



# Modellierung des Wasserverbrauchs von grünen Wänden

## Projekt MEADOW

 Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

 Bundesministerium  
Bildung, Wissenschaft  
und Forschung



LAND  
OBERÖSTERREICH



umweltbundesamt<sup>®</sup>





Daniela Fuchs-Hanusch (Projektleitung) und Michael Pointl

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz,  
Stremayrgasse 10/I, Graz.



Bernhard Pucher

Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Universität für  
Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, Wien.

Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Pointl, M.; Pucher, B. und Fuchs-Hanusch D. (2022): Modellierung des Wasserverbrauchs von grünen  
Wänden - Projekt MEADOW. Endbericht von StartClim2021.I in StartClim2021: Handeln und  
Aktivieren, Auftraggeber: BMK, BMWFW, Klima- und Energiefonds, Land Oberösterreich.

Wien, im Dezember 2022

StartClim2021.I

Teilprojekt von StartClim2021

Projektleitung von StartClim:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gregor-Mendel-Straße 33, 1190 Wien

[www.startclim.at](http://www.startclim.at)

StartClim2021 wurde aus Mitteln des BMK, BMWFW, Klima- und Energiefonds  
und dem Land Oberösterreich gefördert.

**StartClim2021.I**

## Inhaltsverzeichnis

|         |  |    |
|---------|--|----|
| I-1     | Kurzfassung.....   | 6  |
| I-2     | Abstract.....  | 7  |
| I-3     | Grüne Wände als multifunktionale grüne Infrastrukturen .....   | 8  |
| I-4     | Datengrundlage - Experimentelle grüne Wand .....               | 11 |
| I-4.1   | Versuchsanlage.....  | 11 |
| I-4.2   | Betriebs-, Pflanzen und Sensordaten.....                       | 12 |
| I-4.2.1 | Betriebsdaten.....   | 12 |
| I-4.2.2 | Pflanzenwachstum.....  | 13 |
| I-4.2.3 | Messsysteme und Sensorik .....                                 | 14 |
| I-5     | Methodik der Wasserverbrauchsmodellierung.....                 | 16 |
| I-5.1   | Systemgrenzen und Zeitschritt für die Modellierung .....       | 16 |
| I-5.2   | Zielgröße Wasserverbrauch pro Tag.....                         | 18 |
| I-5.3   | Regressoren und Stichprobenumfang.....                         | 20 |
| I-5.4   | Gütemaße für die Modellevaluierung.....                        | 22 |
| I-6     | Ergebnisse und Diskussion.....                                 | 23 |
| I-6.1   | Wasserverbrauchsprognose mit unterschiedlichen Modellen .....  | 23 |
| I-6.2   | Bedeutung einzelner Variablen für die Verbrauchsprognose ..... | 26 |
| I-6.3   | Szenarien für den Einsatz des Prognosemodells .....            | 27 |
| I-7     | Schlussfolgerungen und Ausblick.....                           | 28 |
| I-8     | Literaturverzeichnis.....                                      | 29 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>Abb. I-1:</b> Grüne Wand in mit ausgeprägten Schadstellen im Zentrum, Valencia; Foto: M. Pointl (2022) .....  | 8  |
| <b>Abb. I-2:</b> Teilbegrünte Wand mit Kletterpflanzen und Sträuchern bzw. Bäumen in Trögen, Graz; Foto: M. Pointl (2022).....   | 9  |
| <b>Abb. I-3:</b> Grüne Wand, Versuchsaufbau BOKU Wien; Foto: S. Handl (2020), mod.....   | 11 |
| <b>Abb. I-4:</b> Pflanzengemeinschaften der grünen Wand mit den vertikalen Elementen E 1 bis E 4; Foto: I. Zluwa (2020).....   | 13 |
| <b>Abb. I-5:</b> Interpoliertes Pflanzenvolumen für die Elemente E 1 bis E 3. ....   | 14 |
| <b>Abb. I-6:</b> Sensorpositionen in und um die grüne Wand; Foto und Darstellung: B. Pucher (2020).....  | 15 |
| <b>Abb. I-7:</b> Methodik für die Wasserverbrauchsprognose mit maschinellem Lernen. ....   | 16 |
| <b>Abb. I-8:</b> Systemgrenzen, Zu- (Q <sub>in</sub> ) und Abflussmessungen (Q <sub>out</sub> ) für die Elemente E 1 bis E 3; Foto: I. Zluwa (2020).....                       | 17 |
| <b>Abb. I-9:</b> Wassergehalt in Element E 2 (a) und Lufttemperatur am Einbauort der grünen Wand (b). ....   | 17 |
| <b>Abb. I-10:</b> Täglicher Wasserverbrauch der Teilelemente (a), mittlere Tagestemperatur (b) und tägliche Niederschlagssumme (c).....  | 19 |
| <b>Abb. I-11:</b> Visuelle Darstellung der Korrelationsmatrix der Zielgröße Wasserverbrauch (WV) und den erklärenden Variablen bzw. Regressoren für die Modellentwicklung..... | 21 |
| <b>Abb. I-12:</b> Abweichungen zwischen Modell und Messung bei Modellanpassung (a) und Prognose (b) für RF.....  | 23 |
| <b>Abb. I-13:</b> Abweichungen zwischen Modell und Messung bei Modellanpassung (a) und Prognose (b) für MLP. .   | 24 |
| <b>Abb. I-14:</b> Abweichungen zwischen Modell und Messung bei Modellanpassung (a) und Prognose (b) für SVR. .   | 24 |
| <b>Abb. I-15:</b> Beitrag der einzelnen Variablen zur Leistungsfähigkeit des eingesetzten Random Forest Modells. ....  | 26 |

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>Tab. I-1:</b> Bewässerungsschema der ersten drei Teilelemente E 1 bis E 3 für 2021. ....                  | 12 |
| <b>Tab. I-2:</b> Variablen bzw. Regressoren aus Daten der grünen Wand. ....                                  | 20 |
| <b>Tab. I-3:</b> Variablen bzw. Regressoren aus den meteorologischen Daten. ....                             | 20 |
| <b>Tab. I-4:</b> Anpassungsgüte (Trainingsdaten) und Prognosequalität (Testdaten) der drei Algorithmen. .... | 25 |

## I-1 Kurzfassung

Grüne Wände stellen vielfältig einsetzbare natur-basierte Systeme dar, um einem breiten Spektrum an Herausforderungen der Siedlungswasserwirtschaft zu begegnen und gleichzeitig Folgen des Klimawandels abzumildern. Beispielsweise können grüne Wände für eine dezentrale Grauwasserreinigung eingesetzt werden und im Zuge dessen nicht nur Gebäude und Plätze kühlen, sondern auch als ökologische Inseln im urbanen Umfeld fungieren. Aufgrund ihrer vertikalen Gestaltung ist es möglich diese multifunktionalen grünen Infrastrukturen sowohl in bestehenden Siedlungsstrukturen, als auch bei neuen Projekten einzusetzen.

Um ihr volles Potenzial entfalten zu können, müssen Gestaltung, Größe und Bepflanzung grüner Wände, in Abhängigkeit von der gewünschten Funktion(en), an die Bedingungen am Einbauort angepasst werden. Eine wesentliche, wenn nicht die zentrale Randbedingung dabei ist eine ausreichende Bewässerung bzw. Wasserversorgung. Im Gegensatz zu anderen grünen Infrastrukturen, wie zum Beispiel Gründächern, wurden die Anforderungen an die Bewässerung von grünen Wänden – mit wenigen Ausnahmen – bisher nicht im Detail untersucht, geschweige denn modelliert.

Ziel des Projekts „MEADOW – Modellierung des Wasserbedarfs von grünen Wänden“, ist es, diese Lücke durch den Einsatz von datenbasierten Modellen, das heißt im Wesentlichen durch maschinelles Lernen, zu schließen.

Hierfür wurde auf Basis von Messdaten einer experimentellen grünen Wand, die seit 2020 an der Universität von Bodenkultur Wien (BOKU) in Kooperation mit der Technischen Universität Graz (TU Graz), ein Modell zur Prognose des Wasserbedarfs von grünen Wänden entwickelt.

Das Modell eignet sich zum einen, um in Abhängigkeit von Wetterprognosen und Klimaprojektionen den Wasserbedarf von grünen Wänden abzuschätzen. Dies erlaubt es Planer:innen und Projektentwickler:innen, den Wasserbedarf von grünen Wänden abzuschätzen und so Anlagen zur Speicherung von Grau- und Regenwasser zu dimensionieren. Zum anderen konnte mit Hilfe des Modells bestimmt werden, welche Messsysteme sich für eine effektive Instrumentierung und Bewässerungssteuerung von grünen Wänden eignen.

Das entwickelte Wasserverbrauchsmodell stellt einen ersten Schritt zur systematischen und nachhaltigen Verwendung von grünen Wänden, angepasst auf die Umweltbedingungen am Einbauort dar. Die dem Modell zugrunde liegende Methodik und die Erkenntnisse aus MEADOW können von Entscheidungsträger:innen eingesetzt werden, um den Einsatz von grünen Wänden aller Art unter Einbindung von Stakeholder:innen zu forcieren. Die erarbeiteten Modelle eignen sich zur Erstellung einer Diskussionsgrundlage auf Basis einer Quantifizierung der Leistungsfähigkeit und Vorteile grüner Wände.

Dadurch soll es möglich werden, grüne Wände systematisch und als effektives Werkzeug zur Bekämpfung der negativen Folgen des Klimawandels (u.a. zur Reduktion urbaner Hitzeinseln) einzusetzen und als wesentliches Element von Konzepten der integrierten Siedlungswasserwirtschaft, beispielsweise als Maßnahmen zur dezentralen Grau- und Regenwasserbewirtschaftung, zu etablieren.

## I-2 Abstract

Vertical greening systems (VGS) respectively green walls, represent versatile nature-based solutions (NBS) to address a wide range of challenges in urban water management while mitigating effects of climate change. For example, VGS can be used for decentralized greywater treatment and at the same time, provide a sufficient cooling function for the outdoor environment. Due to their vertical design, it is possible to use these multifunctional NBS in existing settlement structures as well as in new building developments.

In order to develop their full potential, the design, size and planting of VGS, depending on the desired function(s), must be adapted to the conditions at the installation site. A key resource for the full functionality is sufficient irrigation water supply. Unlike other NBS, such as green roofs, the irrigation requirements of VGS - with few exceptions - have not been studied in detail, let alone modeled.

The goal of the project "MEADOW - Modeling Water Demand of Green Walls", is to close this gap by using machine learning principles based on available data

For this purpose, a model for predicting the water demand of VGS was developed on the basis of measurement data from an experimental system that has been in operation since 2020 at the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU) in cooperation with the Graz University of Technology (TU Graz).

The model is suitable, on the one hand, to estimate the water demand of VGS depending on weather forecasts and climate projections. This allows planners and project developers to estimate the water demand of VGS and thus to dimension systems for the storage of greywater and rainwater. In addition, the model could be used to determine which metering systems are suitable for effective instrumentation and irrigation control of green walls.

The water use model developed represents a first step toward the systematic and sustainable use of VGS, adapted to the environmental conditions at the installation site. The methodology underlying the model and the findings from MEADOW can be used by decision-makers to promote the use of green walls of all kinds with the involvement of stakeholders. The models developed are suitable for creating a basis for discussion based on a quantification of the performance and benefits of VGS.

This should make it possible to use VGS systematically as an effective tool to combat the negative consequences of climate change (e.g. to reduce urban heat islands) and to establish them as an essential element of concepts for integrated urban water management, for example as measures for greywater and stormwater management.

### I-3 Grüne Wände als multifunktionale grüne Infrastrukturen

Bei grünen Wänden handelt es sich um vielseitig einsetzbare, häufig multifunktionale grüne Infrastrukturen, die einen wesentlichen Beitrag zur Abschwächung der negativen Folgen des Klimawandels leisten, sowie deren Effekte auf den (urbanen) Wasserkreislauf, abmildern können. Sie werden eingesetzt, um Grauwasser zu reinigen (Dal Ferro et al., 2021; Prodanovic et al., 2019, 2020), die ökologische Durchgängigkeit von Siedlungsgebieten zu verbessern (Başdoğan & Çiğ, 2016; Mayrand et al., 2018; Meral et al., 2018), oder fungieren als Evaporationskühler für Gebäude (Bevacqua et al., 2018; Šuklje et al., 2016). Nicht zuletzt angesichts der zunehmenden Hitzewellen und der daraus resultierenden hohen physiologischen Belastung für weite Teile der Bevölkerung (Vicedo-Cabrera et al., 2021), ist vor allem die letztgenannte Funktion von zentraler Bedeutung. Wesentliche Randbedingung für alle Funktionen von grünen Wänden ist deren ausreichende Bewässerung (Daniel et al., 2018; Koyama et al., 2013; Medl et al., 2018; Pérez-Urrestarazu et al., 2014). Damit bestimmt die Verfügbarkeit von Wasser, die Standortauswahl sowie die einsetzbare Pflanzengemeinschaft die Dimensionierung von Behältern und Zisternen bzw. die Entnahme von Wasser aus dem Trinkwasserversorgungssystem (Han & Shim, 2020; Medl et al., 2018). Die Effekte von unzureichender Bewässerung werden in Abb. I-1: augenscheinlich. Dabei handelt es sich um eine grüne Wand in Valencia, fotografiert im Juli 2022, deren Zustand einen ungeeigneten Entwurf und/oder unzureichender Bewässerung nahelegen.



**Abb. I-1:** Grüne Wand in mit ausgeprägten Schadstellen im Zentrum, Valencia; Foto: M. Pointl (2022)

Trotz ihrer vielfältigen Einsetzbarkeit und adaptiven Gestaltung, wurden grüne Wände und deren Wasserbedarf bzw. -verbrauch, im Gegensatz zu dem anderer naturbasierter Lösungen, wie z. B. von



Gründächern (Gioannini et al., 2018; Raimondi et al., 2021), bisher verhältnismäßig wenig analysiert und modelliert. Dabei sind Wasserverbrauchsmodelle gerade für grüne Infrastrukturen bei deren hochskaliertem Einsatz von zentraler Bedeutung, wenn eine effiziente und gleichzeitig effektive Bewässerungsplanung und damit eine manuelle Bewässerungssteuerung nicht mehr möglich oder sinnvoll erscheint.



**Abb. I-2:** Teilbegrünte Wand mit Kletterpflanzen und Sträuchern bzw. Bäumen in Trögen, Graz; Foto: M. Pointl (2022)

Während sich eine hohe Zahl wissenschaftlicher Arbeiten mit speziellen Aspekten der Anwendung und Leistungsfähigkeit von grünen Wänden befassen, wie der Kühlwirkung (Bevacqua et al., 2018; Davis & Hirmer, 2015; Koyama et al., 2013; Šuklje et al., 2016), Reinigungsleistung (Pucher et al., 2020), Wahrnehmung (Liberalesso et al., 2020) oder deren konzeptionelle Integration in urbane Wasserkreisläufe (Pearlmutter et al., 2021; Prenner et al., 2021), findet sich in der gängigen Literatur keine Analyse des Wasserverbrauchs in Abhängigkeit von Bepflanzung und Umwelteinflüssen dieser naturnahen siedlungswasserwirtschaftlichen Maßnahmen. Die Gründe hierfür liegen unter anderem an der vertikalen Ausrichtung der Wände, den unzähligen Bauformen und Bepflanzungsarten (vgl. Abb. I-1 und Abb. I-2), sowie einem Mangel an geeigneten Parametern und Messdaten, um existierende Modelle, z.B. für die Evapotranspiration sinnvoll anwenden zu können (Davis & Hirmer, 2015). Dabei ist eine ausreichende Bewässerung wichtig, da Pflanzen die nicht ausreichend bewässert werden zwar noch gut aussehen können, jedoch nicht zur Kühlung beitragen (Gräf et al., 2021).

Um einen ersten Schritt zum Schließen dieser Lücke zu setzen, setzt sich das Projekt MEADOW mit der datenbasierten Modellierung des Wasserverbrauchs von grünen Wänden auseinander. Das Akronym

leitet sich von dem englischen Projekttitle "Modeling Water Demand of Green Walls" ab und soll die Idee von grünen Wänden als multifunktionale, vertikale Grünflächen im bebauten Gebiet widerspiegeln. Aufbauend auf Mess- und Betriebsdaten einer experimentellen grünen Wand wurde der Einsatz von Maschinenlernmodellen für die Identifikation der wesentlichen Parameter, d.h. der zentralen Treiber, für den Wasserverbrauch grüner Wände identifiziert und in datenbasierte Prognosemodelle integriert. Neben einer detaillierten Analyse von Eingangsdaten und Modellergebnissen, wurden erste Handlungsempfehlungen für die Modellierung des Wasserverbrauchs von grünen Wänden erarbeitet und nächste Schritte für eine weitere Untersuchung dieser komplexen, aber hochrelevanten Thematik entwickelt.

## I-4 Datengrundlage - Experimentelle grüne Wand

Grundlage für sämtliche Analysen im Kontext des Projekts MEADOW stellen Daten einer grünen Wand, konkret einer seit März 2020 an der Universität für Bodenkultur Wien betriebenen Versuchsanlage (Pucher et al., 2020 und Pucher et al., 2022) dar. Eine dementsprechend hohe Bedeutung ist den Ausführungen in diesem Abschnitt beigemessen worden - nicht zuletzt aus Gründen der wissenschaftlichen Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des Projekts.

### I-4.1 Versuchsanlage

Der Versuchsaufbau im Zentrum dieser Arbeit ist eine grüne Wand mit einer Breite von 6 m und einer Höhe von 4 m, unterteilt in vier unabhängige, vertikale Elemente. Neben den eingesetzten Pflanzengemeinschaften unterscheiden sich die Elemente auch hinsichtlich Bewässerungskonzept und des eingesetzten Wassers (Leitungs- oder Grauwasser). Die Elemente sind aus Edelstahl gefertigt und umfassen jeweils 10 Kisten bzw. Tröge mit einem Substratvolumen von rund 0.47 m<sup>3</sup>. Eine detaillierte Beschreibung ist in Pucher et al., 2020 und Pucher et al., 2022 zu finden.



**Abb. I-3:** Grüne Wand, Versuchsaufbau BOKU Wien; Foto: S. Handl (2020), mod.

Die Elemente sind auf vertikalen Schienen direkt an der darunter liegenden Wand montiert, um durch den Spalt zwischen Wand und grüner Wand einen Luftzug und damit optimale Kühlwirkung zu erreichen. Das Layout und die Art der Montage der einzelnen Elemente ermöglichen im Gegensatz zu beispielsweise bodengebundenen oder in größeren Trögen installierten grünen Wänden, wie Efeu oder Veitschi (siehe dazu auch Abb. I-2:), einfache Skalierbarkeit und einen flexiblen Einsatz, auch in Bereichen, wo aus welchen Gründen auch immer nicht genügend Grundfläche für andere Typen von grünen Wänden vorhanden wären.

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden die Betriebsführung und messtechnische Ausstattung der grünen Wand dargelegt.

## I-4.2 Betriebs-, Pflanzen und Sensordaten

### I-4.2.1 Betriebsdaten

Die grüne Wand wird seit 2020 von Anfang März bis Ende September am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz der Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien betrieben. In beiden Jahren wurden Messdaten in der grünen Wand, sowie in deren Umfeld erhoben. Neben den Grenzen der validen Wachstumsperioden finden sich unter den Betriebsdaten in erster Linie Messdaten und die Dokumentation der Bewässerung der vier vertikalen Elemente der grünen Wand. Das Bewässerungsintervall, -medium und die Art der Messung bzw. Dokumentation finden sich in Tab. I-1: Dabei handelt es sich jedoch lediglich um die Daten der Betriebs- und Vegetationsperiode 2021. Hervorzuheben ist, dass das vierte Element mit Grauwasser beschickt wird, während die übrigen Elemente mit Frisch- bzw. Leitungswasser bewässert werden. Die Düngung letzterer Elemente erfolgt einmalig am Beginn der Vegetationsperiode.

**Tab. I-1:** Bewässerungsschema der ersten drei Teilelemente E 1 bis E 3 für 2021.

| Element | Wochen  | Intervall  | Volumen (L/d) |
|---------|---------|------------|---------------|
| E 1     | 1 - 9   | 1x / Woche | 25            |
|         | 10 - 12 | 2x / Woche | 30            |
|         | 13 - 19 | 3x / Woche | 30            |
| E 2     | 1 - 19  | 7x / Woche | 25            |
| E 3     | 1 - 19  | 7x / Woche | 25            |

Aufgrund von Abweichungen in der messtechnischen Ausstattung, Art und Häufigkeit von Bewässerung und Düngung, sowie der Bepflanzung zwischen den ersten drei und dem vierten Element (siehe dazu Abb. I-4:), wird E 4 in den nachfolgenden Ausführungen nicht weiter berücksichtigt. Vergleiche des Verhaltens und der Leistungsfähigkeit der mit Frisch- bzw. Grauwasser dotierten Elemente sind Gegenstand parallel durchgeführter und geplanter Forschungsarbeiten.

### I-4.2.2 Pflanzenwachstum

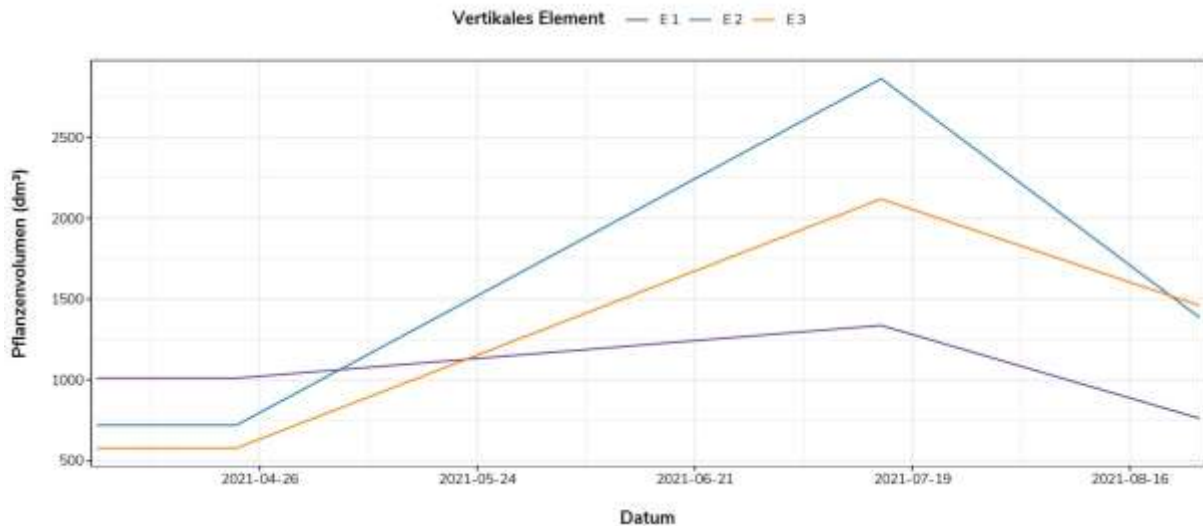
Analog zu den Bewässerungsdaten liegen konsistente Daten zum Pflanzenwachstum nur für 2021 vor. Dabei wurde für jede einzelne Pflanze manuell das Pflanzenvolumen an drei Stichtagen ermittelt. Die Messwerte einzelner Pflanzen wurden je Teilelemente zu einer Summe für das Volumen der Pflanzengemeinschaft je Element und Stichtagen zusammengefasst. Nach Annahme einer Anfangsperiode/Anwachsperiode vor der ersten Messung mit (annähernd) konstantem Pflanzenvolumen, wurde zwischen den drei Datenpunkten der Elemente linear interpoliert.

Dieser Schritt wurde aufgrund der teilweise unterschiedlichen Pflanzengemeinschaften und -positionen in den einzelnen Kisten, der wenigen Messungen und vereinzelter, interpolierter Lücken in den Messwerten einzelner Pflanzen notwendig. Trotz der damit einhergehenden, erheblichen Vereinfachung, erlaubt dieser Ansatz eine einheitliche, gemeinsame Betrachtung der Teilelemente E 1 bis E 3. Hierbei sind sich die Autor:innen aber bewusst, dass dies nicht das reale Wachstum einzelner Pflanzen in der grünen Wand widerspiegelt.



**Abb. I-4:** Pflanzengemeinschaften der grünen Wand mit den vertikalen Elementen E 1 bis E 4; Foto: I. Zluwa (2020).

In Abb. I-4: wird der Unterschied in der Bepflanzung zwischen den ersten drei Elementen und dem ganz rechten, vierten Element ersichtlich, die unter anderem dazu geführt hat, dass dieses Element für MEADOW nicht berücksichtigt wurde. Aus diesem Grund finden sich Abb. I-5: nur die resultierenden, abschnittsweise linearen, Wachstumsmodelle für drei Elemente E 1 bis E 4 für die Versuchsperiode 2021.



**Abb. I-5:** Interpoliertes Pflanzenvolumen für die Elemente E 1 bis E 3.

Trotz der ähnlichen Bepflanzung, die im Fall von E 2 und E 3 sogar identisch war, unterscheiden sich die Wachstumskurven maßgeblich. Dies ist zu unter anderem auf die nur bedingt objektive Art der Messung des Pflanzenvolumens, die Aggregation auf der Skala der Teilelemente und die wenigen Tage mit Messwerten zurückzuführen. Während sich Pflanzengemeinschaften in E 2 und E 3 grundsätzlich gleichen, bleibt das zu Beginn geringere Volumen von E 3 über die gesamte Wachstumsperiode hinter dem von E 2 zurück. Dass das Pflanzenvolumen in E 1 trotz des hohen Messwertes am ersten Stichtag kaum ansteigt wird dem höheren Stress durch die langen Bewässerungsintervalle (Tab. I-1:) zu Beginn von 2021, die nur langsam verkürzt wurden zugeschrieben.

#### I-4.2.3 Messsysteme und Sensorik

Der Versuchsaufbau verfügt über eine umfassende Instrumentierung. Dabei wird in weiterer Folge zwischen den Sensoren und Wasserzählern in den Kisten und Elementen der grünen Wand, die die internen Prozesse abbilden, und den Messsystemen, die um diese positioniert wurden, unterschieden. Dabei werden bei der zweiten Gruppe mit einer hochredundanten Konfiguration meteorologische Daten am Installationsort gesammelt werden. Abb. I-6: zeigt die Positionen der Sensoren in den Kisten und an der Wand hinter der Versuchsanlage.



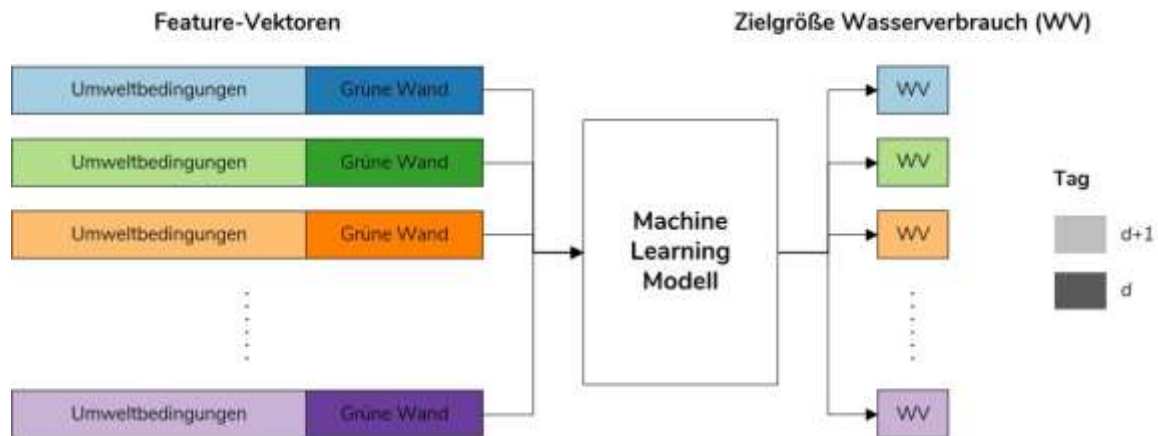
**Abb. I-6:** Sensorpositionen in und um die grüne Wand; Foto und Darstellung: B. Pucher (2020).

Wie in Abb. I-6: ersichtlich, werden von oben nach unten, abgesehen von der Ausstattung der beiden oberen Kisten, in jeder zweiten folgenden Kiste, Wassergehalt und damit verbunden die Leitfähigkeit und Temperatur in einer 10-Minuten-Auflösung gemessen und automatisiert aufgezeichnet. Daneben werden alle wesentlichen meteorologischen Parameter an unterschiedlichen Positionen über- vor- und unter der Wand gemessen. Konkret handelt es sich dabei um Temperatur, Niederschlag, Strahlung, Luft- und Dampfdruck, sowie die Luftfeuchtigkeit.

Gemeinsam mit den Bewässerungsdaten und dem Modell für das Pflanzenwachstum werden diese Sensordaten für die Generierung von Eingangsvariablen (sog. *Features*) für die datenbasierte Modellierung des Wasserverbrauchs der grünen Wand herangezogen. Aufbereitung und Analyse der in diesem Abschnitt dargelegten Messdaten und deren Einsatz für die Modellbildung auf Basis der in werden im nachfolgenden Kapitel im Kontext der ausgewählten Maschinenlernmodelle für die Wasserverbrauchsprognose dargelegt.

## I-5 Methodik der Wasserverbrauchsmodellierung

Der Ansatz für die datenbasierte Wasserverbrauchsmodellierung sieht den Einsatz von Maschinenlernmodellen zur multivariaten Regression vor (siehe Abb. I-7:). Als Modelle für diese Regression und damit die Verbrauchsprognose werden Modelle des maschinellen Lernens eingesetzt, die im Bereich der Hydrologischen Modellierung und Wasserbedarfsprognosen (u. a. Chen et al., 2017; Stelzl et al., 2021; Tamang & Shukla, 2019) bereits erfolgreich eingesetzt werden. Konkret handelt es sich dabei um Random Forest (RF) Modell, Support Vector Regression (SVR) und Feed-Forward Artificial Neural Networks bzw. Multilayer Perceptrons (MLP).



**Abb. I-7:** Methodik für die Wasserverbrauchsprognose mit maschinellem Lernen.

Aus der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen, aufbereiteten Sensordaten, werden für obige Algorithmen sogenannte Feature Vektoren abgeleitet, die sich aus Umweltdaten des Prognostetages ( $d+1$ ) und dem Status der grünen Wand vom Tag vor der Prognose ( $d$ ) zusammensetzen. Vorhergesagt wird der Wasserverbrauch für den Tag  $d+1$ . Diesem Zugang liegt die Überlegung zugrunde, mittels Messungen in der grünen Wand und frei zugänglichen Wetter- oder Klimadaten, den Wasserverbrauch schrittweise und mit hoher Genauigkeit vorhersagen zu können.

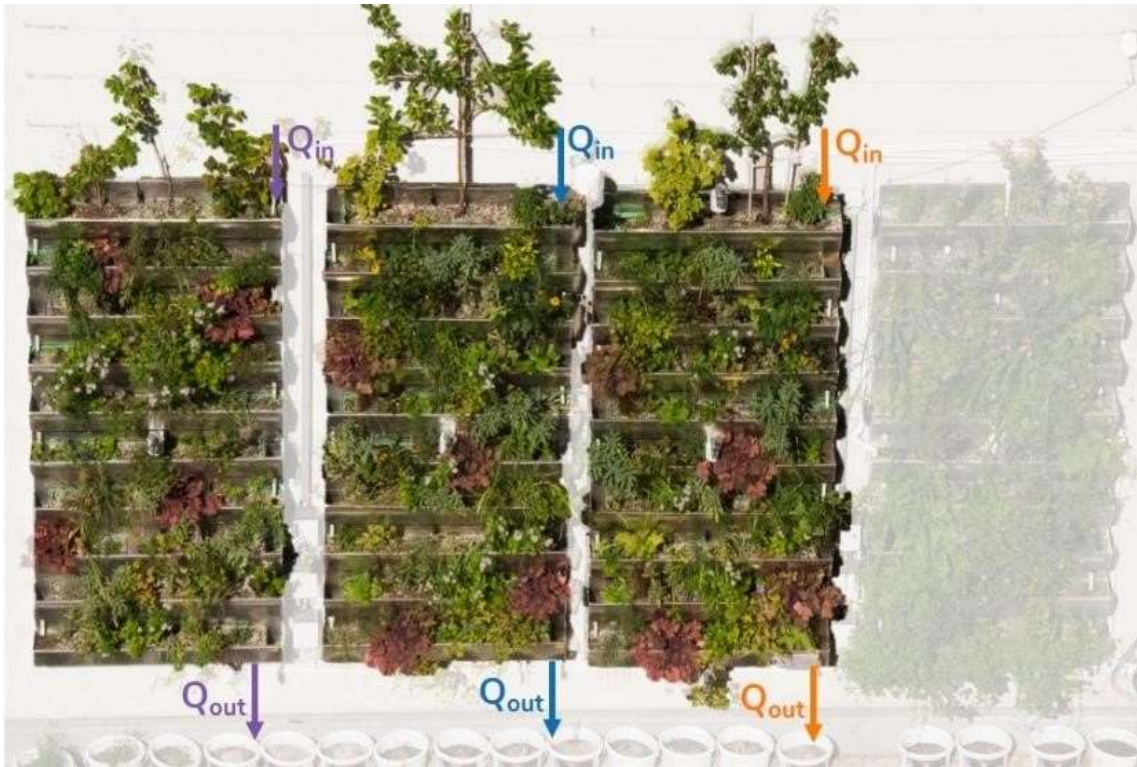
Auf die Ableitung der Systemgrenzen, der resultierende Stichprobenumfang, die Methodik zur Evaluierung der Modelle und die Beurteilung der Rolle der einzelnen Variablen, wird in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels eingegangen.

### I-5.1 Systemgrenzen und Zeitschritt für die Modellierung

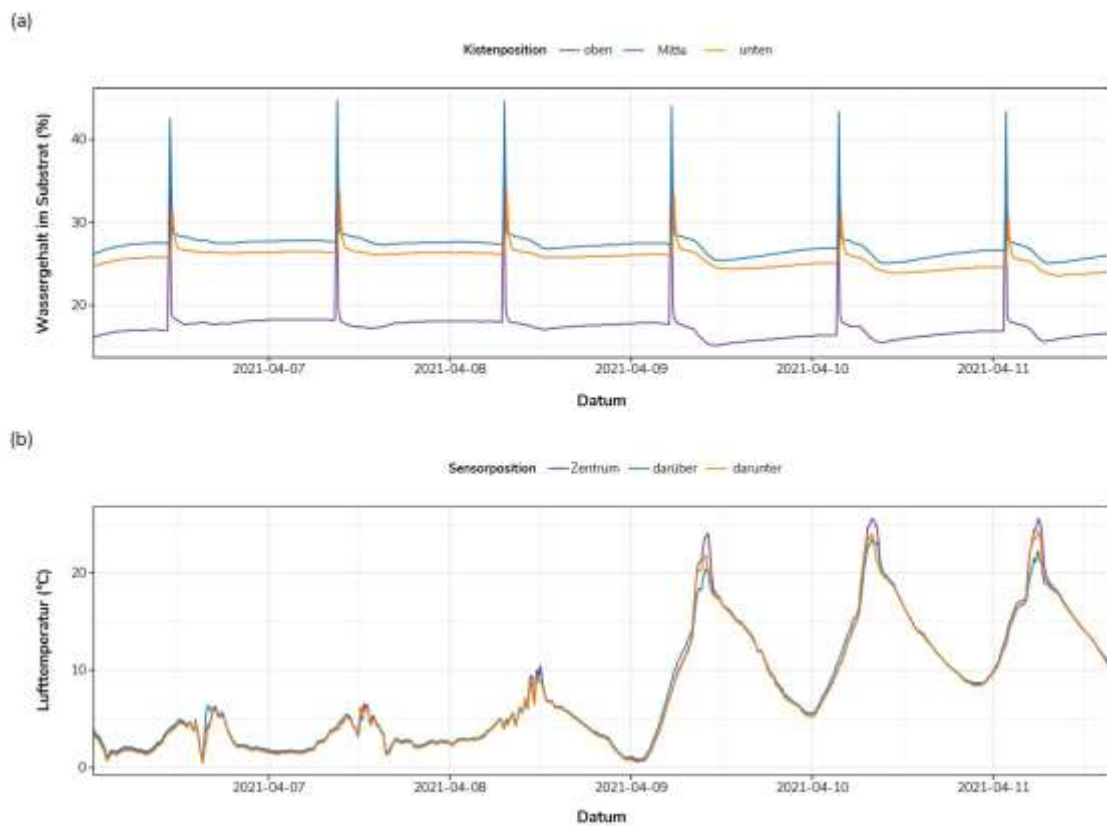
Als erster Schritt bei der Modellbildung wurden die Systemgrenzen, d.h. die sinnvolle räumliche Granularität der Analysen, sowie erreichbare zeitliche Auflösung für die Messdaten bestimmt. Während die modulare Gestaltung des Versuchsaufbaus eine Analyse auf Ebene einzelner Kisten zulassen würde, bedingt der Einsatz von Wasserzählern mit Aufsatzloggern, eine räumliche Aggregation auf die einzelnen vertikalen Elemente. Damit kann die Wasserbilanz für einen Tag durch die Differenz zwischen Bewässerungsmenge ( $Q_{in}$ ) am oberen Ende jedes Elements und dem abfließenden Überschusswasser ( $Q_{out}$ ) aus der letzten Kiste am unteren Ende berechnet werden (siehe auch Abschnitt I-5.2).

Der Zeitschritt für die Datenaufbereitung und damit für die Prognose wird auf diese Weise ebenfalls über die Messsysteme für Zu- und Abfluss vorgegeben (Tab. I-1: und Abb. I-10:). Messdaten in 10-Minuten Auflösung werden dementsprechend auf Tagesmittelwerte bzw. relative Änderungen pro Tag aggregiert, das Pflanzenvolumen entsprechend abschnittsweise linear interpoliert.





**Abb. I-8:** Systemgrenzen, Zu- ( $Q_{in}$ ) und Abflussmessungen ( $Q_{out}$ ) für die Elemente E 1 bis E 3; Foto: I. Zluwa (2020)



**Abb. I-9:** Wassergehalt in Element E 2 (a) und Lufttemperatur am Einbauort der grünen Wand (b).

Die Aggregation der Daten ermöglicht das Überbrücken quantitativer Inkonsistenzen bei qualitativ gleichem Verlauf von z.B. Messungen des Wassergehalts in den Kisten einer Wand, wo sich nicht immer, wie zu erwarten eine Art Sättigungsgradient von oben nach unten einstellt (Abb. I-9:).

Die räumliche Aggregation auf die vertikalen Elemente erlaubt es, für diese Sensoren ein gemittelttes Verhalten abzuleiten. Im Gegensatz zu den Messungen aus der grünen Wand, zeichnen die Messsysteme für die meteorologischen Parameter ein sehr konsistentes Bild. Am Beispiel der Lufttemperatur am Betriebsort unterstreicht Abb. I-9:, dass für alle drei Elemente identische Umweltbedingungen angenommen werden können. Unterschiede in den Spitzen sind in der Regel mit der Sensorposition und -orientierung zu erklären und zu bereinigen.

## I-5.2 Zielgröße Wasserverbrauch pro Tag

Abgestimmt auf den Aufbau der grünen Wand, deren Sensordichte und die damit einhergehende sinnvolle zeitliche- und räumliche Auflösung der verfügbaren Daten, wurde für die Modellierung des Wasserverbrauchs pro Tag eine stark vereinfachte hydrologische Wasserbilanz aufgestellt. So wurde die Zielgröße Wasserverbrauch (WV) als Differenz jener Wassermenge abgebildet, die pro Tag in die grüne Wand eingespeist ( $Q_{in}$ ) wird und im gleichen Zeitraum am unteren Elementende wieder abfließt ( $Q_{out}$ ). Abb. I-10:a bildet dieses Verhalten - gemäß Gleichung 1 - ab, für die Vegetationsperiode zwischen März und September 2021.

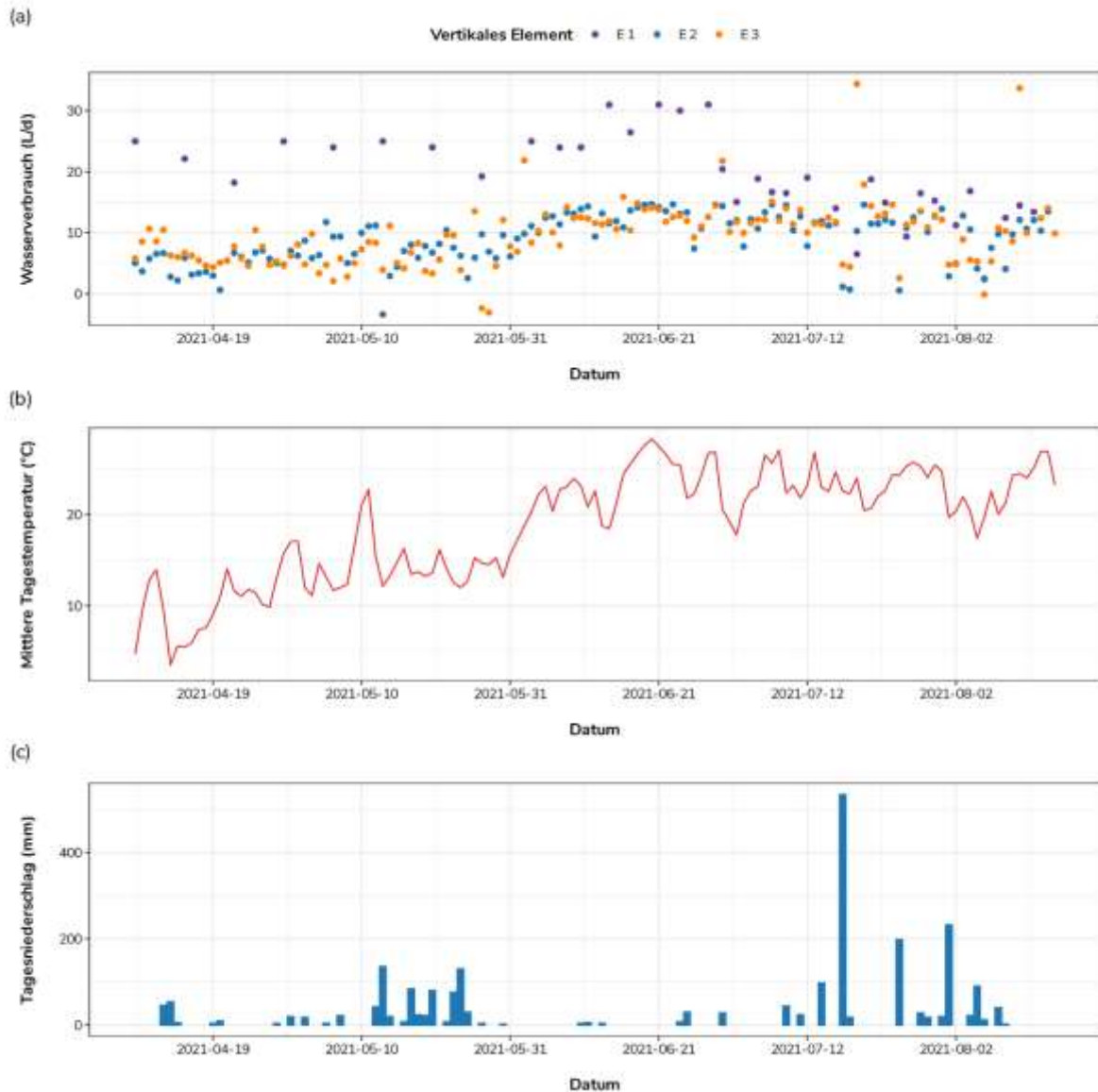
$$WV = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

Hervorzuheben sind in Abb. I-10:a, der ansteigende Wasserverbrauch Ende Mai, also zu Beginn des Sommers, wie durch den Temperaturverlauf in Abb. I-10:b untermauert wird. Im Gegensatz zum unmittelbaren Einfluss des Temperaturverlaufs auf den WV, zeigt sich der Einfluss des Niederschlages nur bei sehr starken oder längeren Niederschlagsereignissen (Abb. I-10:c). Dabei lässt sich jedoch anhand der Daten nicht eindeutig feststellen, ob der geringere Wasserverbrauch auf den Niederschlag selbst, oder auf den damit einhergehenden Temperaturabfall zurückzuführen ist.

In Abb. I-10:a wird die wesentliche Rolle des Bewässerungsintervalls auf den Wasserverbrauch der grünen Wand ersichtlich. So variiert der Tagesverbrauch von Element 1, bei dem neben dem Bewässerungsintervall auch die Dotierung variiert wurde. Nach einem Angleich von beiden Parametern Ende Juni, weist dieses Element einen vergleichbaren Wasserverbrauch wie die beiden anderen Elemente auf.

Aufgrund der zeitgleichen Variation von Bewässerungsintervall und -menge, sowie variierender Bepflanzung der drei untersuchten Elemente der grünen Wand, ist eine definitive Bestimmung des maximalen täglichen Wasserverbrauchs pro Quadrat- oder Laufmeter für den Versuchsaufbau nur schwer möglich. Grundsätzlich zeigen die verfügbaren Daten aber, dass mit einem reduzierten Bewässerungsintervall der Wasserverbrauch um ein Vielfaches ansteigt - bis hin zum sechsfachen Durchschnittsverbrauch.

Negative Tageswasserverbräuche im Datensatz sind auf die vereinfachte Wasserbilanz zurückzuführen, bei der die Speicheränderung in den Teilelementen, nicht zuletzt aufgrund der unvollständigen Datenlage, nicht explizit in diese Bilanz einbezogen werden konnte. Um diesen wesentlichen Parameter bei der Wasserverbrauchsmodellierung berücksichtigen zu können, wurde er implizit als Eingangsvariable, analog u.a. Umgebungstemperatur oder Niederschlagsmengen, in die Modelle und Prognosen integriert.



**Abb. I-10:** Täglicher Wasserverbrauch der Teilelemente (a), mittlere Tagestemperatur (b) und tägliche Niederschlagssumme (c).

Die Zielgröße täglicher Wasserverbrauch dient, bedingt durch begrenzte Instrumentierung des Versuchsaufbaus, als Ersatzgröße, um den Wasserverbrauch und damit indirekt den Bewässerungsbedarf einzelner Elemente abzuschätzen zu können. Daraus lassen sich bei Bedarf Durchschnittswerte für den WV pro Laufmeter (lfm) des eingesetzten Wandsystems, oder aber pro Kiste berechnen. Im ersten Fall wäre der Faktor hierfür 0.25, im zweiten Fall 0.1. An dieser Stelle muss jedoch angemerkt werden, dass es sich hierbei um Schätzungen handelt, unter anderem, da die Bepflanzung der einzelnen Elemente variiert. Nichtsdestotrotz erlauben die beiden Faktoren, in Kombination mit den Prognosemodellen eine grundlegende Abschätzung des zu erwartenden Wasserverbrauchs einer grünen Wand dieses Typs, in Abhängigkeit von deren Größe und Standort. Diese Abschätzung eignet sich wiederum, um die erforderliche Infrastruktur (z.B. Zisternen oder Grauwassertanks) für einen effektiven Betrieb über eine Vegetationsperiode dimensionieren zu können.

Augenscheinlich ist für eine solche Abschätzung der benötigten Bewässerungsmengen auf Basis des Wasserverbrauchs, die Berücksichtigung der Speicheränderung im Substrat der Kisten und ggf. der Wassereinträge durch Niederschlag in den Eingangsvariablen der Prognosemodelle erforderlich. Die

Bedeutung der entsprechenden Variablen und die Richtigkeit dieser Annahmen werden in Kapitel I-6.2, diskutiert.

### I-5.3 Regressoren und Stichprobenumfang

Gemäß der definierten räumlichen auf Auflösung von einem vertikalen Teilelement und einer zeitlichen Auflösung von einem Tag, wurden die hochaufgelösten Messdaten der Sensoren aus den Elementen der grünen Wand element- und tageweise mit einem arithmetischen Mittel oder als relative Änderung aufbereitet (Tab. I-2:). Daten der Umweltsensoren wurden in einen gesamten, repräsentativen Mittelwert für alle Eingangsparameter je Tag zusammengeführt (Tab. I-3:).

**Tab. I-2:** Variablen bzw. Regressoren aus Daten der grünen Wand.

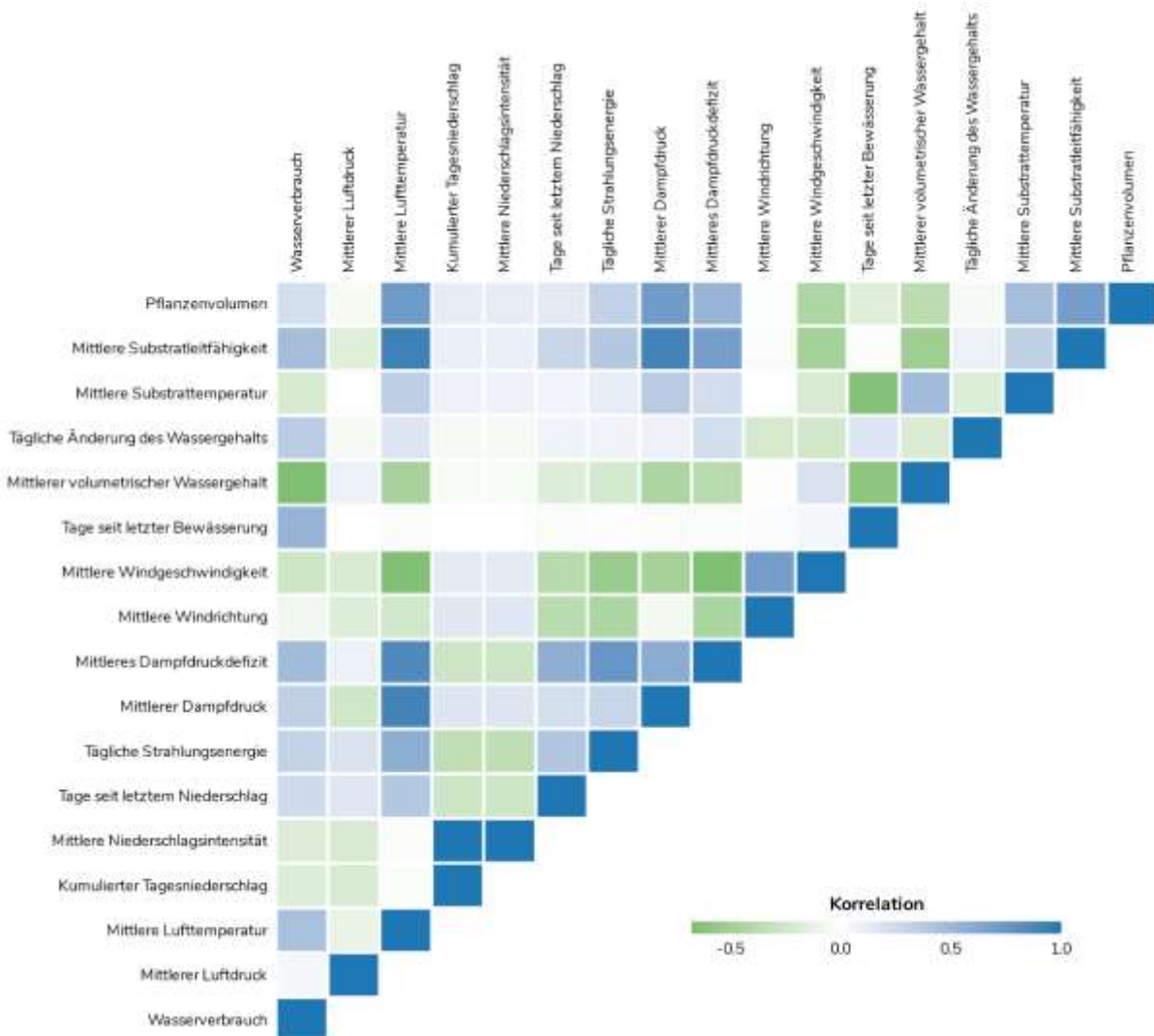
| Variable                              | Einheit                         |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| Mittlerer volumetrischer Wassergehalt | m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> |
| Tägliche Änderung des Wassergehalts   | %                               |
| Tage seit letzter Bewässerung         | #                               |
| Mittlere Substrattemperatur           | °C                              |
| Mittlere Substratleitfähigkeit        | mS·d <sup>-1</sup>              |
| Pflanzenvolumen                       | dm <sup>3</sup>                 |

**Tab. I-3:** Variablen bzw. Regressoren aus den meteorologischen Daten.

| Variable                           | Einheit                            |
|------------------------------------|------------------------------------|
| Tägliche Strahlungsenergie         | W·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> |
| Kumulierter Tagesniederschlag      | mm·d <sup>-1</sup>                 |
| Mittlere Niederschlagsintensität   | mm·h <sup>-1</sup>                 |
| Tage seit dem letzten Niederschlag | #                                  |
| Mittlere Windgeschwindigkeit       | m·s <sup>-1</sup>                  |
| Mittlere Windrichtung              | rad                                |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| Mittlere Lufttemperatur     | °C  |
| Mittlerer Luftdruck         | kPa |
| Mittlerer Dampfdruck        | kPa |
| Mittleres Dampfdruckdefizit | kPa |

In Folge des Aufbereitungsprozesses stehen zwei Gruppen von Regressoren. Zum einen die Variablen, die den Zustand der grünen Wand wiedergeben (Tab. I-2:), zum anderen jene, die die Umweltprozesse vor Ort darbieten (Tab. I-3:). An dieser Stelle soll betont werden, dass die Variablen für meteorologischen Rahmenbedingungen vor Ort für alle vier Elemente gleich angesetzt wurden (homogene Umweltbedingungen), während jene für die einzelnen Elemente aufgrund der Unterschiede in Bepflanzung und Bewässerung individuell berechnet wurden. Am Ende der Datenaufbereitung stehen insgesamt 16 Variablen bzw. Regressoren, die durch die Kombination der Daten aus allen drei Elementen, zu einem Datensatz mit 300 Feature-Vektoren zusammengefasst werden konnten.



**Abb. I-11:** Visuelle Darstellung der Korrelationsmatrix der Zielgröße Wasserverbrauch (WV) und den erklärenden Variablen bzw. Regressoren für die Modellentwicklung.

Abb. I-11 zeigt die Korrelation zwischen der Zielgröße Wasserverbrauch und den Eingangsvariablen. Die Korrelationsanalyse wurde in erster Linie zur Überprüfung der Richtigkeit der Datenaufbereitung und der augenscheinlich, anhand von Abb. I-10: identifizierten Zusammenhänge, herangezogen. So bestätigt obige Abbildung, die erwarteten Zusammenhänge zwischen dem Wasserverbrauch der grünen Wand und deren Umgebung.

Die Daten weisen eine eindeutige, positive Korrelation zwischen Parametern auf, die die Verdunstung fördern, beispielsweise Pflanzenvolumen, Temperatur oder Dampfdruck. Umgekehrt zeigt sich, wie zu erwarten, eine negative Korrelation zwischen Wasserverbrauch und Niederschlag oder Wassergehalt im Substrat.

Im Rahmen von Projekt MEADOW wurde die Korrelation der Eingangsvariablen - über diese Plausibilitätsprüfung hinaus -, nicht für eine gezielte Auswahl von (Untergruppen an) Variablen herangezogen, um nachfolgend (siehe Kapitel I-6.2) anhand einer Analyse des Informationsgehalts einzelner Variablen für die Verbrauchsprognose, Rückschlüsse auf eine sinnvolle und zweckmäßige Instrumentierung für den Betrieb von grünen Wänden ableiten zu können. Außerdem soll diese Analyse einen ersten Schritt für die Optimierung der Prognosemodelle in zukünftigen Forschungsarbeiten darstellen.

Die 300 Feature-Vektor-Zielgrößen-Paare werden für die Modellentwicklung und -evaluierung in einem Verhältnis von 80 zu 20 geteilt. Dabei werden 80 Prozent für die Anpassung der Prognosemodelle eingesetzt (sog. *Training*), die verbleibenden 20 Prozent für die Validierung (sog. *Testing*) dieser Modelle. Vor der Teilung des Datensatzes, wird dieser nach dem Zufallsprinzip durchmischt, um den übermäßigen Einfluss einzelner Teilelemente auf die beiden Teildatensätze zu vermeiden.

Darüber hinaus werden durch diesen Mischvorgang Trends und saisonale Effekte aus dem Datensatz entfernt, womit berücksichtigt werden soll, dass sich die treibenden Faktoren, die sich durch das konstante Wechselspiel zwischen grüner Wand und Umweltbedingungen ergeben, laufend ändern können und die Vegetationsperiode eines Jahres nicht jenen der Vor- oder Folgejahre gleichen muss. Ziel ist hierbei ein Modellkonzept zu schaffen, dass einfach übertragen werden kann und mit neuen Daten, über einzelne Vegetationsperioden hinweg verbessert werden kann.

#### I-5.4 Gütemaße für die Modellevaluierung

Der Modellvergleich erfolgt über eine Evaluierung der prozentuellen Abweichung zwischen den berechneten und den prognostizierten Wasserverbräuchen. Darüber hinaus werden die gängigen, Gütemaße Mean Average Error (MAE) und Root Mean Square Error (RMSE), in ihrer normalisierten Form, siehe dazu auch Gleichung 2 bzw. 3, angesetzt. Für die Normalisierung wird der Mittelwert des anhand des aus den Messdaten berechneten Wasserverbrauchs angesetzt.

$$NMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{\bar{y}} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}}{\bar{y}} \quad (3)$$

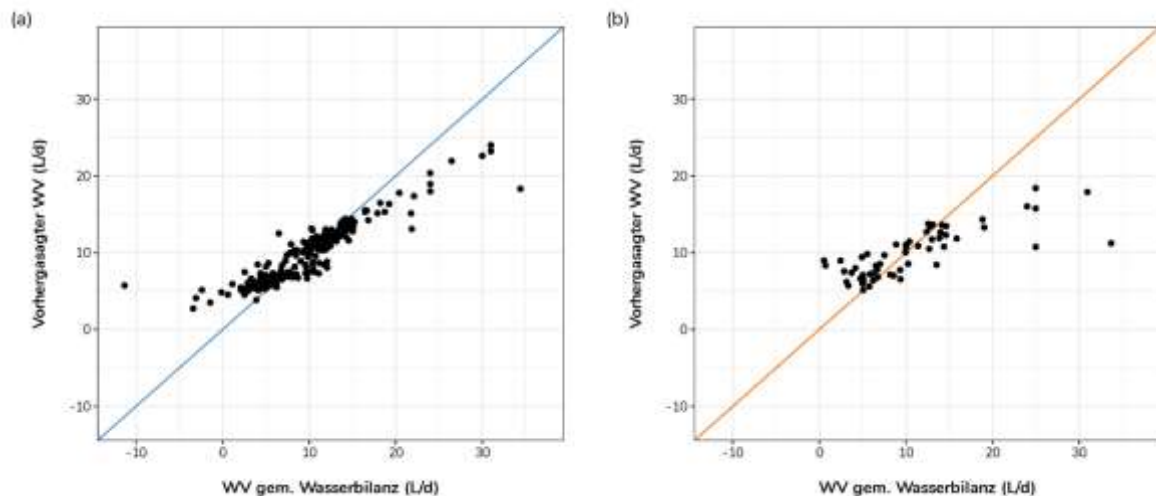
## I-6 Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die mit dem gewählten Ansatz für die Prognose des Wasserverbrauchs und den drei ausgewählten Maschinenlernmodellen erreichten Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Neben einer Analyse der Leistungsfähigkeit der Modelle in Bezug auf die verfügbare Datengrundlage, den getroffenen Annahmen und erforderlichen Vereinfachungen, werden die Ergebnisse im Hinblick auf den gemessenen durchschnittlichen Wasserverbrauch der Teilelemente, Schlussfolgerungen für Messkonzepte anderer grüner Wände und möglicher Szenarien für deren Skalierung und Einsatz erläutert.

### I-6.1 Wasserverbrauchsprognose mit unterschiedlichen Modellen

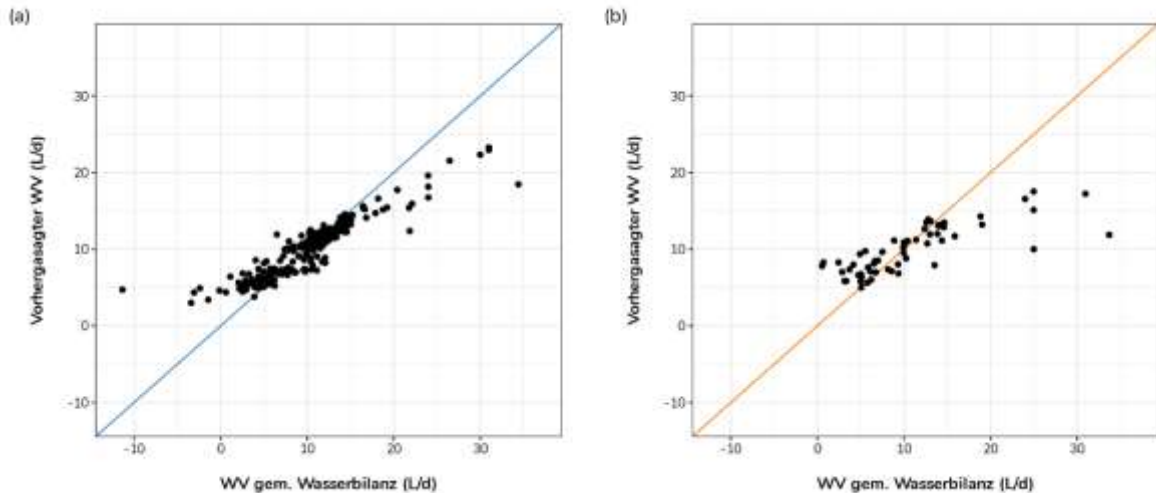
In den folgenden drei Abbildungen (Abb. I-12, I-13 und I-14), sowie in Tab. I-4: finden sich die Ergebnisse der Modellierung des Wasserverbrauchs als Vorhersage für den folgenden Tag durch Kombination von Features bzw. Variablen aus der grünen Wand und den meteorologischen Daten des Folgetages. Die drei Abbildungen zeigen die Güte der Modellanpassung (jeweils links) am Trainingsdatensatz und jene der Validierung am Testdatensatz (jeweils rechts). Dabei erfolgt die Darstellung als Abweichung der Zielgröße täglicher Wasserverbrauch (berechnet gemäß Gleichung 1) und den vom jeweiligen Prognosemodell vorhergesagten Werten. Eine entsprechende Darstellung findet sich - in dieser Reihenfolge -, für die Regression mittels Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) und Multilayer Perceptron (MLP).

Für alle drei Algorithmen wird augenscheinlich, dass ein Großteil der Abweichungen zwischen Prognose- und Messwert in einem Bereich zwischen einem und zehn Prozent liegt.

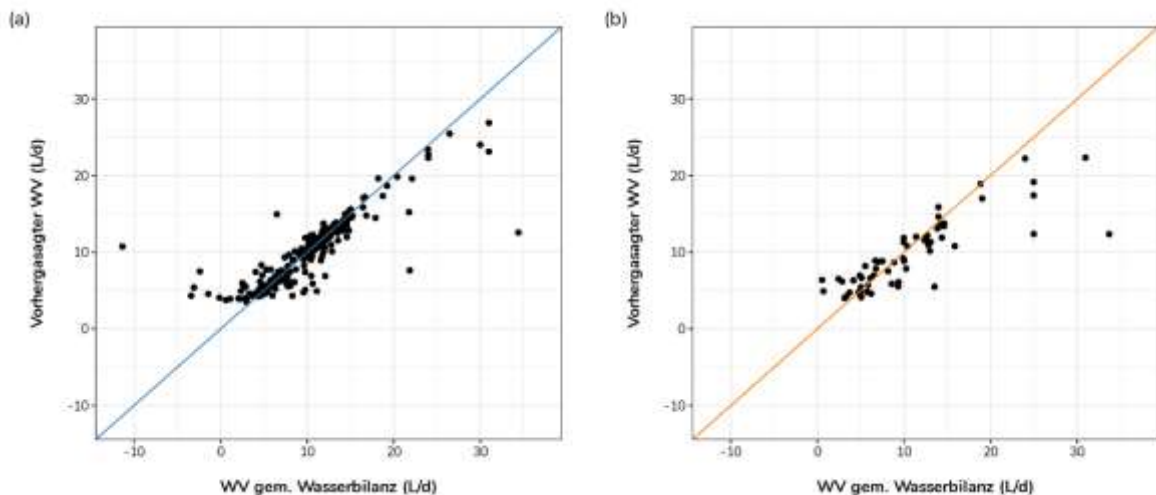


**Abb. I-12:** Abweichungen zwischen Modell und Messung bei Modellanpassung (a) und Prognose (b) für RF.

Ausreißer stellen negative Werte der Zielgröße Wasserverbrauch dar, die sich aus der eingesetzten, vereinfachten Wasserbilanz und durch die Reduktion des Datensatzes bei der Datenaufbereitung und -evaluierung ergeben. Die großen Abweichungen bei den sehr hohen Wasserverbräuchen ergeben sich aus deren Unterrepräsentation im Datensatz im Vergleich zu Verbräuchen zwischen 5 L/d und 12 L/d.



**Abb. I-13:** Abweichungen zwischen Modell und Messung bei Modellanpassung (a) und Prognose (b) für MLP.



**Abb. I-14:** Abweichungen zwischen Modell und Messung bei Modellanpassung (a) und Prognose (b) für SVR.

Ergänzend zu den obigen drei Abbildungen, finden sich in Tab. I-4: die Abweichungen zwischen der Anpassungs- und Prognosegenauigkeit für die einzelnen Algorithmen anhand der beiden normalisierten Gütemaße NMAE und NRSME. Dabei zeigt sich, dass die Abweichungen, bedingt durch die Grenzen und Struktur des Datensatzes stark variieren können. So wird den im letzten Absatz erwähnten Ausreißern im Datensatz von den Gütemaßen eine sehr hohe Bedeutung beigemessen. Wie die drei Abbildungen in diesem Kapitel, zeigt die Tab. I-4:, dass das vor allem das SVM-Modell, gefolgt vom RF-Modell, sowohl die Trainings-, als auch die Testdaten mit vergleichbar geringem Fehler abbilden kann.

Die Ursache für die unzureichende Abbildung der Ausreißer im Wasserverbrauch (nach oben und nach unten) ist nicht zwingend auf die Modelle, sondern eher auf den Datensatz zurückzuführen. Dort finden sich wenige, sehr hohe oder aber negative Wasserverbräuche (siehe dazu auch Abb. I-10:). Diese sind nicht zwingend auf die Umgebungsbedingungen zurückzuführen, vielmehr haben sie ihre Ursache in der Bewässerung. So werden die hohen Verbräuche, vor allem bei E 1 durch die niedrige Bewässerungsfrequenz hervorgerufen, was zu einer hohen Wasseraufnahme im Substrat führt.



Negative Verbräuche entstehen, vor allem bei überdurchschnittlich hohen Tagesdotierungen bei gesättigtem Substrat, die Durchlaufdynamik des Wassers von der obersten in die unterste Kiste einer Wand, oder durch eine Überlagerung beider Prozesse. In jedem Fall zeigen die Daten aus dem Versuchsaufbau, bestätigt durch die Wasserverbrauchsmodelle, dass eine regelmäßige Bewässerung um den mittleren Wasserverbrauch, angepasst an die zu erwartenden Umweltbedingungen nicht nur die Funktion von grünen Wänden optimieren, sondern auch die Planbarkeit des Wasserverbrauchs erleichtern. So werden die Spitzen, die die Prognosequalität der Modelle reduzieren, vermieden, während simultan Pflanzenstress reduziert und die Kühlleistung verbessert werden.

Die größeren Fehler des Neuronalen Netzes (MLP-Modell), lassen darauf schließen, dass dieses Modell eine weitergehende Optimierung seiner Hyperparameter, das heißt eine Optimierung der Modellarchitektur erfordert. Eine solche systematische Modellverbesserung war zum Zeitpunkt der Legung des Endberichts noch im Gange, da ihre Aussagekraft wesentlich von zusätzlichen Messdaten aus der noch laufenden Vegetationsperiode 2022, abhängig ist.

Unabhängig von diesen noch laufenden Analysen und Modellverbesserungen, zeigen die Prognoseergebnisse, dass auch bei dem bereits vorhandenen, kompakten Datensatz, und einer Optimierung auf Basis einer ersten, schrittweisen Anpassung der Modellparameter, Ergebnisse, die sich für die Prognose des Wasserbedarfs eignen, erstellt werden können.

**Tab. I-4:** Anpassungsgüte (Trainingsdaten) und Prognosequalität (Testdaten) der drei Algorithmen.

| Algorithmus | Gütemaß | Trainingsdaten | Testdaten |
|-------------|---------|----------------|-----------|
| RF          | NMAE    | 0.165          | 0.299     |
|             | NRMSE   | 0.268          | 0.471     |
| MLP         | NMAE    | 0.240          | 0.283     |
|             | NRMSE   | 0.377          | 0.439     |
| SVM         | NMAE    | 0.145          | 0.232     |
|             | NRMSE   | 0.295          | 0.394     |

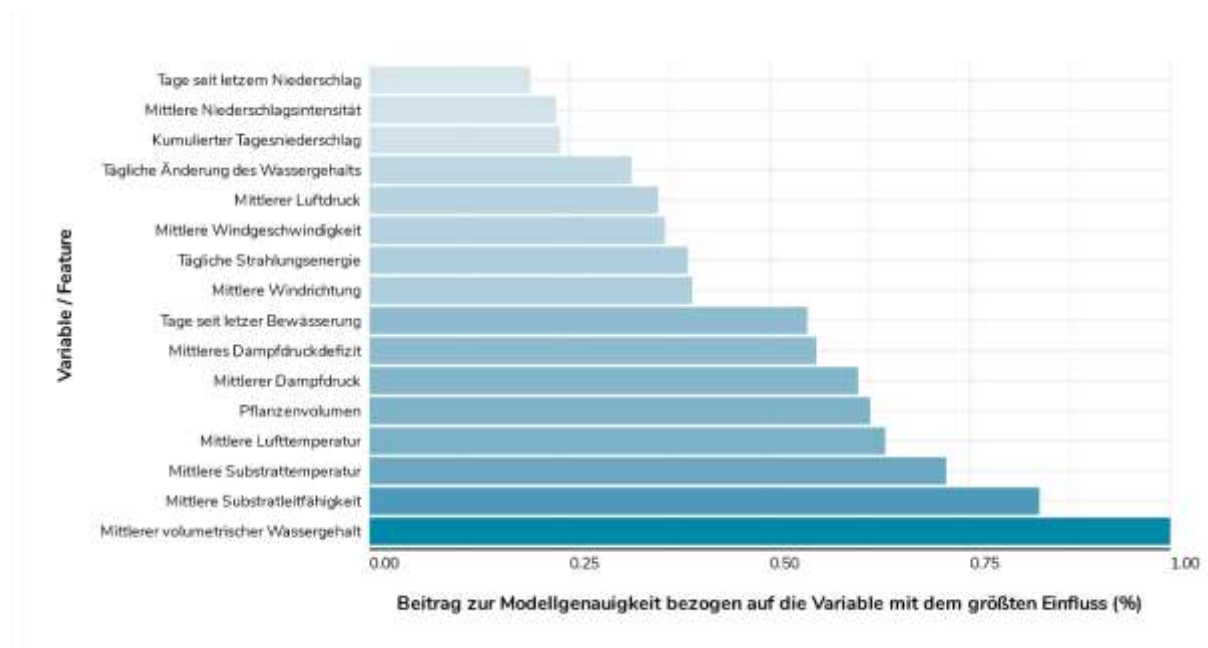
Die mit diesen Modellen berechneten Verbräuche pro Wandelement können mit Hilfe der in Abschnitt I-5.2 eingeführten Faktoren für die Auslegung und Bewässerung vergleichbarer grüner Wände, in Abhängigkeit von deren Größe, herangezogen werden. Der vorhergesagte mittlere Wasserverbrauch berücksichtigt die Veränderung der grünen Wand in Abhängigkeit der Umweltbedingungen am Einbauort und des Fortschritts der Vegetationsperiode. Somit kann der Wasserverbrauch den anfallenden Niederschlagsmengen bzw. dem Grauwasseranfall am Einbauort gegenübergestellt werden, um dessen Eignung für den Betrieb einer grünen Wand - in einer gewissen Dimension - festzustellen.

Welche Bedeutung die einzelnen Variablen für die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Modelle haben und was dies (a) für eine weitere Verbesserung der Modelle und (b) für das Ausarbeiten von Mess- und Steuerkonzepten für anderen grüne Wände ableiten lässt, wird im folgenden Kapitel anhand des angewendeten Random Forest Modells erläutert.

## I-6.2 Bedeutung einzelner Variablen für die Verbrauchsprognose

Eine (erste) Analyse der Bedeutung der einzelnen Variablen für die Verbesserung der Prognosemodelle zeigt, dass die Eingangsgrößen mit hoher Wahrscheinlichkeit reduziert werden können. Für diese Evaluierung wurden eine Aufstellung der sog. *Variable Importance* bzw. *Feature Importance* unter Zuhilfenahme eines eingesetzten Random Forest Modells eingesetzt (Abb. I-15). Diese Darstellung gibt die Rolle einzelner Variablen bei der Vorhersage des Wasserverbrauchs wieder.

Unter anderem ist Abb. I-15: eine verhältnismäßig geringe Bedeutung der Niederschlagsparameter zu entnehmen. Dies scheint Annahmen aus Abschnitt I-5.2 zu bestätigen, dass sich der geringe Wasserverbrauch nach Niederschlagsereignissen unter Umständen mit dem damit in Zusammenhang stehenden Temperaturabfall abbilden lässt; ein Umstand, der nach aktueller Datenlage auf die Positionierung und das vertikale Layout der grünen Wand, sowie die Aggregation der Eingangsparameter zurückgeführt wird. Der vermeintlich große Einfluss von Niederschlägen, vor allem von jenen mit starker Intensität, scheint sich lediglich auf den Wasserhaushalt einzelner Kisten auszuwirken, nicht aber auf jenen der Teilsysteme bei vereinfachten Tagesbilanzen.



**Abb. I-15:** Beitrag der einzelnen Variablen zur Leistungsfähigkeit des eingesetzten Random Forest Modells.

Aus Abb. I-15: wird ersichtlich, dass sich eine Kombination aus Variablen, die den Sättigungszustand des Substrats und die meteorologischen Rahmenbedingungen vor Ort wiedergeben, sehr gut für die Wasserverbrauchsprognose von grünen Wänden eignen. Dies bestätigt die gute Eignung von Bodenfeuchtesensoren für die Wasserverbrauchsprognose von grünen Wänden, was einen Rückgriff auf Mess- und Steuerungssysteme aus der Landwirtschaft und Gartenbau erlaubt. Die Bedeutung dieser Parameter spricht aber auch dafür, dass eine vollständige Ausstattung der Kisten mit entsprechender Sensorik sinnvoll wäre.

Darüber hinaus wird deutlich, dass das Pflanzenvolumen und damit das Pflanzenwachstum einen wichtigen Eingangsparameter für den Wasserverbrauch darstellen. Neben der Umgebungstemperatur, spielen meteorologische Parameter, die die Verdunstungsleistung beeinflussen, eine wichtige Rolle für den Verbrauch und damit für die Bewässerungsplanung.

Die Kombination von Features, die die grüne Wand beschreiben und solchen, die die zu erwartenden meteorologischen Rahmenbedingungen wiedergeben, erweist sich somit als zielführender Zugang für Wasserverbrauchsprognose und Bewässerungsplanung. Dies zeigt, dass eine Bewässerungsplanung

und Steuerung mit relativ günstiger Sensorik und einfachen Maschinenlernmodellen durchgeführt werden kann.

Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch auch, dass der hohe Einfluss jener Parameter, die von Ausführung der grünen Wand und deren Bepflanzung abhängen, unter Umständen weitere Messungen, höher aufgelöste Daten, und ggf. komplexere Modelle erfordern. In diesem Kontext sind für Folgeuntersuchungen, eine automatisierte Methode zum Dokumentieren des Pflanzenwachstums erforderlich (beispielsweise mit einem Bilderkennungsverfahren auf Basis von Maschinenlernen), um eine genauere Entwicklung dieses Parameters über die Wachstumsperiode in die Prognosemodelle einfließen zu lassen.

Schließlich kann durch gezielte Variablenselektion redundante Information aus dem Datensatz entfernt werden, um (a) die Leistungsfähigkeit der Prognosemodelle zu verbessern, oder (b) zumindest den Aufwand bei der Datengenerierung (Anzahl und Typ von Sensoren, Art der Datenübertragung) und -verarbeitung zu reduzieren, ohne die Modelleleistung erheblich zu verschlechtern. Ein solcher Selektionsprozess, abgestimmt auf die drei eingesetzten Maschinenlernmodelle, befand sich zum Zeitpunkt der Berichtslegung, unter Einbeziehung der Daten aus der Vegetationsperiode 2022 noch in Arbeit.

### I-6.3 Szenarien für den Einsatz des Prognosemodells

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus dem Projekt MEADOW, werden nachfolgend konkrete Szenarien für den Einsatz der entwickelten Methode für die Wasserverbrauchsprognose und damit die Bewässerungsplanung zusammengefasst:

- Sicherstellung der Funktionsweise

Eine ausreichende Bewässerung, vor allem in den Sommermonaten ist immer sicherzustellen damit eine grüne Wand, bzw. ihre Pflanzen den maximalen Kühleffekt erreichen kann. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn nicht Trinkwasser für die Bewässerung verwendet wird (was grundsätzlich vermieden werden sollte, um eine Erhöhung des Wasserverbrauchs für betriebliche Zwecke zu verhindern). Für den Einsatz von Wasser aus Wiedergewinnung wie Regen- oder gereinigtes Abwasser ist wichtig eine Vorhersage über die benötigte Menge treffen zu können, damit diess auch bereitgestellt werden kann.

- Einsatz des Modells mit Wetterdaten und Klimaprojektionen

Durch die gewonnenen Erkenntnisse aus der modellhaften Beschreibung der gemessenen Daten kann eine Beschreibung der einzelnen Parameter in einflussgebend und nicht-einflussgebend erfolgen. Dadurch lässt sich das Monitoring von grünen Wänden maßgebend verbessern und die Funktionsweise sicherstellen.

- Auswirkung der Modellvorhersage auf die tatsächliche Kühlungswirkung

Aus der Sicht des urbanen Wassermanagements im Zusammenhang mit nachhaltiger Wasserwiedernutzung ist eine Vorhersage basierend auf Wetterdaten äußerst wichtig. Der benötigte Wasserbedarf für die Funktion Kühlung ist stark von täglichen Schwankungen in der Temperatur und Strahlung abhängig. Die Ressource Wasser soll dabei zielgerichtet, jedoch in kleinster Weise verschwenderisch eingesetzt werden. Durch das Modell und die vorhandene Versuchsanlage kann überprüft werden wie sich eine Änderung in der vorhergesagten Wassergabe auf den Kühleffekt auswirkt und dadurch eine langzeitige nachhaltige Bewässerungsstrategie entwickelt werden.

- Entwicklung neuer Vertikalbegrünungssysteme für die ganzheitliche Wasserwiedernutzung

Anhand des Prognosemodells lassen sich die Auswirkungen von neuen Entwicklungen in der Anwendung überprüfen. Vor allem der Einsatz von Vertikalbegrünungssysteme in der Abwasserreinigung ist hier interessant da die benötigten Wassermengen den derzeitigen Vorgaben für die Bewässerung weit überschreiten können (dies ist System- und Dimensionierungsabhängig).

## I-7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des Projekts MEADOW wurde ein erster Schritt zum systematischen Einsatz datenbasierter Modellierung, d. h. von Maschinenlernmodellen, für die Prognose des Wasserverbrauchs und damit der Planung des Bewässerungsbedarfs von grünen Wänden, gesetzt. Gemäß der Intention des Projekts, die Eignung solcher Modelle für die Wasserverbrauchsprognose anhand der Daten einer experimentellen grünen Wand zu testen, konnte gezeigt werden, dass dies grundsätzlich möglich ist.

Nichtsdestotrotz legen die Ergebnisse nahe, dass für belastbare Aussagen eine umfassendere Datengrundlage, sowie eine weitere Evaluierung des gewählten Ansatzes erforderlich ist. Während der erste Aspekt durch Einbeziehung der Messdaten aus der Vegetationsperiode 2022, die zum Zeitpunkt der Legung dieses Projektberichts noch nicht abgeschlossen war, systematisch untersucht werden kann, erfordert der zweite Aspekt mehrere Teilschritte. So ist für die Evaluierung des Modellansatzes eine Detailanalyse der vereinfachten Wasserbilanz für die Berechnung Zielgröße Wasserverbrauch erforderlich, die, z.B. bei expliziter Berücksichtigung der Speicheränderung im Substrat der grünen Wand, unmittelbaren Einfluss auf die Zahl der Regressoren haben und somit eine Anpassung der Struktur der Maschinenlernmodelle haben würde.

Die mit den Daten aus 2021 entwickelten Modelle, sowie die damit generierten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass mit den getroffenen Annahmen und erforderlichen Vereinfachungen, eine Wasserverbrauchsprognose für einzelne Elemente der experimentellen grünen Wand möglich ist. Diese Teilelemente können durch Einsatz einfacher, aus ihrem Aufbau abgeleiteten Faktoren, angesetzt werden um, z.B. den Wasserverbrauch pro Laufmeter grüner Wand abzuleiten. Eine solche Abschätzung mit Hilfe der entwickelten Modelle erlaubt es Stakeholder:innen, Planer:innen und Entscheidungsträger:innen die Eignung eines Standortes für den Betrieb einer grünen Wand zu quantifizieren.

Schließlich weisen die Erkenntnisse des Projekts darauf hin, welche Anforderungen an das Monitoring und damit die messtechnische Ausstattung von grünen Wänden gestellt werden müssen, um eine zuverlässige Wasserverbrauchsprognose zu ermöglichen. In diesem Kontext werden weitere Untersuchungen an der Versuchsanlage durchgeführt, um die zentralen Parameter für die Verbrauchsprognose zu identifizieren, Standortempfehlungen, sowie Richtwerte für die Dimensionierung von Grauwassertanks und Zisternen auf Basis von Wetterdaten und Klimaprojektionen zu verbessern. Damit soll der Einsatz dieser grünen Infrastrukturen, über den mit diesem Projekt gesetzten, ersten Schritt hinaus, nachhaltig zu fördern.

## I-8 Literaturverzeichnis

- Başdoğan, G., & Çiğ, A. (2016). Ecological-Social-Economical Impacts of Vertical Gardens in the Sustainable City Model. 10.
- Bevacqua, M., Grossi, G., Fionda, M. P., & Arcuri, N. (2018). Passive Cooling Techniques for Less Energy Consumption in Buildings a Comparative Study on Green Surfaces. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 1–6. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8494625>
- Chen, G., Long, T., Xiong, J., & Bai, Y. (2017). Multiple Random Forests Modelling for Urban Water Consumption Forecasting. *Water Resources Management*, 31(15), 4715–4729. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1774-7>
- Dal Ferro, N., De Mattia, C., Gandini, M. A., Maucieri, C., Stevanato, P., Squartini, A., & Borin, M. (2021). Green walls to treat kitchen greywater in urban areas: Performance from a pilot-scale experiment. *Science of The Total Environment*, 757, 144189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144189>
- Daniel, M., Lemonsu, A., & Vigié, V. (2018). Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk in future climate. *Urban Climate*, 23, 287–308. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.001>
- Davis, M. M., & Hirmer, S. (2015). The potential for vertical gardens as evaporative coolers: An adaptation of the 'Penman Monteith Equation.' *Building and Environment*, 92, 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.033>
- Gioannini, R., Al-Ajlouni, M., Kile, R., VanLeeuwen, D., & St. Hilaire, R. (2018). Plant Communities Suitable for Green Roofs in Arid Regions. *Sustainability*, 10(6), 1755. <https://doi.org/10.3390/su10061755>
- 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(7), 3910. <https://doi.org/10.3390/su13073910>
- Han, C., & Shim, I.-S. (2020). Changes in Growth Characteristics of Seven Foliage Plants Grown in an Indoor Bio-Wall System Depending on Irrigation Cycle. *Journal of People, Plants, and Environment*, 23(2), 179–189. <https://doi.org/10.11628/ksppe.2020.23.2.179>
- Koyama, T., Yoshinaga, M., Hayashi, H., Maeda, K., & Yamauchi, A. (2013). Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Building and Environment*, 66, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.020>
- Liberalesso, T., Mutevuie Júnior, R., Oliveira Cruz, C., Matos Silva, C., & Manso, M. (2020). Users' Perceptions of Green Roofs and Green Walls: An Analysis of Youth Hostels in Lisbon, Portugal. *Sustainability*, 12(23), 10136. <https://doi.org/10.3390/su122310136>
- Mayrand, F., Clergeau, P., Vergnes, A., & Madre, F. (2018). Vertical Greening Systems as Habitat for Biodiversity. In *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability* (pp. 227–237). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00021-5>
- Medl, A., Florineth, F., Kikuta, S. B., & Mayr, S. (2018). Irrigation of 'Green walls' is necessary to avoid drought stress of grass vegetation (*Phleum pratense* L.). *Ecological Engineering*, 113, 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.007>
- Meral, A., Başaran, N., Yalçınalp, E., Doğan, E., Ak, M., & Eroğlu, E. (2018). A Comparative Approach to Artificial and Natural Green Walls According to Ecological Sustainability. *Sustainability*, 10(6), 1995. <https://doi.org/10.3390/su10061995>

- Pearlmutter, D., Pucher, B., Calheiros, C. S. C., Hoffmann, K. A., Aicher, A., Pinho, P., Stracqualursi, A., Korolova, A., Pobric, A., Galvão, A., Tokuç, A., Bas, B., Theochari, D., Milosevic, D., Giancola, E., Bertino, G., Castellar, J. A. C., Flaszynska, J., Onur, M., ... Nehls, T. (2021). Closing Water Cycles in the Built Environment through Nature-Based Solutions: The Contribution of Vertical Greening Systems and Green Roofs. *Water*, 13(16), 2165. <https://doi.org/10.3390/w13162165>
- Pérez-Urrestarazu, L., Egea, G., Franco-Salas, A., & Fernández-Cañero, R. (2014). Irrigation Systems Evaluation for Living Walls. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(4), 04013024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000702](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000702)
- Prenner, F., Pucher, B., Zluwa, I., Pitha, U., & Langergraber, G. (2021). Rainwater Use for Vertical Greenery Systems: Development of a Conceptual Model for a Better Understanding of Processes and Influencing Factors. *Water*, 13(13), 1860. <https://doi.org/10.3390/w13131860>
- Prodanovic, V., Hatt, B., McCarthy, D., & Deletic, A. (2020). Green wall height and design optimisation for effective greywater pollution treatment and reuse. *Journal of Environmental Management*, 261, 110173. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110173>
- Prodanovic, V., McCarthy, D., Hatt, B., & Deletic, A. (2019). Designing green walls for greywater treatment: The role of plants and operational factors on nutrient removal. *Ecological Engineering*, 130, 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.02.019>
- Pucher, B., Riberio, G., Langergraber, G., Zluwa, I., Sprörl, P., & Pitha, U. (2020). Entwicklung eines multifunktionalen Living-Wall-Systems zur Reinigung und Nutzung von Grauwasser. *Wasser Und Abfall*, 7-8/2020.
- Pucher B., Zluwa, I., Spörl, P., Pitha, U., Langergraber, G. (2022). Evaluation of the multifunctionality of a vertical greening system using different irrigation strategies on cooling, plant development and greywater use. *Science of the total environment*, in review.
- Raimondi, A., Marchioni, M., Sanfilippo, U., & Becciu, G. (2021). Vegetation Survival in Green Roofs without Irrigation. *Water*, 13(2), 136. <https://doi.org/10.3390/w13020136>
- Stelzl, A., Pointl, M., & Fuchs-Hanusch, D. (2021). Estimating Future Peak Water Demand with a Regression Model Considering Climate Indices. *Water*, 13(14), 1912. <https://doi.org/10.3390/w13141912>
- Šuklje, T., Medved, S., & Arkar, C. (2016). On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. *Energy*, 115, 1055–1068. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.095>
- Tamang, A., & Shukla, S. (2019). Water Demand Prediction Using Support Vector Machine Regression. 2019 International Conference on Data Science and Communication (IconDSC), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IconDSC.2019.8816969>
- Vicedo-Cabrera, A. M., Scovronick, N., Sera, F., Royé, D., Schneider, R., Tobias, A., Astrom, C., Guo, Y., Honda, Y., Hondula, D. M., Abrutzky, R., Tong, S., Coelho, M. de S. Z. S., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Correa, P. M., Ortega, N. V., Kan, H., Osorio, S., ... Gasparrini, A. (2021). The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature Climate Change*, 11(6), 492–500. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x>