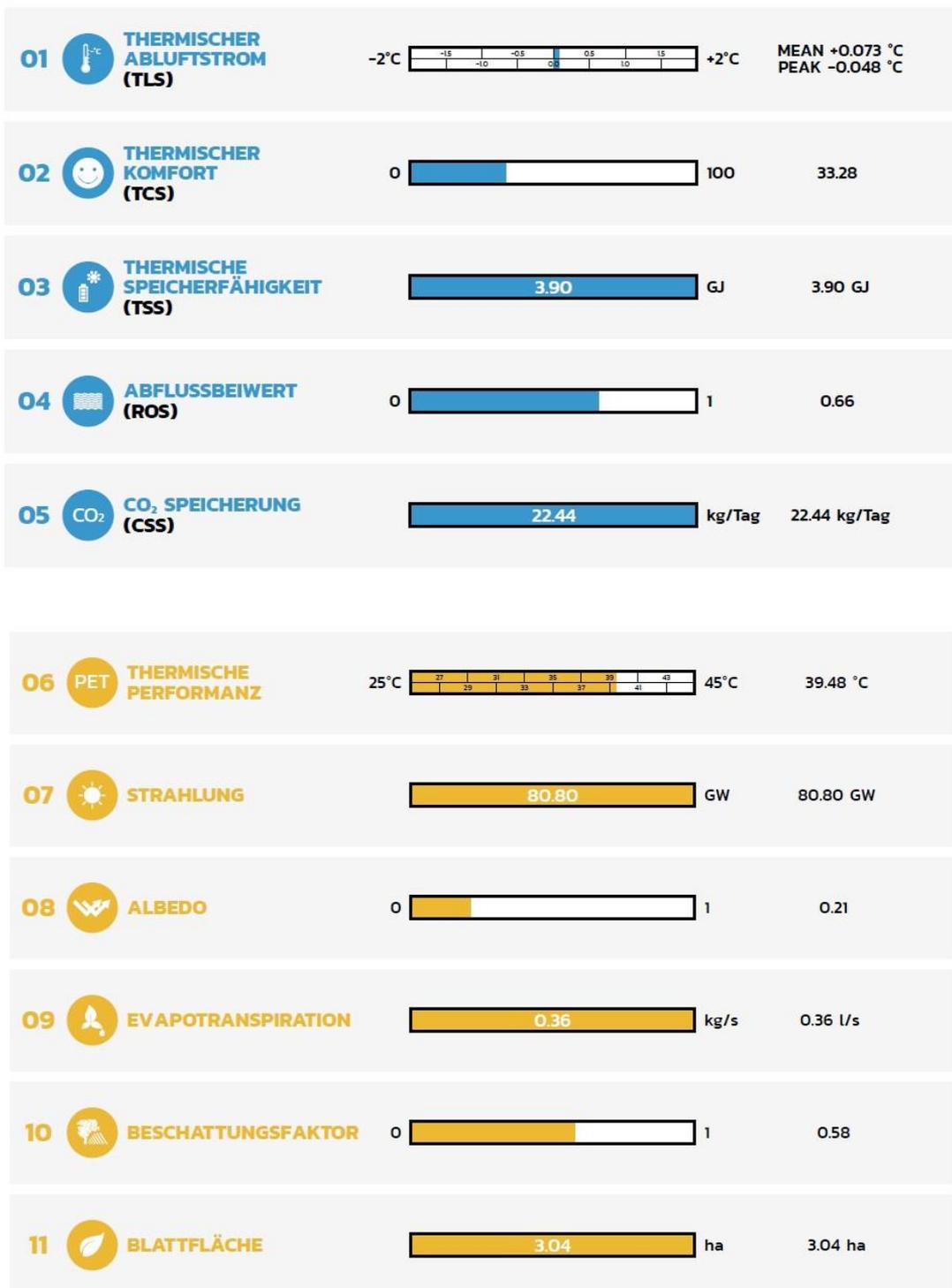


Abbildung 31. Analyse der Keyperformance-Scores (blau) und der Keyperformance-Indikatoren (gelb) des Planungsvorhabens (GREENPASS®2021)

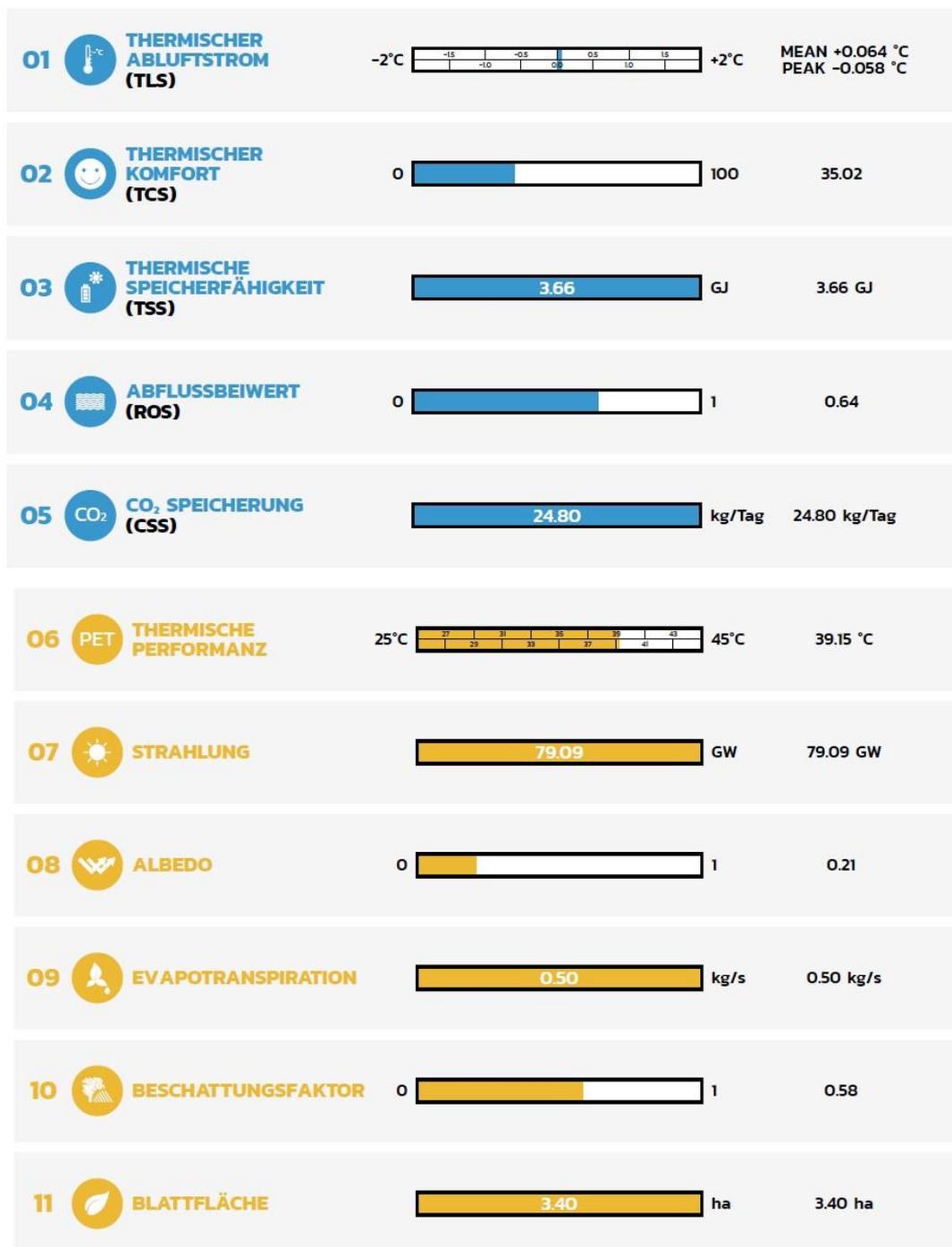
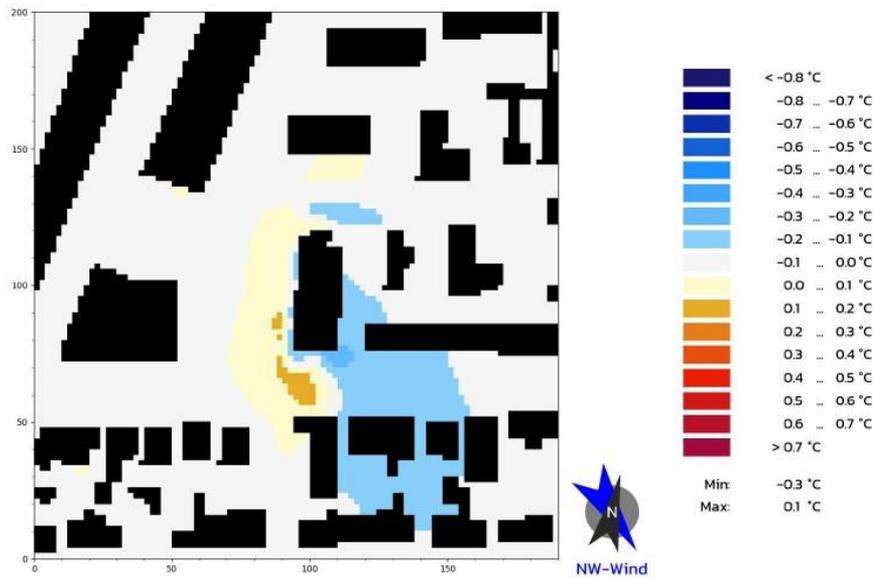


Abbildung 32 zeigt die mittlere Lufttemperatur rund um das Referenzgebäude um 15:00 Uhr ohne die geplanten grünen Infrastrukturen. Durch die Errichtung der Fassaden- bzw. Dachbegrünung sowie der Neupflanzung von Gehölzen wird die Umgebungstemperatur des Gebäudes als auch das naheliegende Quartier gekühlt, wie in Abbildung 32 ersichtlich ist.

Abbildung 32: Simulation der Lufttemperatur des Planungsvorhabens um 15Uhr (GREENPASS® 2021)



Trotz der Verbesserung des thermischen Komforts und der Gewährleistung einer guten Durchlüftung des Projektgebiets konnte GREENPASS® problematische Aspekte feststellen, die sich durch die Planung noch nicht beseitigen lassen (Abbildung 33). Es wird darauf hingewiesen, dass die großflächigen versiegelten Flächen (z.B. Parkplatz des Supermarktes sowie asphaltierte Freiflächen zwischen den Gebäuden) zu einer vermehrten Bildung von Hitzeinseln führen. Zudem herrscht aufgrund des hohen Versiegelungsgrad ein hoher Regenwasserabfluss, eine Speicherung des Wassers ist hier nicht möglich. Weitere Analysen ergaben, dass die aktuelle Anordnung der Gebäude und Gehölze hohe Windgeschwindigkeiten entlang der Kreuzung zwischen Anni-Stern-Braunberggasse 2 und Fischauer Gasse begünstigen (Abbildung 33).

Abbildung 33: Problematische Aspekte wie Hitzeinsel, Windgeschwindigkeit und Abflussbeiwerte, die trotz planerischer Intervention nicht beseitigt werden konnten (GREENPASS®2021)

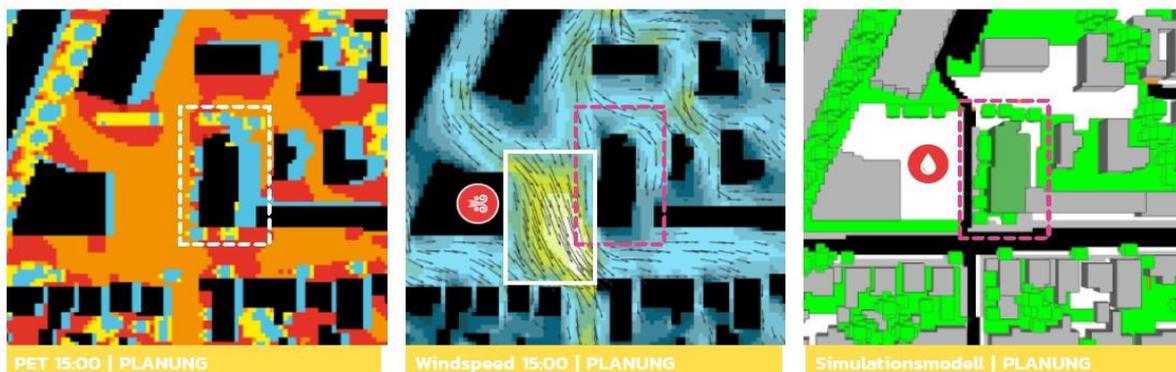
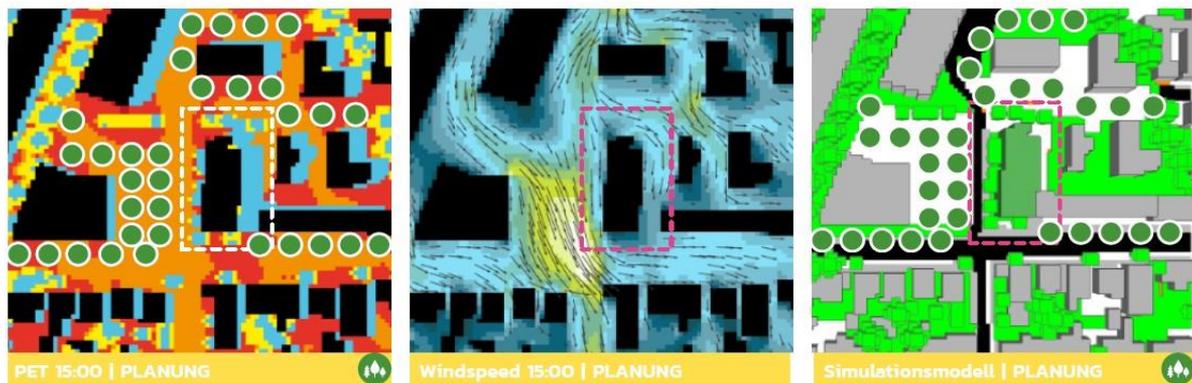


Abbildung 34 umfasst weitere Optimierungsvorschläge von Seiten GREENPASS®, um die planerischen Interventionen noch klimaresilienter und effektiver zu gestalten. Eine zusätzliche Pflanzung von 32 Gehölzen entlang der Fischauer Gasse sowie auf dem Supermarktparkplatz reduzieren die Bildung von Hitzeinseln, Optimieren die Albedo durch die Entsiegelung von Flächen und bremsen die Windgeschwindigkeit. Dies würde einen zusätzlichen Bewässerungsbedarf der Gehölze von

425 L/Individuum/Tag in den ersten 15 Jahren bedeuten. Bei den aktuell durch die Grauwasseranlage anfallenden 2000 L/Tag könnte der gesamte Optimierungsvorschlag umgesetzt, und die benötigte Wassermenge von 1309,6 L/Tag durch das Grauwasseraufkommen abgedeckt werden.

Abbildung 34: Optimierungsvorschlag von Seiten GREENPASS® zur weiteren Reduktion von Hitzeinseln, Windgeschwindigkeit und Regenwasserabfluss; die grünen Kreise stellen die zusätzliche Pflanzung von 32 Gehölzen dar (GREENPASS®2021)



5.3.3. Innenraumklimaeffekte durch Gebäudebegrünung

Die Analyse der Raumklimasimulation basiert auf der Anzahl der Stunden, die über bzw. unter bestimmten Schwellentemperaturen liegen. Die Schwellentemperaturen sind wie folgt angegeben:

- Schwellenwert für Überhitzung nach der OIB-Richtlinie 6 2015
Dieser Schwellenwert definiert die maximale operative Temperatur, die ein Innenraum aufweisen darf, bevor er laut der veralteten OIB-Richtlinie 6 2015 als "überhitzt" gilt. Dieser Schwellenwert ist seit 2019 nicht mehr gültig.
- Schwellenwert für Überhitzung nach der OIB-Richtlinie 6 2019
Dieser Schwellenwert definiert die maximale operative Temperatur, die ein Innenraum aufweisen darf, bevor er laut der aktuell gültigen OIB-Richtlinie 6 aus dem Jahr 2019 als "überhitzt" gilt. Es ist darauf zu achten, dass dieser Grenzwert in neu errichteten Häusern nicht überschritten werden darf. Der Grenzwert wird wie folgt berechnet:

$$\theta_{OIB} = \frac{1}{3} * T_{NAT,13} + 21,8^{\circ}C$$

Dabei beschreibt $T_{NAT,13}$ jene Temperatur, die an einem bestimmten Ort an durchschnittlich 13 Tagen im Jahr überschritten wird. Diese beträgt in Wiener Neustadt 22,4 °C. Der Schwellenwert beträgt daher 29,3 °C

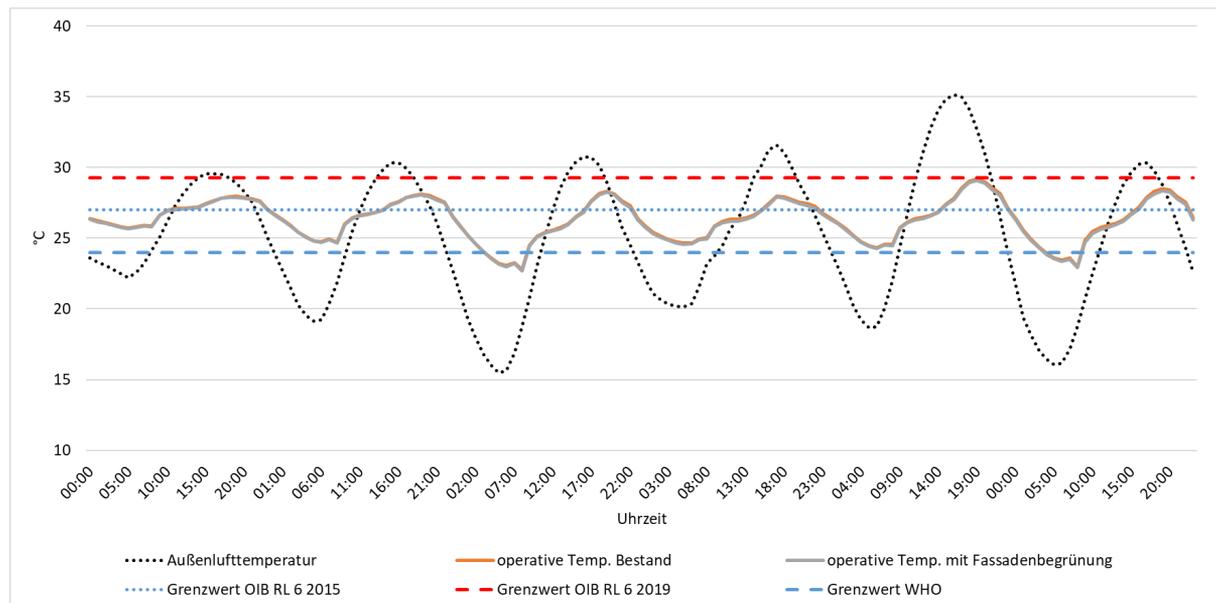
- Schwellenwert für Überhitzung nach der World Health Organisation (WHO)
Gemäß der WHO beträgt der Schwellenwert zur medizinischen Überhitzung 32 °C untertags und 24 °C in der Nacht. In dieser Analyse wird der Schwellenwert von 24 °C in der Nacht angewandt (WHO-Regionalbüro für Europa, 2019).

Bei einer exemplarischen einwöchigen Auswertung (Abbildung 35) zeigt sich, dass trotz maximalen Außentemperaturen, zwischen ca. 30 bis 35 °C, es zu keiner Überschreitung der Grenztemperatur der

sommerlichen Überwärmung kommt. Dies kann auf die teilweise kühlen Nachttemperaturen von bis zu ca. 15 °C und die berücksichtigte Nachtlüftung zurückgeführt werden.

Bezüglich der Auswirkung einer Fassadenbegrünung auf das Innenraumklima, ist eine maximale Reduktion der operativen Innenraumtemperatur von lediglich 0,1 K erkennbar. Dies führt dazu, dass in Abbildung 35 die Temperaturkurven der beiden Varianten nahezu überlappen.

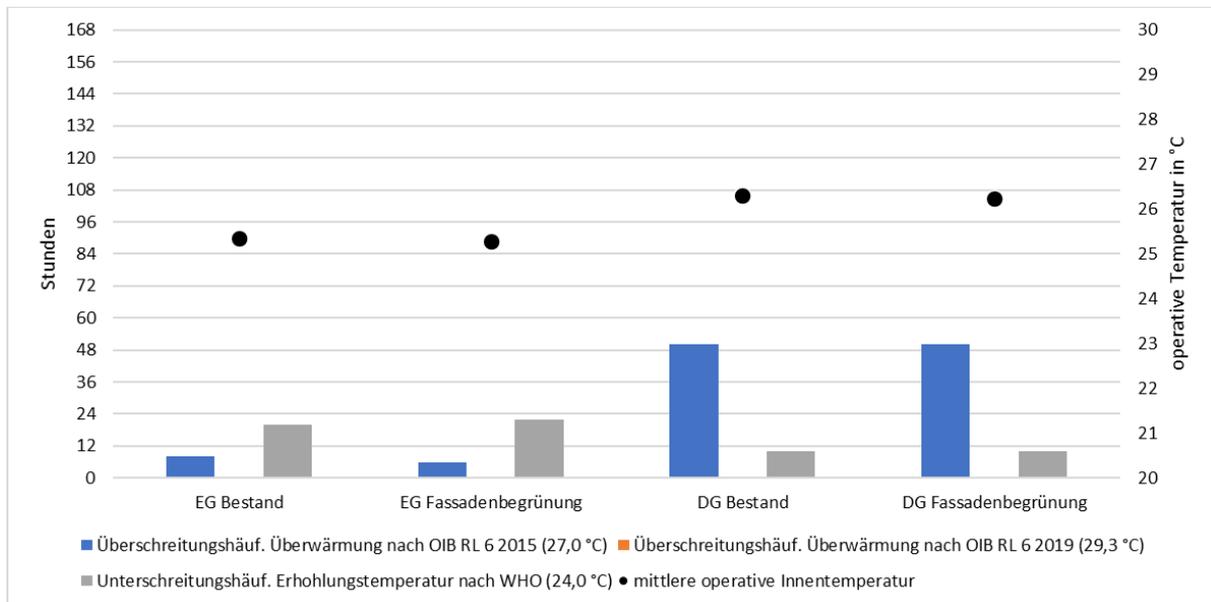
Abbildung 35: Ergebnisausschnitt der Simulation des Innenraums im Zeitraum 24. bis 30.07.



Durch eine Auswertung der Überschreitungshäufigkeiten der Grenzwerte wird die Wirksamkeit der Fassadenbegrünung auf die operative Innenraumtemperatur dargestellt.

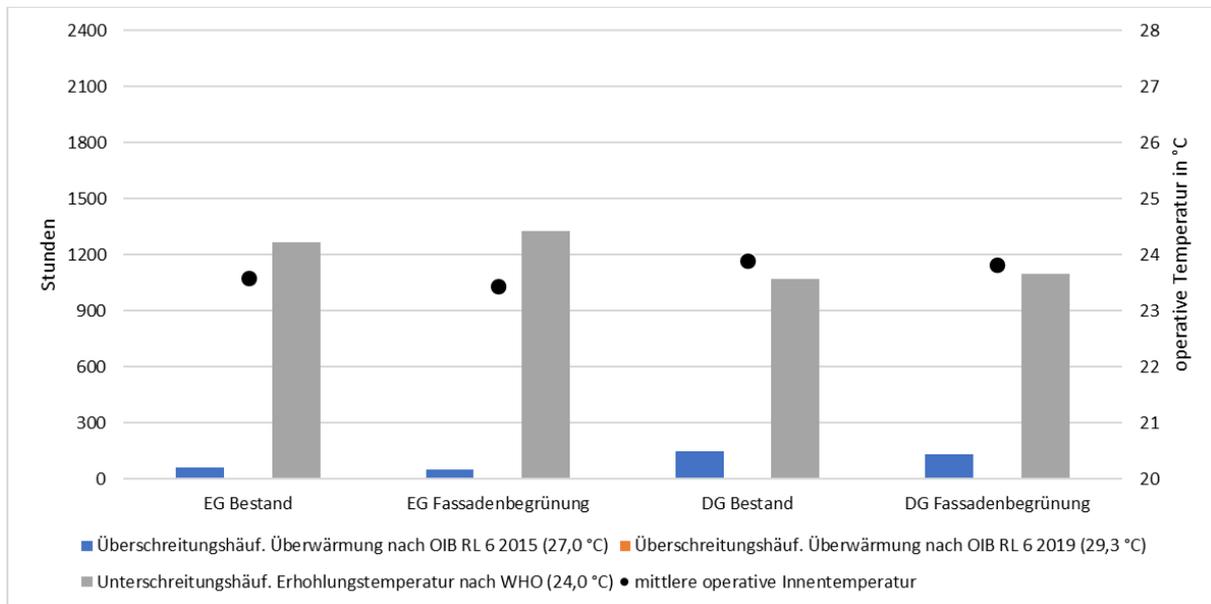
Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse der Auswertung des Zeitraums 24. bis 30. Juli. Dabei wird deutlich, dass die Räume im Erdgeschoß einer deutlich geringen Gefahr der Überhitzung ausgesetzt sind. Es gibt kaum Überschreitungen über 27 °C, die Stunden unter der medizinischen Erholungstemperatur von 24 °C, sind jedoch, mit weniger als 24 Stunden, sehr gering. Bei den Räumen im Dachgeschoß ist die Anzahl an Stunden über 27 °C, mit ca. 50 Stunden, deutlich erhöht. Es kommt jedoch zu keiner Überschreitung der Grenztemperatur der sommerlichen Überwärmung. Die Anzahl an Stunden unter der medizinischen Erholungstemperatur ist weiter reduziert, bei ca. 10 Stunden. Die mittlere operative Temperatur im Betrachtungszeitraum beträgt im Dachgeschoß um ca. 1 K mehr als im Erdgeschoß. Wie bereits bei Abbildung 36 zeigt sich, dass der Einfluss der Fassadenbegrünung auf die operative Innenraumtemperatur nahezu keinen Einfluss besitzt.

Abbildung 36: Auswertung der Über- bzw. Unterschreitungshäufigkeiten sowie der mittleren operativen Innenraumtemperatur im untersuchten Zeitraum (24.-30.7.)



Wird der Zeitraum des gesamten Sommers (Juni bis August) betrachtet (Abbildung 37), zeigt sich, dass der Unterschied zwischen EG und DG über den gesamten Sommer keinen großen Einfluss hat. Hier zeigt sich eine Differenz der mittleren operativen Innenraumtemperatur von 0,4 K zwischen EG und DG. Grundsätzlich zeigt sich eine mittlere operative Innenraumtemperatur von ca. 24 °C was auf den hochwirksamen Sonnenschutz und das gedämmte Gebäude zurückzuführen ist. Im EG sind ca. 60 % der Stunden unter 24 °C, im DG liegt dieser Wert bei ca. 50 %. Dies entspricht einer Differenz von ca. 180 Stunden. Durch die Fassadenbegrünung kann die Anzahl an Stunden unter 24 °C um 39 im EG und um 41 im DG erhöht werden. Bei einer Analyse der Stunden über 27 °C zeigt sich, dass sich im EG 3 % der Stunden über 27 °C befinden, wohingegen sich im DG ca. 7 % der Stunden über 27 °C befinden.

Abbildung 37: Auswertung der Über- bzw. Unterschreitungshäufigkeiten sowie der mittleren operativen Innenraumtemperatur im Sommer (Juni bis August)



Die Analyse zeigt, dass eine Fassadenbegrünung auf den Innenraum nur einen geringen Einfluss hat. Aufgrund des hochwirksamen außenliegenden Sonnenschutzes kann der primäre Wärmeeintrag in das Gebäude verhindert werden. Die Simulation zeigt, dass der Wärmeeintrag über die Fassade gering ist, eine Fassadenbegrünung diesem Wärmeeintrag zusätzlich entgegenwirken kann. Die Einflüsse der reduzierten Fassadentemperatur durch die Fassadenbegrünung auf den Innenraum sind jedoch im Bereich von ein paar zehntel Grad. Hierbei muss jedoch angemerkt werden, dass der Einfluss der Evapotranspiration der Pflanzen nicht in der Berechnung berücksichtigt wird und die Ergebnisse daher, bei einer Berücksichtigung dieser, davon abweichen können.

5.4. Prototypenbau zur Demonstration, Validierung und Verwertung

5.4.1. Prototypenbau

In Abbildung 38 ist die prototypische Versuchsanlage, welcher den nachgeschalteten Teil der STREBEL GWVA nachgebildet. Durch Einsatz einer drehzahlgeregelten Umwälzpumpe UP2 (siehe Abbildung 39) soll ein schwankender Grauwasserzulauf simuliert werden.

Abbildung 38: Prototyp der Strebel Grauwasserverwertungsanlage (© GEBE-STREBEL)



Abbildung 39: Umwälzpumpe UP2 (© GEBE-STREBEL)



Die Wärmemengen in diesem geschlossenen Wasserkreislauf werden mit dem Durchflussmesser V5 in dazugehöriger Kombination mit den Temperaturfühlern T9, T10, T11, T12, T13 und T14 gebildet (siehe Abbildung 40).

Abbildung 40: Durchflussmesser V5 mit Temperaturfühler T9 (© GEBE-STREBEL)



Die Grundwasserwärmepumpe HP12S16W-M-BC (siehe Abbildung 42) wird im Betriebsmodus Warmwasser über den dazugehörigen Speicherfühler TWP betrieben. Es wird eine gewünschte WW-Temperatur und eine Hysterese eingestellt. Zusätzlich wird bei Unterschreiten der Grenztemperatur am Fühler T12 die WP außer Betrieb genommen. Bilanzierung der Wärmemengen im Primärkreis der WP über Durchflussmesser V3 und Temperaturfühler T5 und T6, auf der Sekundärseite durch Durchflussmesser V4 und Temperaturfühler T7 und T8. Die Stromaufnahme der WP wird mit Stromsensoren über den Energiezähler CAN-EZ3 gemessen.

Die WP bezieht die Energie aus Speicher2 (siehe Abbildung 38, zweiter Speicher von links). Aus Speicher1 (siehe Abbildung 38, erster Speicher von links) wird bei ausreichender Differenz zwischen T9 und T14 durch Einschalten der Umwälzpumpe UP1 und Aktivierung von MIMO1 über den Plattenwärmetauscher PWT1 (Abbildung 41) Wärme entzogen. Die Bilanzierung dafür erfolgt primärseitig über V1, T1 und T2, sekundärseitig über V2, T3 und T4. Ob der Mischer MIMO2 eingebaut werden muss, hängt vom Betriebsverhalten der WP ab.

Abbildung 41: Plattenwärmetauscher PWT1 (© GEBE-STREBEL)



Abbildung 42: Wärmepumpe HP12S16W-M-BC (© GEBE-STREBEL)



Der Betrieb der Wärmemengenzähler erfolgt über den UVR610S-MODB und den UVR610S-OD Regler (siehe Abbildung 43). Ebenso werden die Pumpen UP1, UP2, UP3 und die Stellmotoren von MIMO1 und MIMO2 über diese Regler geregelt. Die 2 Regler und der Energiezähler CAN-EZ3 (siehe Abbildung 44) werden mit CAN-Bus verbunden.

Abbildung 43: UVR610S-MODB und UVR610S-OD Regler (© GEBE-STREBEL)



Abbildung 44: Energiezähler CAN-EZ3 (© GEBE-STREBEL)



5.4.2. Ergebnisse der Validierungsmessungen

Die Messungen an der prototypischen Versuchsanlage hatten das Ziel, die Ergebnisse der Anlagensimulation durch reale Messergebnisse zu validieren. Nachfolgend sind einige exemplarische Auswertungen dargestellt. Die Messreihen wurden zunächst ohne externe Wärmezufuhr durchgeführt, das heißt es erfolgte keine Erwärmung des Grauwassers vor Eintritt in die prototypische Versuchsanlage. Um die Temperatur des warmen Grauwassers beim Eintritt in die Anlage besser simulieren zu können (sodass es beispielsweise warmen Grauwasser aus Dusche entspricht), wurde in weiterer Folge eine externe Wärmequelle in Form eines Elektro-Heizstabs in der prototypischen Versuchsanlage eingebaut.

Validierungsmessungen ohne externer Wärmezufuhr

Ohne externe Wärmezufuhr erreichte die prototypische Versuchsanlage eine Warmwassertemperatur von 32 °C anstelle der gewünschten Solltemperatur von 60 °C. Dies lag daran, dass es sich bei der Anlage um ein geschlossenes System handelt, während die Grauwasserverwertungsanlage in einem tatsächlichen Anwendungsfall in einem Gebäude ein offenes System darstellt: Während bei der Versuchsanlage der Wasserkreislauf geschlossen ist, fließt im realen Anwendungsfall warmes Grauwasser in die Anlage ein, wird thermisch und stofflich verwertet und fließt danach nicht mehr in die Anlage zurück.

Während des mehrtägigen Betriebszeitraumes der prototypischen Versuchsanlage, stellte sich ein quasistationärer Betrieb ein. Dies äußerte sich dadurch, dass die Temperaturen im Warmwasserspeicher und im Grauwasserspeicher identisch waren.

In diesem quasistationären Betriebsfall traten teilweise Hochdruckstörungen der Wärmepumpe auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die herstellerseitige Temperaturobergrenze des Wärmequellenkreises der Wärmepumpe bei 20 °C liegt. Der Wärmeabfluss aus dem System, welcher den Warmwasserbedarf simuliert, wurde in der Versuchsanlage durch eine Wärmeabgabefläche in Form eines Heizkörpers umgesetzt.

Validierungsmessung mit externer Wärmezufuhr

Bei den Validierungsmessergebnissen mit externer Wärmezufuhr (Abbildung 45), werden zwei unterschiedliche Phasen analysiert – jene des Grauwasser-Zuflusses und jener der Warmwasserbereitung. Der Grauwasser-Zufluss ist mit 5 Minuten deutlich kürzer als die Warmwasserbereitungsdauer von 40 Minuten.

Phase I – Grauwasserzufluss

Während dem Zeitraum des Grauwasserzuflusses, wird aus dem Verbraucher-Pufferspeicher Energie in das System eingebracht. Der Speicher befindet sich in der passiven Phase der Aufladung. In diesen 5 Minuten werden dem Verbraucher 1,95 kWh an Wärme entzogen, wovon 0,05 kWh an die Umgebung verloren gehen und 1,9 kWh in die beiden Grauwasserspeicher gespeist werden. Die Temperatur des Grauwassers beträgt in diesem Betriebsfall 49 °C und ist deutlich höher als in einem realen Anwendungsfall einer Grauwasserverwertungsanlage (z.B. in einem Wohngebäude), bei der ein Grauwasserzufluss normalerweise mit ca. 30 °C erfolgt. Für die prototypische Versuchsanlage bedeutet dieses erhöhte Temperaturniveau jedoch lediglich, dass der Grauwasserzufluss zeitlich begrenzt werden muss, damit sich in den beiden Grauwasserspeichern keine unrealistischen Temperaturen einstellen.

Durch die Energiezufuhr erhöht sich die Temperatur im Grauwasserspeicher um ca. 5 K auf ungefähr 23 °C. Da der Prototyp als geschlossenes System ausgeführt ist, geht ein Teil der Energie (0,2 kWh) „ungenutzt“ in das Abwasser bzw. in den unteren Teil des Warmwasserspeichers über. Weiters kommt es zu Verlusten an die Umgebung in Höhe von ca. 0,1 kWh.

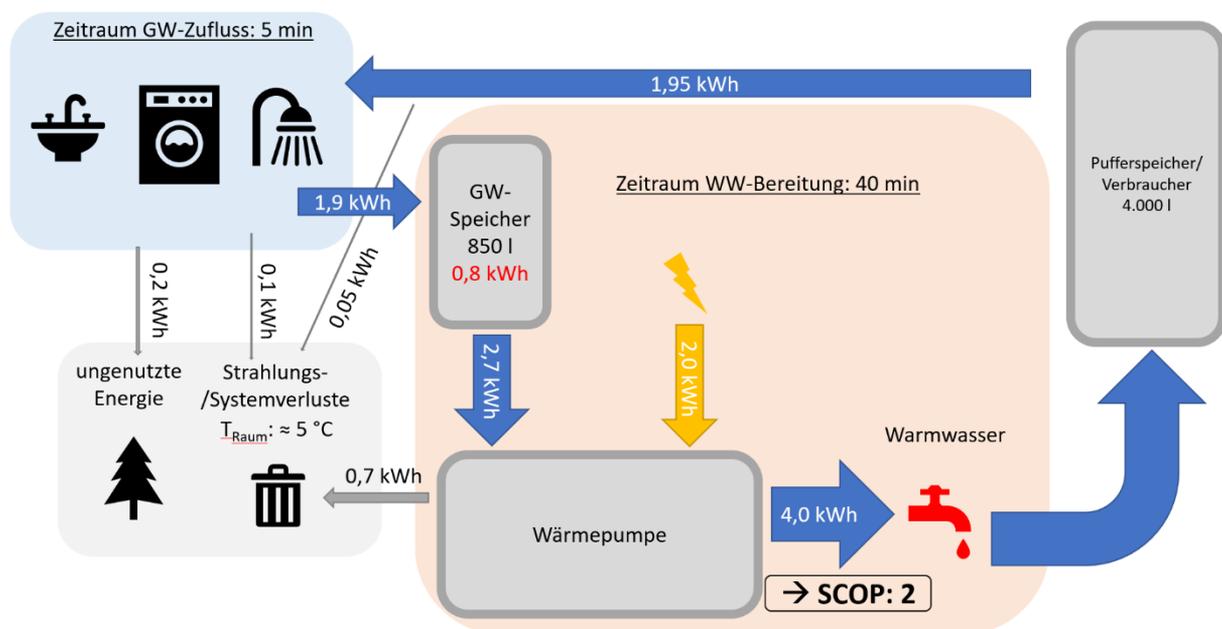
Phase II – Warmwasserbereitung

Zwischen dem Grauwasserzufluss und der Warmwasserbereitung liegt ein Zeitraum von 36 Minuten. In diesem Zeitraum befindet sich das System im Stillstand, es tritt kein Volumenstrom im gesamten System auf. Nach diesem Stillstand kommt es für den Zeitraum von 40 Minuten zur aktiven Phase der Warmwasserbereitung durch die Wärmepumpe.

Dabei werden dem Grauwasserspeicher 2,7 kWh an Wärme entzogen und mit Einsatz von 2 kWh Strom in der Wärmepumpe, 4 kWh Warmwasserenergie erzeugt. Während dieses Prozesses fallen 0,7 kWh (zirka 18 % der eingesetzten Energie) an Verlusten im System an. Dies ist auf die niedrigen Temperaturen von zirka 5 °C im Aufstellungsort sowie das Fehlen jeglicher Rohrdämmung zurückzuführen. Aufgrund der notwendigen Warmwassertemperatur von 60 °C und den hohen Verlusten erreicht die Wärmepumpe in diesem gesamten Versuchsdurchlauf eine Leistungszahl von 2,0 bzw. 2,35 bei verlustfreier Berechnung. Die Temperatur im Grauwasserspeicher wird durch den Wärmeentzug der Wärmepumpe um ca. 12 K reduziert. Ziel dieser Messungen war es, deren Ergebnisse mit der durchgeführten Anlagensimulation abzugleichen und nicht den Betriebspunkt optimaler Energieeffizienz nachzuweisen.

Die durchgeführten Validierungsmessungen führen zu Ergebnissen, welche sich mit den Ergebnissen der Anlagensimulation decken und den Erwartungen des Versuchsteams entsprechen.

Abbildung 45: Blockdarstellung der Validierungsmessung



Die Ergebnisse aus den durchgeführten Validierungsmessungen zeigen somit, dass das Zusammenspiel von Grauwasserzufluss mit den Spezifikationen der Wärmepumpe von entscheidender Bedeutung ist.

Die prototypische Versuchsanlage hat sich als hilfreich und geeignet bei der Gewinnung von Erkenntnissen zur thermischen Grauwassernutzung herausgestellt und sollte in nächsten Schritten weiterentwickelt werden.

5.4.3. Verwertung und Anwendungsmöglichkeiten

Demo-Case: Systemanwendung in einem Studierendenheim der OeAD-Wohnraumverwaltung

Die OeAD-Wohnraumverwaltungs GmbH ist ein gemeinnütziger Studierendenheimträger und bringt österreichweit pro Jahr ca. 10.000 internationale und nationale Studierende unter - 3.000 davon in ökologischen, energie-effizienten Unterkünften. Bereits seit 2005 gilt das Unternehmen als Vorreiter bei der Errichtung von Studierendenhäusern in Passivhausbauweise und trägt mit der Initiative „passive houses for active students“ maßgeblich zur Bewusstseinsbildung zum Thema ökologisches Bauen bei. Bei der vom Unternehmensgründer, Günther Jedliczka initiierten Sommeruniversität Green.Building.Solutions. beschäftigen Teilnehmer:innen in einem akademischen 3-wöchigen Lehrveranstaltungsprogramm mit Themen wie Passivhaus-Bauweise, Energieeffizienz, alternativen Technologien, erneuerbaren Energien und nachhaltiger Stadtplanung.

Die OeAD-Wohnraumverwaltungs GmbH plant und errichtet ein neues Studentenheim in Innsbruck, im Eigentum der Innsbrucker Immobiliengemeinschaft (IIG). Für diesen ökologischen und nachhaltig geplanten Neubau sollen die neuesten Technologien zur Wärmerückgewinnung und Abwasserverwertung berücksichtigt und gegebenenfalls angewendet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung des aufbereiteten Grauwassers zur Bewässerung der Grünfläche und Bäume, die vor dem Gebäude gepflanzt werden sollen. Entsprechender Raum im Kellergeschoss wäre vorhanden.

Für einen zur Projektlaufzeit in Planung befindlichen Neubau eines Studierendenwohnheims in Innsbruck wurde eine Demonstrationsanlage zur Grauwasserverwertung dimensioniert. Unter realistischen Betriebsannahmen und den aktuellen Energietarifen wäre für den konkreten Beispielfall die Kapitalrücklaufzeit einer derartigen Anlage zwischen 5 und 10 Jahren anzunehmen.

Ebenso erfolgte die Betrachtung einer Demonstrationsanlage für einen möglichen Sanierungsfall. Als Beispielgebäude diene hierfür ein Studierendenheim im 11. Wiener Gemeindebezirk. Im Zuge einer Sanierung ist insbesondere der Platzbedarf für die Rohrleitungen und die haustechnische Anlage geeignet einzuplanen.

5.5. Projektinnovationen, Weiterentwicklungen und Highlights

5.5.1. Technisch-ausgereifte Systemlösung

Das Projekt hatte zum Ziel, eine technisch ausgereifte Systemauslegung zu schaffen, sodass die Nutzer:innen uneingeschränkt in ihrem Verhalten leben können, die Wärme rückgewonnen wird und die Pflanzen, die mit dem behandelten Grauwasser bewässert werden, in einer für sie optimalen Umgebung wachsen.

Die technische Entwicklung des Systems wurde mit dem Mittel der dynamischen Anlagensimulation, gepaart mit praktischen Erwägungen der Robustheit und der lebensdauer-förderlichen Betriebsweisen der Komponenten sowie der Trinkwasserhygiene, konsequent umgesetzt. Die Festlegung der Anlagenkonstellation sowie der Prototyp wurden vorbereitet und erfolgreich umgesetzt.

5.5.2. Hohe Energieeffizienz

Das Projekt hatte zum Ziel, ein wartungsarmes und dauerhaftes Konzept und entsprechende Lösungen zu entwickeln, um die Anforderungen der EU-Gebäuderichtlinie ab dem Jahr 2020 zu erreichen (Stand der gesetzlichen Entwicklung: 2020).

Es wurden zahlreiche Anlagenvarianten hinsichtlich ihrer Energieeffizienz simulationstechnisch überprüft. Gewählt wurde schließlich eine Anlagenkonstellation mit Wärmenutzung des STREBEL behandelten Grauwassers über einen Wärmetauscher und eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe. Es zeigte sich bei der überwiegenden Zahl der untersuchten Varianten eine hohe energetische Performance und eine hervorragende Ausnutzung des Wärmeinhalts des STREBEL behandelten Grauwassers. Somit konnte auf der Basis einer sehr guten Energieeffizienz die Anlagenkonstellation nach praktischen Überlegungen optimiert werden. In der gewählten Konstellation ergibt sich eine Jahresarbeitszahl der Wärmeerzeugung von 3,5 und eine mit Abkühlung des STREBEL behandelten Grauwassers bis auf eine Temperatur von zirka 5 °C.

5.5.3. Erfolgreiche Klimawandelanpassung

Das Projekt hatte zum Ziel, Klimawandelanpassungsmaßnahmen auf Basis der Nutzungsmöglichkeiten des STREBEL behandelten Grauwassers zu entwickeln und zu erproben.

Für die Durchführung des Pflanzenversuchs liegen Ergebnisse aus zwei Untersuchungsjahren vor. Die Ergebnisse des Pflanzenversuchs zeigen, dass der überwiegende Anteil der getesteten Pflanzenarten das STREBEL behandelte Grauwasser sehr gut vertragen und es für die Nutzung als Bewässerung von grünen Infrastrukturen geeignet ist. Unbehandeltes Grauwasser kann auch verwendet werden, da es noch immer besser ist damit zu gießen, als keine zusätzliche Bewässerung bereit zu stellen. Nichtsdestotrotz ist die Bewässerung mit behandeltem Grauwasser vorzuziehen, um die rechtlichen Rahmenbedingungen in Österreich einhalten zu können.

5.6. Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms „Stadt der Zukunft“

Eine Grauwasserverwertungsanlage zur Wärmerückgewinnung, Kühlung und Nutzwassergewinnung im Gebäudesektor kann zu den Gesamtzielen des Programms „Stadt der Zukunft“ in der 6. Ausschreibung wie folgt beitragen:

Ziel 1: Beitrag zur Entwicklung resilienter Städte und Stadtteile mit hoher Ressourcen- und Energieeffizienz, verstärkter Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie hoher Lebensqualität:

- **Ressourcen- und Energieeffizienz:** Eine Grauwasser-Verwertungsanlage ermöglicht die Wiederverwendung von Wasser, das in Haushalten und Gebäuden anfällt, für verschiedene Zwecke wie Toilettenspülung, Bewässerung oder sogar zur Kühlung von Gebäuden. Dies reduziert den Bedarf an frischem Trinkwasser und senkt den Energiebedarf für die Wasseraufbereitung.
- **Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energieträger:** Eine Grauwasser-Verwertungsanlage kann mit erneuerbaren Energien wie Solar- oder Geothermie gekoppelt werden, um die Wärme- oder Kälterückgewinnung zu unterstützen. Dadurch wird der Einsatz von fossilen Brennstoffen verringert und der Anteil erneuerbarer Energien im Gebäudesektor erhöht.
- **Hohe Lebensqualität:** Durch die Nutzung von Grauwasser für nicht-trinkwasserbedürftige Zwecke wie Bewässerung oder Toiletten kann frisches Trinkwasser eingespart werden. Dies trägt zu einer nachhaltigen Wasserversorgung bei und erhält die Lebensqualität in den Städten aufrecht.

Ziel 2: Beitrag zur Optimierung und Anpassung der städtischen Infrastruktur und zur Erweiterung des städtischen Dienstleistungsangebots vor dem Hintergrund fortschreitender Urbanisierung und erforderlicher Ressourcen- und Energieeffizienz:

- **Optimierung der städtischen Infrastruktur:** Eine Grauwasser-Verwertungsanlage ermöglicht eine angepasste Infrastruktur, die die Erfassung, Aufbereitung und Verteilung von Grauwasser erlaubt. Dies fördert die Entwicklung nachhaltiger städtischer Wasser- und Abwassersysteme und optimiert den Einsatz von Ressourcen.
- **Erweiterung des städtischen Dienstleistungsangebots:** Die Implementierung von Grauwasser-Verwertungsanlagen schafft neue Dienstleistungen und Geschäftsmöglichkeiten im Bereich der nachhaltigen Gebäudetechnik. Die Verwertung von Überschüssen des Grauwassers bzw. die Nutzung der stofflichen Ressource Grauwasser im Allgemeinen erlauben es Unternehmen, innovative Technologien und Dienstleistungen zu entwickeln und anzubieten.

Ziel 3: Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute auf dem Gebiet intelligenter Energielösungen für Gebäude und Städte:

- **Technologieführerschaft:** Durch die Entwicklung und Umsetzung von Grauwasser-Verwertungsanlagen kann Österreich seine Technologieführerschaft im Bereich nachhaltiger Gebäudetechnik stärken. Österreichische Unternehmen und Forschungsinstitute können

innovative Technologien, Systeme und Verfahren zur Wärmerückgewinnung, Kühlung und Nutzwassergewinnung entwickeln und diese international vermarkten. Dies fördert die Wettbewerbsfähigkeit der österreichischen Akteure auf dem globalen Markt für intelligente Energielösungen im Gebäudesektor und insbesondere auch der effizienten Wassernutzung in Gebieten mit Wasserknappheit, deren Zahl durch den Klimawandel ansteigen dürfte. Zudem können Partnerschaften zwischen Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Regierungsbehörden gebildet werden, um das Wissen und die Expertise in diesem Bereich weiter auszubauen und gemeinsam an zukunftsfähigen Lösungen zu arbeiten. Der Aufbau einer Technologieführerschaft trägt somit zur Schaffung von Arbeitsplätzen, zur Steigerung der Exporte und zur Förderung des Wirtschaftswachstums in Österreich bei.

Mit Beschluss der EU-Taxonomie-Verordnung durch die EU-Kommission werden auf europäischer Ebene erstmals konsolidierte Vorgaben zur Beurteilung von Investitionen und damit zusammenhängenden Wirtschaftstätigkeiten (für den Gebäudebereich z.B. Neubau, Renovierung bestehender Gebäude) für sechs Umweltziele (Klimaschutz, Klimawandelanpassung, Schonung der Wasserressourcen, Beitrag zur Kreislaufwirtschaft, Vermeidung von Umweltverschmutzung und Wahrung der Biodiversität) vorgelegt. Das vorliegende Projekt bietet in Anbetracht dieser künftigen gesetzlichen Vorgaben einen praxisorientierten Lösungsansatz für klimawandelangepasste Gebäude, sowohl im Neubau als auch im Rahmen einer umfassenden Renovierung bestehender Gebäude.

6 Schlussfolgerungen

6.1. Gewonnene Erkenntnisse und weitere Schritte bzw. Potentiale

Die Grauwasseranalysen ergaben, dass bGW den in der ÖNORM EN 16941-2 & 1. AEvKA festgelegten Grenzwerten entspricht und die Qualitätsanforderungen erfüllt.

Hinsichtlich der chemisch-physikalischen und mikrobiologischen Parameter eignet sich bGW für folgende Anwendungen:

- WC-Spülung
- Gartenbewässerung
- Reinigung (Spül- und Waschmaschine)

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass sich die Bewässerung mit behandeltem Grauwasser aus pflanzenphysiologischer Sicht für die Bewässerung von grünen Infrastrukturen eignet. Ergänzend dazu zeigte der zweite Vegetationsversuch, dass eine Bewässerung mit unbehandeltem Grauwasser noch immer besser ist als keine zusätzliche Bewässerung. Nichtsdestotrotz ist die Bewässerung mit behandeltem Grauwasser vorzuziehen, um die rechtlichen Rahmenbedingungen einzuhalten.

In beiden Versuchen konnte keine Wirkung auf den Chlorophyllgehalt und den Zuwachs (Blattanzahl, Biomasse-Frischgewicht, Terminaltrieb) festgestellt werden. Zusätzlich hat die Vitalitätskontrolle der Arten *A. pseudoplatanus* und *T. cordata* ergeben, dass die Bewässerung mit bGW auch langfristig keinen Einfluss auf den Zuwachs der Terminaltriebe und den relativen Chlorophyllgehalt hat. Der Versinterungsversuch zeigte, dass der Grad der Versinterung bei allen Bewässerungsgruppe derselbe ist und die Bewässerungstechnik durch bGW und uGW nicht beeinträchtigt wurde. Grauwasser bietet somit eine ressourcenschonende und stetig verfügbare Möglichkeit den Wasserbedarf grüner Infrastrukturen zu gewährleisten.

Aufgrund der Ergebnisse der Pflanzenversuche 2020 und 2021 können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Arten, die sich für die Bewässerung mit behandeltem Grauwasser (bGW) eignen:

- *Acer pseudoplatanus* (Bergahorn)
- *Bergenia cordifolia* (Dickblatt Bergenia)
- *Tilia cordata* (Winterlinde)
- *Geranium macrorrhizum* (Balkan Storchenschnabel)
- *Parthenocissus tricuspidata* (Dreispitzige Jungfernebe)
- *Wisteria sinensis* (Blauregen)
- *Heuchera sanguinea* (Purpurglöckchen)

Lediglich die Art *Hedera helix* (Efeu) entwickelte sich in den Pflanzenversuchsreihen mit der Bewässerung von bGW schlechter als mit Trinkwasser. Sowohl stomatäre Leitfähigkeit als auch der Zuwachs beim Frischgewicht wurden durch die Bewässerung mit bGW negativ beeinflusst. Wodurch dies ausgelöst wurde, konnte nicht festgestellt werden, eine Eignung wird deshalb jedoch ausgeschlossen.

Arten, die sich für eine Bewässerung mit unbehandeltem Grauwasser (uGW) eignen:

- *Acer pseudoplatanus* (Bergahorn)
- *Bergenia cordifolia* (Dickblatt Begenia)
- *Tilia cordata* (Winterlinde)
- *Hedera helix* (Efeu)
- *Heuchera sanguinea* (Purpurglöckchen)
- *Wisteria sinensis* (Blauregen)
- *Parthenocissus tricuspidata* (Dreispitzige Jungfernebe)

Es konnte kein negativer Gesamteinfluss der uGW Bewässerung auf die untersuchten Arten im Vergleich zu Trinkwasser festgestellt werden. Lediglich *Geranium macrorrhizum* (Balkan Storchenschnabel) verzeichnete geringeren Zuwachs an Spross- und Wurzelmasse als auch eine reduzierte Blattanzahl.

Der Vegetationsversuch 2020 verglich behandeltes Grauwasser (bGW), unbehandeltes Grauwasser (uGW) mit Leitungswasser (FW) in einem Glashaus ohne natürlichen Niederschlag um die Eignung von Grauwasser für Bewässerungszwecke festzustellen. Um die Praxisrelevanz des Versuchs zu erhöhen, wurden im darauffolgenden Jahr 2021 die Pflanzen im Außenraum positioniert und eine weitere Gruppe (Niederschlagswasser) hinzugefügt. Diese Gruppe erhielt keine zusätzliche Bewässerung, sondern wurde nur durch den natürlichen Regen bewässert. Dieser Versuch zeigte, dass eine zusätzliche Bewässerung unabhängig, ob es sich dabei um FW, uGW oder bGW handelte, positive Auswirkungen auf die Entwicklung der Pflanzen im Vergleich zu keiner zusätzlichen Bewässerung hat. Dieser Effekt verstärkt sich insbesondere in Zeiträumen mit geringen natürlichen Niederschlägen. Die Ergebnisse der beiden Vegetationsversuche legen eine Implementierung der Nutzung von Grauwasser zur Bewässerung von grünen Infrastrukturen nahe. Mit einer entsprechenden Aufbereitung können alle rechtlichen Rahmenbedingungen eingehalten werden was die qualitativen Ansprüche betrifft. Mit einer durchschnittlichen Grauwassermenge von rund 80 L pro Person pro Tag sind auch die quantitativen Gegebenheiten vorhanden um den Bedarf an Brauchwasser für unterschiedliche Zwecke (Toilettenspülung, Bewässerung) zu decken. Ein Vorteil der Grauwasserverwendung ist vor allem dadurch gegeben, das Grauwasser eine relativ stabile Wasserquelle ist, welche täglich anfällt. Eine Limitierung hierbei ist, dass für die Verwendung von Grauwasser eine separate Leitungsführung, Trennung von Grau- und Schwarzwasser notwendig ist. Das Nachrüsten im Altbestand erscheint als durchaus komplex, aber bei entsprechender Planung machbar, wie das auf den gegenständlichen Ergebnissen aufbauende Demonstrationsprojekt „QUEEN Gudrun II“ zeigt. Dieses wird im Rahmen der 12. Ausschreibung „Smart City Demos – Living Urban Innovation 2019“ durch den Klima- und Energiefonds gefördert.

Im Anbetracht der Intensivierung der Folgen des Klimawandels sind Maßnahmen im Sinne der Kreislaufwirtschaft notwendig. Durch die Nutzung von Grauwasser, wird aus einem Abfallprodukt eine wertvolle Ressource geschaffen. Dadurch kann der steigende Wasserbedarf der durch die Implementierung grüner Infrastrukturen entsteht, welche vor allem zur Bekämpfung der städtischen Hitzeinseln eingesetzt werden, gedeckt werden. Der Einsatz von Grauwasser zeigte in den Pflanzenversuchen, dass die Verwendung dieser Ressource zu Bewässerungszwecken ein noch unerschöpftes Potential birgt. Die Nutzung von Abwasser als Ressource ist vor allem dort, wo Wasser ein knappes Gut darstellt, von enormer Bedeutung. Die Regularien für eine Wiedernutzung von gereinigtem Grauwasser legen das Augenmerk vor allem auf die Trübung sowie den Feststoffgehalt. Die mikrobiologische Belastung ist ebenfalls ein wichtiger Faktor, um Risiken für die Gesundheit zu

eliminieren (ÖNORM EN 16941-2, DWA M 277, ÖWAV-AB 011). Durch den Anstieg grüner Infrastruktur zur Klimawandelanpassung steigt auch der Wasserbedarf für die Bewässerung der Vegetation. Hierfür stellt die Nutzung von gereinigtem Grauwasser ein probates und bei Anwendung der vorhandenen Vorschriften sicheres Mittel dar.

Technische Systemauslegung

Der Grauwasser-Anfall außerhalb der Spitzenzeiten (siehe Kapitel 5.1.1) stellt bei Wohngebäuden mit 200 Bewohner:innen für die Auslegung der Strebel-Grauwasserverwertungsanlage kein Problem dar, da diese das anfallende Grauwasser kontinuierlich abarbeitet. Die Morgenspitzen geben im Wesentlichen die Dimensionierung des Grauwasserspeichers und der nachgeschalteten Reinigungsanlage vor.

Hinsichtlich der Haustechnik ist bereits bei der Gebäudeplanung zu berücksichtigen, dass Grau- und Schwarzwasser getrennt voneinander gesammelt und abgeführt wird. Für das Grauwasser ist ebenso bereits in der Planungsphase zu entscheiden, ob das Grauwasser der Küchenspüle (in Hinblick auf Essensreste) in die Grau- oder Schwarzwasserableitung eingebunden werden soll.

Bei der Gebäudetopologie ist aufgrund der Grauwassersammelleitungen bei gleichem Volumen des Gebäudekörpers ein stehender Kubus im Vergleich zu einem liegenden der Vorzug zu geben.

Die Größe des Speichers für das STREBEL behandelten Grauwassers zur Bewässerung ist abhängig einerseits vom Grauwasser-Anfall und andererseits vom (saisonal unterschiedlichen) Wasserbedarf der jeweiligen Bepflanzung am Standort, deren Ausrichtung und der Umgebungstemperatur. Die Auslegung des Speichers ergibt sich somit weniger aus technischer Sicht, da überschüssiges STREBEL behandeltes Grauwasser immer über den Überlauf in den Kanal abgeleitet werden kann, als vielmehr aus der Sicht des Nutzwassermanagements bzw. der Nutzwasserbevorratung für die dadurch versorgten Grünanlagen.

Im Rahmen der Laborversuche in der prototypischen Versuchsanlage konnte ein – für die derzeit am Markt erhältlichen Wärmepumpen – optimaler Temperaturbereich für den Grauwasserzufluss von 7 - 20 °C festgestellt werden. Durch den vorgeschalteten (Gegenstrom)-Plattenwärmetauscher kann dieser Temperaturbereich erreicht werden, sodass es zu einer nahezu vollständigen Übertragung der Wärmeenergie des Grauwassers auf das Frischwasser kommen kann. Wird auf den (Gegenstrom)-Plattenwärmetauscher verzichtet muss die Wärmepumpe für Betriebstemperaturen, auf der Primärseite, über 20 °C ausgelegt sein. In einer durchgeführten Marktuntersuchung hat sich gezeigt, dass Wärmepumpen mit passenden Betriebsbereichen derzeit am Markt nicht vertreten sind. Hier wurde erhöhter Forschungsbedarf identifiziert.

Ein weiteres Ergebnis der Laborversuche ist, dass insbesondere die Rohrquerschnitte Einfluss auf die Effizienz der Anlage haben und im Rahmen der optimalen Auslegung derartiger Anlagen zu berücksichtigen sind.

Auf Seiten der Verwendung des STREBEL behandelten Grauwassers sind neben der Bewässerung von Grünanlagen jedenfalls Warmwasser und WC-Spülung ganzjährige Abnehmer und können versorgt werden.

Im Rahmen des Projekts greenWATERrecycling haben die Projektbeteiligten wichtige Erkenntnisse erlangt um die technische Systemauslegung (z.B. Aufbau und Zusammenspiel der Regler) wesentlich weiterzuentwickeln und zu verbessern.

6.2. Relevante Zielgruppen und deren Möglichkeiten

Die relevanten Zielgruppen für die Inhalte des Projekts greenWATERrecycling sind jedenfalls Bauräger:innen, Gebäudeplaner:innen, Architekt:innen und Haustechnikplaner:innen, aber auch ausführende Unternehmen. Auf Gemeindeebene kommen alle Gemeinden und Stadtverwaltungen sowie Stadtentwickler:innen in Frage, insbesondere in jenen Regionen, die mit Wasserknappheit stark betroffen sind und dahingehend infrastrukturelle Entwicklungen in die Wege leiten müssen. Grundsätzlich zeigt das Projekt greenWATERrecycling Potentiale zur Ressourcennutzung über Grundstücksgrenzen hinaus auf. Eine relevante Zielgruppe sind daher auch alle politischen Entscheidungsträger:innen, um rechtliche und ökonomische Möglichkeiten sowie Anreizmodelle zu schaffen, um in Zukunft im nachbarschaftlichen Gebäudeverband Energie und Ressourcen tauschen zu können. Ebenso gehören Multiplikator:innen im Bildungswesen zur wichtigen Zielgruppe des Projekts, um z.B. im Rahmen von Themen wie Wasserknappheit auch innovative Lösungen der Verwertung von Grauwasser zu verbreiten.

6.3. Markt- und Verbreitungspotenzial

Gemäß der Recherche der Firma GEBE-STREBEL werden jährlich etwa 30.000 Wohnungen in Österreich im Mehrgeschoßwohnbau errichtet. Dabei wird angenommen, dass die Hälfte dieser Wohnungen für eine STREBEL GWVA geeignet ist.

Daraus ergibt sich, dass pro Jahr 15.000 wirtschaftlich nutzbare Wohnungen errichtet werden. Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Belegung von 2,5 Bewohner:innen pro Wohnung, ergibt sich eine Gesamtzahl von 37.500 Bewohner:innen, die von dieser Maßnahme profitieren.

Die Implementierung der STREBEL GWVA in diesen Wohnungen führt zu bedeutenden Einsparungen. Die Stromeinsparung beläuft sich rund 6.800 kWh pro Jahr. Diese Einsparungen ergeben sich aus dem Vergleich mit einem Luft/Wasser Wärmepumpen-System zur Warmwasserbereitung.

Darüber hinaus wird eine Wasserersparnis von 821.250 m³ pro Jahr erzielt. Diese Menge entspricht etwa 115 Fußballfeldern mit einem Wasserstand von 1 Meter. Durch die Nutzung von Grauwasser für bestimmte Zwecke wie Toilettenspülung oder Bewässerung wird der Bedarf an Frischwasser erheblich reduziert.

Diese Zahlen verdeutlichen das enorme Potenzial der Grauwasser-Verwertung im österreichischen Mehrgeschoßwohnbau. Neben den ökologischen Vorteilen durch die Einsparung von Strom und Wasser trägt diese nachhaltige Maßnahme auch zur Ressourcenschonung, zur Energieeffizienz und zur Reduzierung der Umweltauswirkungen des Wohnungsbaus bei.

7 Ausblick und Empfehlungen

Folgende Empfehlungen bieten eine Grundlage für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich Grauwasser-Verwertung.

1. Verhaltensänderung und Akzeptanz: Um die breite Akzeptanz und Implementierung der Grauwasser-Verwertung zu fördern, sind weitere Forschungen zur Verhaltensänderung und zur Nutzer:innen-Akzeptanz erforderlich. Untersuchungen können dazu beitragen, die Wahrnehmung, die Einstellungen und die Akzeptanz der Menschen gegenüber Grauwasser zu verstehen und geeignete Kommunikations- und Bildungsstrategien zu entwickeln, um eine breite Akzeptanz zu erreichen.
2. Systemintegration und -optimierung: Die Integration von Grauwasser-Verwertungssystemen in die bestehende Infrastruktur von Gebäuden und Stadtvierteln erfordert weitere Forschung. Die Optimierung der Systeme hinsichtlich Effizienz, Energieeinsparung und Integration mit anderen erneuerbaren Energiesystemen kann erforscht werden, um ein optimales Gesamtsystem zu schaffen.
3. Ökonomische Bewertung und Geschäftsmodelle: Forschung zur ökonomischen Bewertung von Grauwasser-Verwertungssystemen und die Entwicklung von Geschäftsmodellen sind von Bedeutung. Die Untersuchung der Kosten-Nutzen-Verhältnisse, der Lebenszykluskosten und der finanziellen Anreize für Investitionen in Grauwassersysteme kann dazu beitragen, die wirtschaftliche Attraktivität zu steigern und die Skalierbarkeit der Technologie zu fördern.

Es ist wichtig, die Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen, Regierungsbehörden, Unternehmen und anderen relevanten Akteuren zu fördern, um die Umsetzung dieser Empfehlungen zu ermöglichen und so die Grauwasser-Verwertung als nachhaltige Praxis im Bereich des Ressourcenmanagements voranzutreiben.

Auf Basis der Projektergebnisse konnte eine erste Demonstrationsanlage im Rahmen eines Forschungsprojekts aus dem Programm „Smart Cities Demo – Living Urban Innovation 2019“ des Klima- und Energiefonds entwickelt und zur Umsetzung vorbereitet werden. Mit dieser Anlage können erstmals unter Realbedingungen in einem Wohngebäude Erfahrungen und Messdaten zum gegenständlichen Thema der thermischen und stofflichen Verwertung von warmen Grauwasser gesammelt werden. Durch das Projekt greenWATERrecycling konnte die tatsächliche Umsetzung im Maßstab einer realen Demonstrationsanlage erfolgreich vorbereitet werden, welche die Projektergebnisse optimal verwertet.

8 Verzeichnisse

8.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hydraulikschema STREBEL Grauwasserverwertungsanlage (© GEBE-STREBEL GmbH)..	13
Abbildung 2: Energieflussdiagramm der STREBEL Grauwasserverwertungsanlage. Die Zahlen geben Werte des Energiestroms in kWh/d für 200 Personen an (© GEBE-STREBEL GmbH).	14
Abbildung 3: Intensive Dachbegrünung mit Photovoltaik Anlage, Universität für Bodenkultur Wien (© Hofbauer 2021).	18
Abbildung 4: Bodengebundene Fassadenbegrünung - Rankhilfe mittels Stahlgerüst (Gräf et al., 2021).	19
Abbildung 5: Wandgebundene Fassadenbegrünungen - linkes Bild: teilflächiger Vegetationskörper, rechtes Bild: vollflächiger Vegetationskörper (Gräf et al., 2021)	20
Abbildung 6: Troggebundene Fassadenbegrünung mit einem BeRTA- Pflanztrog: Ein modulares System des Forschungsprojekts 50 grüne Häuser (© Hofbauer 2021)	21
Abbildung 7: Türkenschanzpark in Wien (© Hofbauer 2021)	22
Abbildung 8: Begrünungsinsel, Staudenbeet mit Baumpflanzung in der Neubaugasse, Wien (© Hofbauer 2021)	23
Abbildung 9: Bewässerungsarten – Bild links: Baumpflanzung mit einem sogenannten „Tregator“ zur Bewässerung (© Hofbauer); Bild rechts: Baumneupflanzung mit zusätzlicher Tröpfchenbewässerung (Gräf et al., 2021)	24
Abbildung 10: Abgrenzung Begriff Grauwasser und Schwarzwasser (Icons: Kiranshastry, photo3idea_studio, Creaticca Creative Agency, freepik at flaticon.com).....	25
Abbildung 11: Zeitlicher Ablauf und Erhebungsparameter der Pflanzversuche 2020 und 2021.....	32
Abbildung 12: Anordnung der Testpflanzen im Versuchsaufbau des Pflanzenversuches 2020	33
Abbildung 13: Bewässerungssystem im Gewächshaus mit Tropfspießen zur separaten Bewässerung jedes einzelnen Topfes	34
Abbildung 14: Anordnung der Testpflanzen im Versuchsaufbau des Pflanzenversuches 2021	35
Abbildung 15: Aktueller Zustand des Projektgebiets rund um das Referenzgebäude in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt	38
Abbildung 16: Aktueller Zustand des Referenzgebäudes mit hohem Versiegelungsgrad in der Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt (SGN Wohnen).	39
Abbildung 17: Planungsvorschlag für das Projektgebäude in der Anni Stern Braunberggasse 2 in Wiener Neustadt mit Fassaden-, Dachbegrünung und Neupflanzung von Bäumen	39
Abbildung 18: Visualisierung des Planungsvorschlags mit bodengebundener Fassadenbegrünung, intensiver Dachbegrünung und Bäumen.....	40
Abbildung 19: Interne Lasten und hygienischer Luftwechsel gemäß ÖNORM B 8110-3 2020, gültig für Wohngebäude.....	44
Abbildung 20: Vergleich der Fassadentemperatur des Ersatzmodells und der Außenraumsimulation	45
Abbildung 21: Grauwasserlauf nach Firma Dehoust für die Privathäuser und Wohnheime.....	50

Abbildung 22: Anfallendes Grauwasseraufkommen unterteilt in verschiedene Quellen (Gross et al., 2015).....	51
Abbildung 23: Gegenüberstellung des Grauwasseranfalls der untersuchten Quellen.....	51
Abbildung 24: Prinzipschema der Strebel-Grauwasserverwertungsanlage (© GEBE-STERBEL).....	53
Abbildung 25: Ermittlung des Boden-pH-Wertes, Phosphat- und Nitratgehalts der drei Bewässerungsgruppen im Vergleich mit dem Ausgangssubstrat	66
Abbildung 26: Vitalitätskontrolle April 2021: Frischwassergruppe (Hofbauer 2021)	74
Abbildung 27: Vitalitätskontrolle April 2021: bGW (Hofbauer 2021)	74
Abbildung 28: Vitalitätskontrolle April 2021: bGW-Gruppe (Hofbauer 2021).....	74
Abbildung 29: Envimet Klimasimulationsmodell des Wohnhauses in Wiener Neustadt. Planungsvariante mit Begrünung (links) und Bestandsobjekt (rechts).....	79
Abbildung 30. Analyse der Keyperformance-Scores (blau) und der Keyperformance-Indikatoren (gelb) des aktuellen Zustandes (GREENPASS®2021).....	80
Abbildung 31. Analyse der Keyperformance-Scores (blau) und der Keyperformance-Indikatoren (gelb) des Planungsvorhabens (GREENPASS®2021)	81
Abbildung 32: Simulation der Lufttemperatur des Planungsvorhabens um 15Uhr (GREENPASS® 2021)	82
Abbildung 33: Problematische Aspekte wie Hitzeinsel, Windgeschwindigkeit und Abflussbeiwerte, die trotz planerischer Intervention nicht beseitigt werden konnten (GREENPASS®2021)	82
Abbildung 34: Optimierungsvorschlag von Seiten GREENPASS® zur weiteren Reduktion von Hitzeinseln, Windgeschwindigkeit und Regenwasserabfluss; die grünen Kreise stellen die zusätzliche Pflanzung von 32 Gehölzen dar (GREENPASS®2021).....	83
Abbildung 35: Ergebnisausschnitt der Simulation des Innenraums im Zeitraum 24. bis 30.07.....	84
Abbildung 36: Auswertung der Über- bzw. Unterschreitungshäufigkeiten sowie der mittleren operativen Innenraumtemperatur im untersuchten Zeitraum (24.-30.7.).....	85
Abbildung 37: Auswertung der Über- bzw. Unterschreitungshäufigkeiten sowie der mittleren operativen Innenraumtemperatur im Sommer (Juni bis August).....	86
Abbildung 38: Prototyp der Strebel Grauwasserverwertungsanlage (© GEBE-STREBEL)	87
Abbildung 39: Umwälzpumpe UP2 (© GEBE-STREBEL).....	87
Abbildung 40: Durchflussmesser V5 mit Temperaturfühler T9 (© GEBE-STREBEL)	87
Abbildung 41: Plattenwärmetauscher PWT1 (© GEBE-STREBEL)	88
Abbildung 42: Wärmepumpe HP12S16W-M-BC (© GEBE-STREBEL).....	89
Abbildung 43: UVR610S-MODB und UVR610S-OD Regler (© GEBE-STREBEL)	89
Abbildung 44: Energiezähler CAN-EZ3 (© GEBE-STREBEL)	89
Abbildung 45: Blockdarstellung der Validierungsmessung.....	91

8.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameterliste zur gesamtheitlichen Charakterisierung von Grauwasser (© Pucher 2021)	31
Tabelle 2: Bauteilaufbau Dach (Innen nach Außen).....	42
Tabelle 3: Bauteilaufbau Dach (Innen nach Außen).....	42
Tabelle 4: Bauteilaufbau unterste Geschoßdecke (oben nach unten).....	43
Tabelle 5: Wärmeleitungs-Eigenschaften der verwendeten Fenster.....	43
Tabelle 6: Grauwasseranalytik der Aufbereitungsanlage in Wiener Neustadt, Probenahme vor Ort in Anni-Stern-Braunberggasse 2, Wiener Neustadt.....	56
Tabelle 7: Analytik des behandelten und unbehandelten Grauwassers welches für die Bewässerung der Pflanzen der Pflanzenversuche eingesetzt wurde.	57
Tabelle 8: Richtwerte der elektrischen Leitfähigkeit und des Salzgehalts (ÖWAV, 2016).....	58
Tabelle 9: Chemische Kennwerte für die Eignung des Grauwassers für Bewässerungszwecke(ÖNORM EN 16941-2:2017, 2017; ÖWAV, 2016).....	59
Tabelle 10: Mikrobiologische Kennwerte für die Eignung des gereinigten Grauwassers für Bewässerungszwecke (eigene Bearbeitung 2021; ÖWAV-407 2 2016; ÖNORM EN 16941-2; EU 2020/741) Anmerkung: k.a. - keine Angaben der jeweiligen Parameter in den jeweiligen Dokumenten	60
Tabelle 11: Stomatäre Leitfähigkeit - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Geranium macrorrhizum</i> , <i>Hedera helix</i> , <i>Heuchera sanguinea</i> , <i>Tilia cordata</i> ; Anmerkung: a , b , ab bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.	61
Tabelle 12: Relativer Chlorophyllgehalt - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Geranium macrorrhizum</i> , <i>Hedera helix</i> , <i>Heuchera sanguinea</i> , <i>Tilia cordata</i> ; Anmerkung: a , b , ab bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.	62
Tabelle 13: Blattanzahl - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Geranium macrorrhizum</i> , <i>Hedera helix</i> , <i>Heuchera sanguinea</i> , <i>Tilia cordata</i> ; Anmerkung: a , b , ab bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.	62
Tabelle 14: Zuwachs gemessen am Terminaltrieb – Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende der Straßenbäume <i>Acer pseudoplatanus</i> und <i>Tilia cordata</i> ; Anmerkung: a bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.	63
Tabelle 15: Ermittlung des Zuwachses (Frischgewicht des Sprosses) – Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende der Arten <i>Geranium macrorrhizum</i> , <i>Hedera helix</i> und <i>Heuchera sanguinea</i> ; Anmerkung: a , b bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.....	64
Tabelle 16: Ermittlung des Zuwachses (Frischgewicht der Wurzeln) – Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende der Arten <i>Geranium macrorrhizum</i> , <i>Hedera helix</i> und <i>Heuchera</i>	

<i>sanguinea</i> ; Anmerkung: a, b bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.....	64
Tabelle 17: Bodenanalysen – Mittelwerte und Standardabweichung des pH-Werts, Phosphat und Nitrat der Bewässerungsgruppen und des Ausgangssubstrats. Anmerkung: a, b bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen. Die Einheiten des Phosphats und Nitrats sind pro g Trockenmasse zu rechnen.....	65
Tabelle 18: Eignungstabelle Versuch 2020. Je Art wurden die einzelnen Versuchsparameter und deren Ergebnisse aufgelistet und jeweils für bGW und uGW mit Trinkwasser verglichen.	68
Tabelle 19: Stomatäre Leitfähigkeit - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von <i>Bergenia cordifolia</i> , <i>Parthenocissus tricuspidata</i> und <i>Wisteria sinensis</i> ; Anmerkung: a, b bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Pflanzenart verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.	69
Tabelle 20: Relativer Chlorophyllgehalt - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von <i>Bergenia cordifolia</i> , <i>Parthenocissus tricuspidata</i> und <i>Wisteria sinensis</i> ; Anmerkung: a, b bezieht sich jeweils nur auf eine Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.	70
Tabelle 21: Blattanzahl - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von <i>Bergenia cordifolia</i> ; <i>Parthenocissus tricuspidata</i> und <i>Wisteria sinensis</i> ; Anmerkung: a, b, ab bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.....	71
Tabelle 22: Zuwachs Terminaltrieb - Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende von <i>Parthenocissus tricuspidata</i> und <i>Wisteria sinensis</i> ; Anmerkung: a, b bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.....	71
Tabelle 23: Ermittlung des Zuwachses (Frischgewicht von Spross und Wurzel) – Mittelwerte und Standardabweichung zu Versuchsende der Art <i>Bergenia cordifolia</i> . Anmerkung: a bezieht sich jeweils nur auf die Spalte, es wird nur innerhalb der Art verglichen. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten unterschiedliche Signifikanzen.....	72
Tabelle 24: Eignungstabelle Versuch 2021: Je Art wurden die einzelnen Versuchsparameter und deren Ergebnisse aufgelistet und jeweils für bGW-, uGW- und RW- Bewässerung bewertet. Endergebnis ist die Beurteilung der Eignung.	73
Tabelle 25: Ergebnisse der Vitalitätskontrolle der Versuchspflanzen <i>Acer pseudoplatanus</i> und <i>Tilia cordata</i> welche nach Ende des Glashausversuchs 2021 nach Wr. Neustadt zur Firma Strebel gebracht und dort weiter mit GW bewässert wurden. Gemessen wurde der Zuwachs der Terminaltriebe und der relative Chlorophyllgehalt der Pflanzen, dargestellt als Mittelwerte mit Standardabweichung und statistischer Signifikanz. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede (a, b) innerhalb der Art (es wurden keine Vergleiche zwischen den Arten durchgeführt).	75
Tabelle 26: Ergebnisse des Versinterungsversuch der Einzeltropfer (4 L/h und 8 L/h) aller Bewässerungsgruppen. Es wurde die Durchflussmenge in mL in einem Zeitraum von 5 Minuten	

gemessen. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen festgestellt werden. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede (**a**) innerhalb der Art..... 75
Tabelle 27: Durchschnittlicher Wasserbedarf unterschiedlicher grüner Infrastrukturen (Allabashi et al., 2022)..... 77

8.3. Literaturverzeichnis

- Al-Jayyousi, O.R., 2003. Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination* 156, 181–192. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00340-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00340-0)
- Allabashi, R., Gräf, M., Langergraber, G., Pitha, U., Pucher, B., Irene, Z., 2022. Grauwasser als Quelle für eine nachhaltige Bewässerung. *Neue Landschaft Vol.3*, 29–35.
- Batstone, D.J., Hülsen, T., Mehta, C.M., Keller, J., 2015. Platforms for energy and nutrient recovery from domestic wastewater: A review. *Chemosphere* 140, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.021>
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Piseiro, J., Rizzo, A., Masi, F., 2020. A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of The Total Environment* 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- Campisano, A., Modica, C., 2010. Experimental investigation on water saving by the reuse of washbasin grey water for toilet flushing. *Urban Water Journal* 7, 17–24. <https://doi.org/10.1080/15730621003596739>
- DIN 1988-2:1988-12, 1988. Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen (TRWI); Planung und Ausführung; Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW.
- DIN 1988-4:1988-12, 1988. Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen (TRWI); Planung und Ausführung; Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW.
- DIN 4753-1:2019-05, 2019. Trinkwassererwärmer, Trinkwassererwärmungsanlagen und Speicher-Trinkwassererwärmer - Teil 1: Behälter mit einem Volumen über 2 000 l.
- DWA-M 277:2017-10 (Ed.), 2017. Hinweise zur Auslegung von Anlagen zur Behandlung und Nutzung von Grauwasser und Grauwasserteilströmen, DWA-Regelwerk. Merkblatt. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.
- Eppel, J., 2015. Vertikalbegrünungssysteme im Begrünungsvergleich. *Bauwerksbegrünung , Fassadenbegrünung, Pflanzenverwendung*.
- Eppel, J., Kendzia, N., Öchsner, J., Marsch, D., Thon, A., 2012. Standortangepasste Bewässerung öffentlicher Grünflächen als Beitrag zur Klimamäßigung im urbanen Lebensraum. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Veitshöchheim.
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., Ledin, A., 2002. Characteristics of grey wastewater. *Urban Water* 4, 85–104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Fricke, E., 2018. Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung- Stand und Trends., in: Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C., Lange, S., Röttcher, K., Bittner, F. (Eds.), *Bewässerung in Der Landwirtschaft. Tagungsband Zu Fachtagungen Am 11./12.09.2017 in Suderburg*.
- Friedler, E., Galil, N.I., 2003. On-site greywater treatment and reuse in multi-storey buildings. Sustainable solution for water saving., in: *Efficient 2003—2nd International Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply. Tenerife, Canary Islands, Spain*.

- Fröhlich, C., 2006. Zur Rolle der Ressource Wasser in Konflikten. Aus Politik und Zeitgeschichte, APuZ: Aus Politik und Zeitgeschichte 25/2006 "Wasser".
- GALK, 2002. Empfehlungen zur Beurteilung von Bäumen in der Stadt. GALK - Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz. Arbeitskreis Stadtbäume.
- Gräf, M., Immitzer, M., Hietz, P., Stangl, R., 2021. Water-Stressed Plants Do Not Cool: Leaf Surface Temperature of Living Wall Plants under Drought Stress. Sustainability 13, 3910. <https://doi.org/10.3390/su13073910>
- GREEN4CITIES, MA 22, GRÜNSTATTGRAU, 2019. Leitfaden Fassadenbegrünung. Wien.
- Gross, A., Maimon, A., Alfiya, Y., Friedler, E., 2015. Greywater Reuse, 0 ed. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18217>
- Hawliczek, I.K., Grassinger, I.M., Grün, N., Weisgram, I.R., 2012. Wiener Straßengrün-Leitbild. Richtlinien der Wiener Stadtgärten für die Ausgestaltung von Grünanlagen. MA 42 Wiener Stadtgärten.
- Helmecke, M., 2018. Landwirtschaftliche Nutzung von behandeltem Abwasser aus Umwelt- und Gesundheitssicht, in: Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C., Lange, S., Röttcher, K., Bittner, F. (Eds.), Bewässerung in Der Landwirtschaft. Tagungsband Zur Fachtagung Am 11./12.09.2017 in Suderburg, Thünen Working Paper 85. Braunschweig.
- Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau IBLB, BOKU Wien, GRÜNSTATTGRAU Forschungs- und Innovations- GmbH, 2019. Ergebnisse aus dem Diskussionsforum „Wirkungen und Kennwerte von Grünen Infrastrukturen Fokus Mikroklima, Energie- und Wasserhaushalt“ (No. 41/2019), Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien.
- Kadereit, J.W., Körner, C., Kost, B., Sonnewald, U., 2014. Strasburger - Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften, 37., vollst. überarb. u. akt. Aufl. 2014. ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Karall, P.H., Weikert, A., 2010. Schreiben - Materialbearbeitung [WWW Document]. URL <https://www.univie.ac.at/ksa/elearning/cp/schreiben/schreiben-23.html>. (accessed 2.18.20).
- Köhler, M. (Ed.), 2012. Handbuch Bauwerksbegrünung: Planung - Konstruktion - Ausführung ; [Dach, Fassade, Innenraum] ; mit 49 Tabellen. Müller, Köln.
- Kong, L., Lau, K., YUAN, C., Chen, Y., Xu, Y., Ren, C., Ng, E., 2017. Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. Sustainable Cities and Society 31. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.018>
- Laasch, T., Laasch, E., 2005. Haustechnische Räume, in: Haustechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, pp. 1–76. https://doi.org/10.1007/978-3-663-10288-5_1
- Masi, F., Langergraber, G., santoni, marcello, Istenič, D., Atanasova, N., Buttiglieri, G., 2020. Possibilities of nature-based and hybrid decentralized solutions for reclaimed water reuse - in Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection Vol 5, in: Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection. pp. 145–187. <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2020.07.004>
- Matzinger, A., Riechel, M., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M., Offermann, M., Strehl, C., Nickel, D., Sieker, H., Pallasch, M., Köhler, M., Kaiser, D., Möller, C., Büter, B., Leßmann, D., Tils von, R., Säumel, I., Pille, L., Winkler, A., Bartel, H., Heise, S., Heinzelmann, B., Joswig, K., Rehfeld-Klein, M., Reichmann, B., 2017. Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung - Ergebnisse des Projektes KURAS. Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH, Berlin.

- Medl, A., Stangl, R., Florineth, F., 2017. Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment* 125, 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.054>
- Oliveira, S., Andrade, H., Vaz, T., 2011. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment* 46, 2186–2194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.034>
- ÖNORM B 5019: 2020 03 01, 2020. Hygienerrelevante Planung, Ausführung, Betrieb, Überwachung und Sanierung von zentralen Trinkwasser-Erwärmungsanlagen.
- ÖNORM B 8110-3: 2020 06 01, 2020. Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Ermittlung der operativen Temperatur im Sommerfall (Parameter zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung).
- ÖNORM B 8110-6-1:2019 01 15, 2019. Wärmeschutz im Hochbau - Teil 6-1: Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf.
- ÖNORM EN 13635, 2001. Bewässerungsverfahren - Lokale Bewässerungssysteme - Terminologie und Angaben des Herstellers.
- ÖNORM EN 16941-2:2017, 2017. Vor-Ort-Anlagen für Nicht-Trinkwasser-Teil 2: Anlagen für die Verwendung von behandeltem Grauwasser.
- ÖNORM H 7500-1:2015 02 15, 2015. Heizungssysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast für Gebäude mit einem mittleren U -Wert $\geq 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ - Nationale Ergänzung zu ÖNORM EN 12831.
- ÖNORM L1112:2010 09 01, 2010. Anforderungen an die Bewässerung von Grünflächen.
- ÖNORM L1120:2016 07 01, 2016. Gartengestaltung und Landschaftsbau. Grünflächenpflege, Grünflächenerhaltung.
- ÖNORM L1136:2021 04 01, 2021. Vertikalbegrünung im Außenraum. Anforderungen an Planung, Ausführung, Pflege und Kontrolle.
- Otoo, M., Drechsel, P. (Eds.), 2018. *Resource Recovery from Waste: Business Models for Energy, Nutrient and Water Reuse in Low- and Middle-income Countries*, 1st ed. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315780863>
- ÖWAV, 2016. Empfehlungen für die Bewässerung (No. 407 2), Regelblätter des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.
- ÖWAV, 2001. Empfehlungen für Bewässerungswasser, Arbeitsbehelf 11. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.
- Pfleger, I., 2009. Bewässerungswasserqualität – Hygienische und chemische Belange, in: Dirksmeyer, W., Sourell, H. (Eds.), *Landbauforschung Sonderheft 328: Wasser Im Gartenbau. Tagungsband Zum Statusseminar Am 9. Und 10. Februar 2009*. Johann Heinrich von Thünen-Institut Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (vTI), Braunschweig.
- Pfoser, N., 2016. *Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung*. Institut für Entwerfen und Freiraumplanung. (Dissertation). Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Qadir, M., Drechsel, P., Jiménez Cisneros, B., Kim, Y., Pramanik, A., Mehta, P., Olaniyan, O., 2020. Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source. *Nat Resour Forum* 44, 40–51. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12187>
- QZV Chemie GW, 2019. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über den guten chemischen Zustand des Grundwassers (Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser – QZV Chemie GW), BGBl. II Nr. 98/2010, idF II 248/2019.

- Rao, K., Otoo, M., Drechsel, P., Hanjra, M.A., 2017. Resource recovery and reuse as an incentive for a more viable sanitation service chain. *Water Alternatives* 10, 493–512.
- Sanusi, R., Johnstone, D., May, P., Livesley, S.J., 2017. Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning* 157, 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.010>
- Schmauck, S., 2019. Dach- und Fassadenbegrünung - neue Lebensräume im Siedlungsbereich. Fakten, Argumente und Empfehlungen. (No. 538), BfN-Skripten 538. Bundesamt für Naturschutz, Leipzig.
- Sesink, W., 2003. Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten: mit Internet - Textverarbeitung - Präsentation, 6., völlig überarb. und aktualisierte Aufl. ed. Oldenbourg, München Wien.
- Simlat, W., 2017. Effiziente Wassernutzung im urbanen Raum (Masterarbeit). Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus-Senftenberg.
- Stangl, R., Medl, A., Scharf, B., Pitha, U., 2019. Wirkungen der grünen Stadt. Studie zur Abbildung des aktuellen Wissensstands im Bereich städtischer Begrünungsmaßnahmen. (No. 12/2019), Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien.
- Statistik Austria, 2021. Wohnen - Zahlen, Daten und Indikatoren der Wohnstatistik. Wien.
- United Nations, 2022. The Sustainable Development Goals Report 2022. New York, USA.
- Upmanis, H., Eliasson, I., Lindqvist, S., 1998. The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology* 18, 681–700. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199805\)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199805)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L)
- Verordnung (EU) 2020/852, 2020. Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088.
- Wagner, I., Krauze, K., Zalewski, M., 2013. Blue aspects of green infrastructure. *Sustainable Development Application* 4, 144–155.
- Walker, R., Schenk, D., Jauch, M., Krummradt, I., Schmitz, H.-J., Lohr, D., Meinken, E., 2016. Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser. Abschlussbericht über das unter dem AZ 28577-23 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsprojekt.
- WHO-Regionalbüro für Europa, 2019. Gesundheitshinweise zur Prävention hitzebedingter Gesundheitsschäden. Neue und aktualisierte Hinweise für unterschiedliche Zielgruppen. Kopenhagen.
- Winkler, M., Deffner, J., Frick-Trzebizky, F., Schramm, E., 2019. Städtisches Grün unter Druck – Potenziale alternativer Wasserquellen für die Anpassung der grünen Infrastruktur an den Klimawandel. *Stadt + Grün* 68(5), 33–38.
- Zimmermann, A. (Ed.), 2015. *Landschaft Konstruieren: Materialien, Techniken, Bauelemente*, 3. Auflage. ed. Birkhäuser, Basel.

8.4. Abkürzungsverzeichnis

bGW	behandeltes Grauwasser
EPBD	Europäische Gebäuderichtlinie
FW	Frischwasser
GI	Grüne Infrastrukturen
GWVA	Strebel Grauwasser-Verwertungsverfahren
LWS	Living Walls, Living Walls
ÖWAV	Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
RW	Regenwasser
SDG	Sustainable Development Goals
STREBEL bGW	STREBEL behandeltes Grauwasser
STREBEL GWVA	STREBEL Grauwasserverwertungsanlage
uGW	unbehandeltes Grauwasser

Abkürzungen Pflanzen

<i>A. pseudoplatanus</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i> (Bergahorn)
<i>B. cordifolia</i>	<i>Bergenia cordifolia</i> (Herzblättrige Bergenie)
<i>G.macrorrhizum/ G.m.</i>	<i>Geranium macrorrhizum</i> (Balkan-Storchschnabel)
<i>H.helix/ H.h.</i>	<i>Hedera helix</i> (Gemeiner Efeu)
<i>H. sanguinea/ H.s.</i>	<i>Heuchera sanguinea</i> (Pupurglöckchen)
<i>P. tricuspidata</i>	<i>Parthenocissus tricuspidata</i> (Dreilappige Jungfernrebe)
<i>T. cordata / T.c.</i>	<i>Tilia cordata</i> (Winterlinde)
<i>W. sinensis</i>	<i>Wisteria sinensis</i> (Chinesischer Blauregen)

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 800 21 53 59

servicebuero@bmimi.gv.at

bmimi.gv.at