

# **Drohnen und Robotik für effizientes Monitoring und Pflegemanagement von Gebäudebegrünungen**

DRoB

M. Immitzer, M. Gräf,  
T. Heitzlhofer, S. Lederbauer,  
M. Kampen, P. Minixhofer, V. Enzi,  
C. Atzberger, E. Gruchmann-Bernau,  
S. Formanek, J. Kisser, T. Matic,  
L. Lorenz, V. Reinberg, R. Stangl,  
A. Wahringer, S. Watzke

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**40/2020**

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe  
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

### **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in  
dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik  
Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:  
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

# Drohnen und Robotik für effizientes Monitoring und Pflegemanagement von Gebäudebegrünungen

DRoB

Univ.-Prof. Dr. Clement Atzberger, DI Michael Gräf,  
DI Dr. Markus Immitzer MSc, Max Kampen MSc, DI Pia Minixhofer,  
Univ.-Prof. DI Dr. Rosemarie Stangl  
Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)

DI Stefan Lederbauer  
LEHI-Copters KG

DI Vera Enzi, DI Susanne Formanek, Tijana Matic Bsc,  
DI Elisabeth Gruchmann-Bernau  
GRÜNSTATTGRAU Forschungs- und Innovations-GmbH

Mag. Theresa Heitzlhofer, DI Johannes Kisser, DI Linus Lorenz,  
Mag. DI Veronika Reinberg, Alexander Wahringer, Stefan Watzke  
alchemia-nova

Wien, März 2020

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## **Vorbemerkung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). 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 von allen betroffenen Bereichen 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 BMK publiziert und elektronisch über die Plattform [www.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



# Inhaltsverzeichnis

---

Kurzfassung .....	7
Abstract .....	9
1. Ausgangslage .....	11
2. Projektinhalt .....	15
2.1. Literaturrecherche und Datenerhebung zur Pflege von Fassadenbegrünungen .....	15
2.2. Untersuchung unterschiedlicher Sensorik zur Evaluierung des Vegetationszustandes .....	16
2.2.1. Evaluierung unterschiedlicher Fernerkundungssensoren - Trockenstressversuch Glashaus 16	
2.2.2. Schätzung der Blattmasse mittels Multispektraldaten – Blattschnittversuch .....	20
2.2.3. Datenerhebung durch Befliegung mittels Drohnen .....	21
2.3. Robotik .....	24
2.3.1. Trends und Ansätze .....	24
2.3.2. Erarbeitung der technischen Anforderungen an einen Roboter .....	24
2.3.3. Kategorisierung von Maßnahmen, Technologien und grünen Infrastrukturen .....	24
2.3.4. Erstellung einer technischen Zeichnung eines möglichen Pflegeroboters .....	25
2.4. Monitoring- und Pflegeszenarien mittels Drohnen und Robotik .....	25
2.4.1. Einsatzszenarien von Drohnen und Robotik .....	25
2.4.2. Akzeptanzerhebung bezüglich des Einsatzes von Drohnen und Robotik .....	25
3. Ergebnisse .....	26
3.1. Monitoring und Pflege von Fassadenbegrünungen – Bedarf & Kosten .....	26
3.1.1. Problemanalyse: Folgen von nicht durchgeführter Pflege .....	26
3.1.2. Bodengebundene Begrünung .....	26
3.1.3. Fassadengebundene Begrünung .....	27
3.1.4. Regelwerke und Stand der Technik .....	28
3.1.5. Angaben und Maßzahlen zur Pflege von Fassadenbegrünung .....	31
3.1.6. Erhebung der Pflegekosten von bestehenden Fassadenbegrünungen .....	32
3.1.7. Ermittlung der Unterhaltspflege einer bodengebundenen Begrünung .....	33
3.1.8. Marktanalyse zum Thema Pflege von Vertikalbegrünungen .....	35
3.1.9. Umfrageergebnisse des Green Market Reports (GMR) .....	36
3.1.10. Fördermaßnahmen der Städte in Bezug auf Fassadenbegrünung .....	38
3.2. Monitoring von Vegetation mittels unterschiedlicher Drohnensensorik .....	39
3.2.1. Vitalitätsmonitoring im Zuge des Trockenstressversuches im Glashaus .....	39

3.2.2.	Erfassung der Blattfläche im Zuge des Blattschnittversuches.....	47
3.2.3.	Einsatz von Drohnen für die Erfassung der Vegetation an Grünfassaden .....	48
3.3.	Pflege mittels Robotik .....	56
3.3.1.	Trends und Ansätze im Bereich Gebäuderobotik.....	56
3.3.2.	Technische Anforderungen an den Roboter zum Einsatz an Grünfassaden .....	60
3.3.3.	Kategorisierung von Maßnahmen, Technologien und grünen Infrastrukturen:.....	61
3.4.	Monitoring & Pflege von Fassadenbegrünungen mittels Drohne und Robotik .....	62
3.4.1.	Monitoringszenario für den Einsatz von Drohnen .....	62
3.4.2.	Pflegeszenarios für den Einsatz von Robotik.....	63
3.4.3.	Akzeptanz für den Einsatz von Drohnen und Robotik allgemein und speziell im Bereich Gebäudebegrünung.....	64
4.	Schlussfolgerungen.....	68
4.1.	Drohnen und Sensorik für das Monitoring von Gebäudebegrünung.....	68
4.2.	Robotik für die Pflege von Gebäudebegrünung .....	70
4.3.	Marktpotenzial und Status-Quo im Bereich Pflege und Monitoring von Gebäudebegrünung	72
5.	Ausblick und Empfehlungen.....	73
6.	Verzeichnisse.....	75
6.1.	Abbildungsverzeichnis.....	75
6.2.	Tabellenverzeichnis .....	77
6.3.	Literaturverzeichnis.....	78

## Kurzfassung

Grüne Infrastruktur wird in der zeitgemäßen Stadtplanung immer wichtiger. Die damit verbundene Zunahme von Gebäudebegrünungen bzw. begrünten Fassadenflächen erfordert auch klare Rahmenbedingungen bezüglich der Wartung und Pflege. Eine seit langer Zeit bekannte Aufgabenstellung stellt zum Beispiel das Eindämmen des Wuchses von selbstklimmenden Pflanzen an vertikalen Flächen dar. Der Einsatz von kosteneffizienten Methoden, so auch der Einsatz von Drohnen und/oder Robotern, für die Begutachtung und Pflege hat diesbezüglich großes Potenzial. Methoden und Anwendungsbereiche aus anderen Fachdisziplinen zeigen bereits verfügbare technische Möglichkeiten auf, sind aber für die Anwendung im Bereich der Gebäudebegrünung zu adaptieren. Ein Roboter zur Pflege begrünter Fassaden geht derzeit noch über den Stand der Technik hinaus. Die Bilderkennung von Pflanzen und eine robotische Reaktion, wie z.B. der Rückschnitt von Jungtrieben, ist innovativ und prinzipiell auch machbar.

Die Ziele des vorliegenden Projektes umfassen: (1) Analyse des aktuellen Marktes sowie die Erhebung der Kosten für Monitoring und Pflege von Gebäudebegrünung, (2) Evaluierung unterschiedlicher Fernerkundungssensoren für vegetations- und pflegerelevante Fragestellungen, (3) Untersuchung des Einsatzes von Drohnen als neue und innovative Methode für das Monitoring von Gebäudebegrünungen, (4) Erhebung des Potentials von Robotik für die Pflege von Gebäudebegrünung, (5) Konzeptionierung eines schienengeführten Schneidroboters zur Pflege von selbstklimmenden Pflanzen, (6) Erhebung der Akzeptanz des Einsatzes von Drohnen und Robotik für Anwendungen im Bereich Gebäudebegrünung.

Der wachsende Markt in der Fassadenbegrünung ergibt in Summe ein höheres Pflegevolumen. Um diesen Trend weiterzuverfolgen, müssen die Akzeptanz für Pflege- und Monitoringmaßnahmen erhöht und die Kosten dafür so effizient wie möglich gestaltet werden. Bei der Pflege von Fassadenbegrünungen ist darauf zu achten, dass spezialisierte und qualifizierte Unternehmen für die Pflege eingesetzt werden. Es ist daher künftig von einer Spezialisierung der Betriebe auszugehen, wodurch auch die Akzeptanz und Notwendigkeit für effizientere Arbeitsvorgänge, z.B. durch den Einsatz von Robotern und Drohnen, steigen wird. Des Weiteren zeigt sich, dass sich resiliente und wartungsarme Begrünungsformen durchsetzen und die Verbreitung von Gebäudebegrünungen vorantreiben.

Die Sensorevaluierung umfasste RGB-, Multispektral- und Thermalkameras und zeigte, dass mehrere relevante Parameter zur Evaluierung des Pflanzenzustandes erfassbar sind. So wurden Vegetationsdeckungsgrad, 3D-Modellierungen der Pflanzen, aber auch Vitalitätsunterschiede bzw. Wasserstress erhoben. Bei der Umlegung der unter Laborbedingungen durchgeführten Sensorevaluierungen müssen zusätzliche Herausforderung bei der Datenaufnahme mittels Drohnen berücksichtigt werden. Die Versuche zeigten, dass die genaue Planung einer Befliegung in Abstimmung mit der Ausrichtung der Fassaden sowie den Sonnenstand erfolgen muss. Neben der Ableitung der relevanten Parameter stellen Bilddaten objektive Unterlagen für eine nachvollziehbare Dokumentation dar. Eine Drohnenbefliegung wird dann sinnvoll sein, wenn diese für die Erfassung der gesamten Begrünung unumgänglich ist, also z.B. bei höheren Gebäuden bzw. Gründächern. Der weitere Forschungsbedarf im Bereich Sensorik und Drohneneinsatz für das Monitoring von Gebäudebegrünung wird in der weiteren Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten mit Fokus auf die wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten gesehen. Die Aufnahme von Bilddaten zur Erfassung des

Deckungsgrades auf Gründächern und Vertikalbegrünungen könnte auch die laufende Fernüberwachung durch Pflegebeauftragte maßgeblich unterstützen.

Eine automatisierte Pflege muss auf die Vielzahl an verwendeten Begrünungssystemen zugeschnitten sein, weshalb die Konzeptionierung eines Roboters herausfordernd ist. Die datenbasierte Verortbarkeit am Gebäude würde die digitale Dokumentation für Mängelbehebungen, Wartung und Inspektion erlauben, da sowohl Schadensfeststellung als auch der Pflege- und Wartungsbedarf nachvollziehbarer wären. Im vorliegenden Projekt wurde ein schienengeführter Schneideroboter zur Pflege von selbstklimmenden Pflanzen konzeptioniert. Für die Führung des Roboters könnte die bereits in Verwendung befindliche Überwuchsleiste herangezogen werden. Für andere Anwendungen bzw. Pflegeeingriffe auf der gesamten Fläche sind für die sichere Fortbewegung weitere Sensoren bzw. Schienen oder Seile notwendig. Das zukünftige Ziel ist die Entwicklung eines Roboters, welcher zwischen den Arten, dem Wachstum, der Positionierung, dem Zustand und den Pflegebedürfnissen der Pflanzen unterscheidet und den Pflegeeingriff dementsprechend anpasst. Eine weitere Empfehlung ist, den Bereich Robotereinsatz auch auf die Dachbegrünung, speziell in Kombinationsbauweise mit Photovoltaikanlagen, auszuweiten (Rückschnitt, Nährstoffgabe, Kontrolltätigkeiten). Das Projektteam wird mit den gewonnenen Daten weitere Forschung in Richtung professioneller Serviceroboter für die automatisierte Pflege von begrünten Wänden betreiben. Schwerpunkte werden die Applikation auf möglichst viele verschiedene Begrünungssysteme sein, sowie die Datenverwaltung mithilfe von Clouds und selbstlernenden Algorithmen.

Die Erhebungen zur Fassadenbegrünung zeigen, dass die Akzeptanz für den Einsatz von Robotern und Drohnen in der derzeitigen Pflegebranche noch gering ist. Jedoch ergibt sich aufgrund des generell wachsenden Marktes in der Fassadenbegrünung in Zukunft auch mehr Pflegevolumen, weshalb künftig von einer Spezialisierung der Betriebe auszugehen ist. Dies wird auch die Akzeptanz und Notwendigkeit für effizientere Arbeitsvorgänge, z.B. durch den Einsatz von Robotern und Drohnen, steigern.

## Abstract

Green infrastructure is increasingly appreciated in contemporary urban planning. The associated increase in green roofs and green façades requires clear framework conditions concerning maintenance and care. One of the long-standing tasks is the reduction of the growth of climbing plants on vertical surfaces. The use of cost-effective methods for assessment and maintenance, including the use of drones and/or robots, represents great potential. Methods and areas of application from other specialist disciplines already show available technical possibilities but must be adapted for use in this purpose. A robot for maintaining green facades currently goes beyond the state of the art. The image recognition of plants and a robotic reaction such as pruning young shoots are innovative and in principle also feasible.

The objectives of the present project include (1) analysis of the current market and collection of costs for monitoring and maintenance of green façades, (2) evaluation of different remote sensing sensors for issues relevant to vegetation and care, (3) investigation of the use of drones as a new and innovative method for monitoring greening of buildings, (4) assessment of the potential of robotics for the care of green façades and roofs, (5) designing rail-guided cutting robots for the care of climbing plants, (6) assessing the acceptance of the use of drones and robotics for monitoring and maintenance of green façades and roofs.

The growing market for green facades results in a higher maintenance volume overall. In order to continue this trend, acceptance for care and monitoring measures must be increased and the costs for this must be made as efficient as possible. When maintaining green facades, care must be taken to ensure that specialized and qualified companies are used for maintenance. Therefore, companies will likely specialize in the future, which will also increase the acceptance and necessity for more efficient work processes, e.g. through the use of robots and drones. Furthermore, it shows that resilient and low-maintenance forms of greenery are gaining ground and driving the dissemination of greening in buildings.

The sensor evaluation included RGB, multispectral and thermal cameras and showed that several relevant parameters for evaluating the plant condition can be collected. The vegetation coverage, 3D-modelling of the plants, but also vitality changes and water stress were surveyed. The data transfer of the sensor evaluation carried out under laboratory conditions is made more difficult by additional challenges in data acquisition using drones. The tests showed that the precise planning of an aerial survey in coordination with the orientation of the façades and the position of the sun is essential. In addition to the derivation of the relevant parameters, data images represent objective records for comprehensible documentation. Drone flights will be useful if it is essential to record the entire greenery, e.g. for higher buildings or green roofs. The further research need in the field of sensors and drones for the monitoring of green façades and roofs is seen in the evaluation of the possible uses with a focus on the economic utilization options. The inclusion of image data to record the degree of coverage on green roofs and vertical green roofs could also provide significant support for ongoing remote monitoring by care officers.

Automated maintenance must be tailored to a large number of greening systems used, which is why the design of a robot is challenging. The data-based location on the building would allow digital documentation for defect rectification, maintenance and inspection, since both damage detection and the care and maintenance requirements would be more comprehensible. In this project, a rail-guided

cutting robot was designed for the care of climbing plants. The overgrowth bar already in use could be used to guide the robot. For other applications or care interventions on the entire area, additional sensors and rails or ropes are necessary for safe movement. The future goal is the development of a robot that differentiates between species, growth, positioning, condition and care needs of the plants and adjusts the care intervention accordingly. Another recommendation is to expand the area of robot use to include green roofs, especially in combination with photovoltaic systems (pruning, nutrient supply, control activities). The project team will use the data obtained to carry out further research in the direction of professional service robots for the automated maintenance of green walls. The focus will be on the application on as many different greening systems as possible, as well as data management using clouds and self-learning algorithms.

The surveys on green facades clearly show that acceptance for the use of robots and drones in the current care industry is still low. However, due to the generally growing market for green facades, there will also be more maintenance volume in the future and companies are more likely to specialize. This will also increase the acceptance and need for more efficient operations, e.g. through the use of robots and drones.

# 1. Ausgangslage

Mit immer günstiger werdenden Drohnen, steigenden Absatzzahlen im Handel sowie einer wachsenden Anzahl an Einsatzmöglichkeiten haben sich sowohl im täglichen Sprachgebrauch wie auch in der Literatur unterschiedliche Begriffe etabliert. Neben dem sehr populären Begriff „Drohne“ existiert eine Vielzahl an Begriffen, die das verwendete Fluggerät beschreiben, beziehungsweise definieren sollen. Beispielsweise sind die Begriffe „UAV“ (unmanned aerial vehicle) oder „RPAS“ (remotely piloted aerial vehicle) erwähnt. Im Sinne des österreichischen Luftfahrtgesetzes (LFG, BGBl. Nr. 253/1957) werden Drohnen als „uLFZ“ (unbemannte Luftfahrzeuge) definiert. Auch die technische Entwicklung von Drohnen schreitet derzeit rasant voran und es werden laufend neue Anwendungsfelder erschlossen (Feng et al., 2015; Kampen et al., 2019; Kaneko und Nohara, 2014). Die unterschiedlichsten Flugmodelle werden unter anderem für die Aufnahme von hochauflösenden Bildern, zur Erstellung von detaillierten 3D-Modellen und zur Inspektion von Bauwerken im Bereich Architektur und Bautechnik verwendet. Ebenso nehmen die Einsatzmöglichkeiten derartiger Systeme für die Beurteilung von Vegetation vor allem im land- und forstwirtschaftlichen Bereich zu. Bezüglich der Beurteilung von Bauwerksbegrünungen sind hingegen aktuell nur sehr wenige Studien (z.B.: Ampatzidis et al., 2017; Bulgakov et al., 2015) verfügbar bzw. beziehen sich nur auf wenige Teilaspekte oder auf handelsübliche Sensorik. Allerdings besteht gerade bei Grünfassaden ein großer Bedarf nach neuen Instrumenten und Methoden zur Unterstützung von Planungsschritten und Steuerung von Pflege- und Erhaltungsmaßnahmen. Der Einsatz von Drohnen kann bei der Erhebung von gestalterischen, technischen und botanischen Kriterien unterstützen.

Methoden und Anwendungsbereiche aus anderen Fachdisziplinen zeigen bereits heute verfügbare technische Möglichkeiten auf, sind für die Anwendung in der Gebäudebegrünung aber zu adaptieren. Es kann mit Hilfe von multi- bis hyperspektralen Kameras die Entwicklung einzelner Pflanzenarten (z.B. oberirdische Biomasse, Pflanzengesundheit) sowie die Wasserversorgung der Pflanzen beobachtet werden. Allerdings fehlen dazu entsprechende Vorarbeiten zur Eignung der Sensoren, Bildinterpretation und Übertragbarkeit auf Pflegemaßnahmen. Dabei stellt neben der geeigneten Sensorik für die in der Bauwerksbegrünung verwendeten Pflanzen auch die Geometrie der Aufnahmen (Ausrichtung von Fassaden, seitliche Betrachtung der Pflanzen, usw.) eine große Herausforderung dar.

Neben der technischen und methodischen Entwicklung von Drohnenanwendung in der Vegetationstechnik sind auch die rechtlichen Rahmenbedingungen zu klären. In Österreich werden die gesetzlichen Grundlagen für Luftaufnahmen mit einem unbemannten Luftfahrzeug im Paragraph 24c ff Luftfahrtgesetz festgelegt und durch die Luftfahrtbehörde Austro Control umgesetzt. Darin ist geregelt, dass bei jeder privaten oder gewerblichen Nutzung von unbemannten, ferngelenkten und mit einer Kamera ausgestatteten Fluggeräten luftverkehrsrechtliche Vorgaben, Datenschutz- und Urheberrechte beachtet werden müssen. Je nach Art des Einsatzgebietes und Kategorie der Drohne werden unterschiedliche Anforderungen an den Piloten/ die Pilotin und sicherheitstechnische Voraussetzungen an das Luftfahrzeug gestellt, damit eine Bewilligung erfolgen kann.

Das Projektvorhaben bewegt sich in urbanen Räumen und dicht verbauten Gebäudebeständen, also in höchst sensiblen Gebieten für den Einsatz von Drohnen. In DRoB wurden daher je nach Einsatzort Drohnen unterschiedlicher Klassen verwendet. Einerseits werden dabei als „Spielzeug“ klassifizierte Drohnen (Bewegungsenergie < 79 Joule) und andererseits Drohnen der Klasse 1, Kategorie C III mit Einzelbewilligung für dicht besiedelte Gebiete eingesetzt. Die Optimierung des Sensoreinsatzes und

einer folglich geringen Traglast wird als Lösungsansatz für die rechtlich hohen Anforderungen des Drohneneinsatzes im urbanen Raum verfolgt.

Die Pflege und Wartung sowie das Eindämmen des selbsttätigen Wachses von selbstklimmenden Pflanzen an vertikalen Flächen ist eine überaus breite und seit langer Zeit bekannte Aufgabenstellung im Bereich Gebäudebegrünung. Die vielfältig vorhandenen Bestände an wildem Wein und Efeu in österreichischen Städten sind zum Teil über 80 Jahre alt. Auch heute noch erfreut sich diese Art der Vertikalbegrünung vielfältiger Umsetzungen und hoher Beliebtheit, stellt sie bei vorhandenem Bodenangebot in der Nähe der zu bewachsenden Fläche oder durch das einfache Aufstellen von großvolumigen Trögen eine äußerst kostengünstige Form der Begrünung mit großer ökologischer Auswirkung dar (Wiener Umweltschutzabteilung und ÖkoKauf Wien 2019). Ein klassisches Beispiel ist etwa die Begrünung von Feuermauern. Der Pflegeaufwand der Begrünungen kann jedoch über die Jahre steigen. Speziell der immergrüne Efeu erfordert neben dem Verhindern des Überwachsens auf nicht erwünschte Gebäudeteile regelmäßigen Rückschnitt und ein Auslichten von Blatt- und Biomasse an der Fassade, da sonst folgende Schäden zu erwarten sind:

- Herabstürzen der Pflanze durch Eigengewicht bei ungünstiger Wetterlage oder auch nach einer zu spät angesetzten Pflege (siehe Fall in Graz im Herbst 2017, Der Standard 2017);
- Akkumulation von abgestorbenen Pflanzenteilen (Gefahr bei immergrünen Pflanzen) direkt am Bestandsmauerwerk, dadurch fehlende Belüftung und Feuchteschäden am Gebäude;
- Unterwachsen und Aufsprengen von Gebäudeteilen durch Dickenwachstum von Haftwurzeln des Efeus und dadurch Beschädigung des Gebäudes selbst.

Andere laubabwerfende, selbstklimmende Arten wie beispielsweise der Wilde Wein oder auch Veitchii (*Parthenocissus tricuspidata*) verursachen äußerst selten bis nie tatsächliche bauliche Schäden am Gebäude, wie sie oben beschrieben sind. Die Pflanzen werfen einmal pro Jahr das Laub ab, sind daher stets gut durchlüftet, unterschreiten das Holzgewicht von Efeu drastisch und wachsen auch durch ihr dem Licht zugewandtes Wachstum nicht in Ritzen und Spalten ein und sprengen diese so auch nicht auf. Die Kletterpflanzen tragen zur Lebensdauererlängerung der Fassaden bei. In Österreich findet man beispielsweise viele Feuermauern (schlechter Bauqualität) der Nachkriegszeit begrünt in bestem Zustand, während die frei bewitterten Referenzwände bereits vor Jahrzehntem saniert werden mussten (Verband für Bauwerksbegrünung, Expert\*innen-Meinungen resultierend aus Gutachten, Projektbegleitungen und Bachelorarbeiten). Trotzdem kann auch ungepflegter Wilder Wein nach vielen Jahren eventuell aufgrund seines Eigengewichts nicht mehr an der Fassade haften und ein statisches Risiko darstellen. Zudem ist das Übergreifen auf Nachbargebäude, Fassaden mit Fenstern sowie Dachstühlen zumeist auch nicht gewünscht und stellt nach der fachgerechten Entfernung durch die Rückstände der Haftscheiben am Putz einen optischen Schaden dar.

Das Bewusstsein für die Notwendigkeit sowie verfügbares Budget der Hauseigentümer\*innen für die Pflege- und Kontrollnotwendigkeiten der Kletterpflanzen kann je Objekt sehr verschieden ausfallen. Tendenziell ist jedoch bei einem vergleichsweise niedrigen Anschaffungspreis für die Begrünung auch von einer geringen Akzeptanz und Budgetvorstellung für Pflegearbeiten auszugehen. So werden viele Kletterpflanzenbegrünungen mangelhaft oder auch überhaupt nicht gepflegt. Der Einsatz von kostenintensiven Methoden, so auch der Einsatz von Drohnen und/oder Robotern für Begutachtung und Pflege stellt daher ein großes Potenzial dar, insbesondere da eine Zunahme von Gebäudebegrünungen bzw. von begrünten Fassadenflächen zu erwarten ist.

Das unerwünschte Ausbreiten des Bewuchses am Gebäude kann durch den Einsatz von Überwuchsleisten zeitlich verzögert oder in manchen Fällen fast vollständig eingedämmt werden. Bereits 2016 startete die Stadt Wien, Magistratsabteilung 22 gemeinsam mit dem Verband für Bauwerksbegrünung in ein über den State-of-the-Art hinausgehendes Projekt zur Entwicklung einer Überwuchsleiste für selbstklimmende Kletterpflanzen (MA 22 – Wiener Umweltschutzabteilung 2019). Im Zuge dieses Projekts wurde anhand der Auswertung von nationalen und internationalen Beispielen eine Überwuchsleiste für selbstklimmende Kletterpflanzen technisch detailliert. Während der Projektvorbereitung wurde festgestellt, dass manchmal bereits geringe, bauseitig vorhandene Kanten in speziellen Umsetzungsformen eine Barriere für die Kletterpflanzen darstellen können. Daraus wurde eine Überwuchsleiste entwickelt, die keine weiteren Hilfsmittel benötigt und den jungen Trieb zum Umkehren leitet. Andere Ansätze, wie etwa das Einleiten von Strom in Schienen oder Drähten, wodurch junge Triebe verbrannt und somit ihr Wachstum eingedämmt werden, sind aufgrund der strengen Brandschutzbestimmungen in Österreich nicht anwendbar (MA 22 – Wiener Umweltschutzabteilung 2019).

Nach dem bisherigen Stand der Technik werden Monitoring und Pflegemaßnahmen manuell getätigt, diese könnten zur Gänze bzw. teilweise durch maschinelle Pflege ersetzt werden. Dadurch kann einerseits Kosteneffizienz erreicht werden, andererseits wäre durch die permanente Anwesenheit des Pflegeroboters an der Fassade eine Pflege in kurzen Abständen gewährleistet, vierteljährliche „Großeinsätze“ können damit entfallen.

Es ergibt sich nun die Notwendigkeit, über automatisierte Schneidroboter nachzudenken, welche in der Lage sind, junge Triebe entlang von Überwuchssperren ein- oder mehrmals pro Jahr zu begrenzen. Wenn Pflegeroboter in weiterer Zukunft nicht nur entlang einer vorhandenen Schiene schneiden können (Inhalt der Sondierung DRoB), sondern an der ganzen Wand bewegbar sind und auch Biomasseentfernung durchführen können, so wird sich die Pflege begrünter Fassaden mit Sicherheit zu einer kostenintensiven und angesehenen Tätigkeit mit hoher Akzeptanz entwickeln können.

In Bezug auf gesteuerte Pflegeautomatik sind derzeit Gartenroboter State-of-the-Art, die in horizontaler Ebene Rasen trimmen und Sträucher schneiden, bzw. Gebäuderoboter, die Fassaden und Fenster reinigen. Zur Orientierung sind sie mittels GNSS-Systeme ausgestattet oder die Flächen in der Ebene mit speziellen Zäunen umgeben. Ein Roboter zur Pflege begrünter Fassaden geht derzeit noch über den Stand der Technik hinaus. Die Bilderkennung von Pflanzen und eine robotische Reaktion (automatisches Unkrautjäten bzw. Rückschnitt von Jungtrieben) sind innovativ, da die Erkennung auf Ebene einer einzelnen Pflanze bzw. eines Triebes derzeit Neuland ist.

Neben dem Stand des Wissens und der Technik in Bezug auf Robotik für die Pflege von begrünter Wänden werden auch Trends und Ansätze genauer beschrieben. Allgemein kann dargestellt werden, dass es für begrünte Wände keine marktreifen Entwicklungen in diesem Bereich gibt. Vom Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (2018a, 2018b) in Stuttgart gibt es zwei Konzeptstudien, die aber noch nicht umgesetzt wurden. Es gibt einige Roboter, die im vertikalen Bereich eingesetzt werden können, allerdings für die Reinigung und Inspektion/Wartung von Fassaden. Im horizontalen Agrarbereich dagegen gibt es eine starke Entwicklung in Richtung Digitalisierung der Landwirtschaft (datengestützter Ackerbau, Automatisierungsfunktionen, Einsatz von Software, Robotik und Internet of Things; siehe z.B. die Website des Ländlichen Fortbildungsinstitutes Österreich (Ländliches Fortbildungsinstitut 2018), sowie die Wissensplattform LK Digital, die als Teil der LFI-

Bildungskampagne „Digitalisierung in der Land- und Forstwirtschaft“ einen Überblick über Entwicklungen in Österreich rund um Landwirtschaft 4.0, Smart Farming & Co gibt.

DROB stellt einen Wissensgewinn in Bezug auf die Verwendung von verschiedenen Sensoren zur raumspezifischen Einschätzung des Zustandes von Pflanzen, Pflanzenteilen und ganzen Vegetationsbeständen hinsichtlich Trockenstress, Schäden, Schwachstellen oder Schwierigkeiten auch an Bauwerkselementen sowie den nötigen orts- und zielgerichteten Pflege- und Wartungsbedarf dar. Die präzise Verortung der am Gebäude erhobenen Daten erlaubt die digitale Dokumentation für Mängelbehebungen, Wartung und Inspektion. Damit werden Schadensfeststellung als auch Pflege- und Wartungsbedarf nachvollziehbarer für Eigentümer\*innen, Auftraggeber\*innen, Unternehmen und die gesamte Pflegekette.

Derzeit werden erste Dachsysteme als BIM-fähige (Building Information Modeling - Bauwerksdatenmodellierung) Objekte in die digitale Bauwerksdatenbank aufgenommen. Neben der technischen Infrastruktur wäre auch die Integration der Pflanzen denkbar. Daher soll im Zuge von DROB evaluiert werden, ob eine spätere BIM-Integration der erhobenen Daten möglich ist.

Im Zuge des Projektes DROB wurden folgende Forschungsfragen bearbeitet:

- Wie erfolgt derzeit das Monitoring sowie die Pflege von Gebäudebegrünung und wie entwickelt sich der diesbezügliche Markt?
- Welche Fernerkundungssensoren eignen sich zum drohnengestützten Monitoring von Gebäudebegrünungen?
- Welche Aspekte müssen bei der Datenaufnahme von begrünten Gebäuden mittels Drohnenbefliegung berücksichtigt werden?
- Welche Fähigkeiten werden an einen Pflegeroboter in der Fassadenbegrünung gestellt und wie könnte ein Prototyp für die Pflege aussehen?
- Wie hoch ist die Akzeptanz von Drohnen und Robotik für Monitoring und Pflege von Gebäudebegrünung?

Bei der Durchführung dieser Sondierungsstudie wurde der Schwerpunkt auf Fassadenbegrünungen gelegt, da diese bezüglich des Einsatzes von Drohnen und Robotik größere Herausforderungen als Dachbegrünungen darstellen.

## 2. Projektinhalt

### 2.1. Literaturrecherche und Datenerhebung zur Pflege von Fassadenbegrünungen

Über die positiven Auswirkungen von Fassadenbegrünungen, wie zum Beispiel den kühlenden Effekten durch Beschattung und Verdunstung, Dämmung des Gebäudes, Reduktion der Innenraumtemperatur an Hitzetagen und der Minderung der Lärmbelastung im Gebäudeinneren, gibt es mittlerweile schon einen breiten Informationsstand und eine Fülle an Forschungsergebnissen (et al. 2016; Perini et al. 2011a; van Renterghem et al. 2013; Pfoser et al. 2013). Somit stehen die Sinnhaftigkeit und Potenziale von vertikalen Begrünungsmaßnahmen und ihrem Einfluss für eine nachhaltige Stadtentwicklung außer Zweifel. Mit den Chancen und Potenzialen, welche mit der Erstellung neuer Fassadenbegrünungen entstehen, gehen jedoch auch neue Herausforderungen und Anforderungen einher. Zu diesen zählen der Wasserverbrauch, die Ökobilanzrechnung einzelner Systeme sowie die Pflege und Instandhaltung der Fassadenbegrünungen (Riley 2017). Diese Herausforderungen müssen gemeistert werden, um das langfristige und nachhaltige Betreiben dieser Anlagen für die Zukunft gewährleisten zu können. So wie jede andere Grünfläche unterliegen auch die Fassadenbegrünungen den Jahreszeiten und Vegetationsperioden, deshalb entstehen in ihrer Erhaltung regelmäßige und oft sehr unterschiedliche Pflegeaufgaben. Der Fokus dieses Arbeitspakets liegt auf der Pflege und dem Monitoring von verschiedenen Fassadenbegrünungssystemen und einer ersten Einschätzung, inwiefern der Einsatz von Robotern und Drohnen zukünftig hier eine Rolle spielen könnte.

Ziele des Arbeitspakets:

- Erhebung von Monitoring und Pflegekosten in der Fassadenbegrünung
- Abfrage der Akzeptanz für den Einsatz von robotergesteuerten Systemen
- Erstellung und Validierung eines Pflegeszenarios unter Einsatz von Drohnen und Robotik
- Marktanalyse zum Thema Pflege von Vertikalbegrünungen

Die Erhebung von tatsächlichen Monitoring- und Pflegekosten in der Fassadenbegrünung wurde durch die Bewertung und Evaluierung von bestehenden Beispielobjekten durchgeführt. Diese Werte wurden den Maßzahlen aus Regelwerken der Technik gegenübergestellt und durch Interviews mit Stakeholder\*innen validiert. Des Weiteren wurde die Bereitschaft der Toleranzbereiche für Pflegekosten und für den Einsatz von robotergesteuerten Systemen überprüft, um eine detaillierte Erfassung von bestehenden Pflegemodellen von Fassadenbegrünungen zu erstellen. Zur Ermittlung der tatsächlichen Pflegekosten von Fassadenbegrünungen wurden unterschiedliche Ansätze gewählt:

1. Angaben und Maßzahlen aus der Literatur
2. Erhebungen bei bestehenden Fassadenbegrünungen
3. Angebotseinholung von Pflegefirmen für ein Beispielobjekt

Im Zuge des Projektes Green Market Report (GMR) von GRÜNSTATTGRAU wurde eine an DRoB angepasste Marktanalyse durchgeführt. Die Erhebungen für die gesamte Marktanalyse waren zu Projektende von DRoB noch nicht abgeschlossen, die Publikation des ersten Austrian Green Market Reports (AGM) ist mit Sommer 2020 geplant. Pflegespezifische Fragen und Bedarfsermittlung als auch Hindernisgründe sowie Potenzialabschätzungen konnten jedoch auf DRoB bezogen abgeleitet und in eine erste Vorabpublikation eingeschränkten Umfangs zusammengefasst werden.

## 2.2. Untersuchung unterschiedlicher Sensorik zur Evaluierung des Vegetationszustandes

Im Zuge der Sensorevaluierungen wurden verschiedene Versuche durchgeführt, um die Eignung von Sensoren für die Erkennung von Stressmerkmalen an der Vegetation, sowie der Ermittlung der Blattmaße und der Vegetationsausrichtung zu untersuchen. Mit den Untersuchungen sollten (1) die geeigneten Sensoren für Monitoringvorhaben von Grünfassaden bzw. Gründächern identifiziert, und (2) geeignete Befliegungsstrategien für derartige Anwendung erarbeitet werden. Da Grünfassaden durch die räumlichen Gegebenheiten, also die senkrechte Anordnung der Pflanzen bei gleichzeitiger sehr variabler Ausrichtung der Wände, die größte Herausforderung darstellen, wurde in diesem Sondierungsprojekt der Fokus auf diese Art der Begrünung gelegt.

### 2.2.1. Evaluierung unterschiedlicher Fernerkundungssensoren - Trockenstressversuch Glashaus

#### (1) Versuchsbeschreibung

Durch unterschiedlich hohe Wasserversorgung wurden Pflanzen gezieltem Wasserstress ausgesetzt, um die Auswirkung auf deren Reflexions- und Emissionsverhalten zu untersuchen. Dazu wurden Pflanzen ausgewählt, welche häufig in der Begrünung von wandgebundenen Systemen Einsatz finden. Diese wurden im Glashaus der Universität für Bodenkultur (BOKU) für zwei Wochen mit einer automatischen Bewässerung ausgestattet und gleichmäßig bewässert. Nach dieser Eingewöhnungsphase wurden die Pflanzen in vier verschiedenen Bewässerungsregimes eingeteilt und für sechs Wochen unterschiedlich bewässert (Tabelle 1). Dazu wurde jeder Pflanztopf einzeln mit druckkompensierten Tropfspießern direkt bewässert.

Pflanzennr.	Bezeichnung	Beschreibung
1-5	Geringe Wasserversorgung	Täglich einmalige Bewässerung (9:00 Uhr) für eine Minute, Gesamtwassermenge von 50 ml.
6-10	Keine Wasserversorgung	Keine Bewässerung
11-15	Optimale Wasserversorgung	täglich zweimalige Bewässerung (9:00 bzw. 18:00 Uhr) für je drei Minuten - Gesamtwassermenge 300 ml.
16-20	Staunässe	Pflanztopf ständig feucht / anstehende Staunässe im Topf.

*Tabelle 1: Beschreibung der vier verschiedenen Bewässerungsgruppen: keine Wasserversorgung, geringe Bewässerung, ideale Bewässerung und Staunässe.*

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Insgesamt wurden die folgenden vier Arten getestet: *Heuchera x cultorum* 'Plum Pudding', *Bergenia cordifolia* 'Eroica', *Geranium sanguineum* 'Tiny Monster' und *Brunnera macrophylla* 'Jack Frost'. Für jede Bewässerungsgruppe standen fünf Individuen pro Art zur Verfügung. Damit bestand der Gesamtstichprobenumfang aus 80 Pflanzen. Die Pflanzen befanden sich in Töpfen mit der Größe P1, was dem Volumen von einem Liter entspricht. Der volumetrische Wassergehalt (VWG) gibt das Wasservolumen bezogen auf das Substratvolumen in Prozent an. Ein VWG von 0,01 bis 0,20 bezeichnet den Bereich des permanenten Welkepunktes, in welchem Wasser im Boden in derart geringen Mengen verfügbar ist, dass Pflanzen zu welken beginnen. Dieser variiert von Bodenart zu Bodenart. Das Substratvolumen war in jedem Topf ein Liter, somit gibt der VWG von 0,5 an, dass im jeweiligen Topf 0,5 l Wasser auf einem Liter Substrat enthalten war.

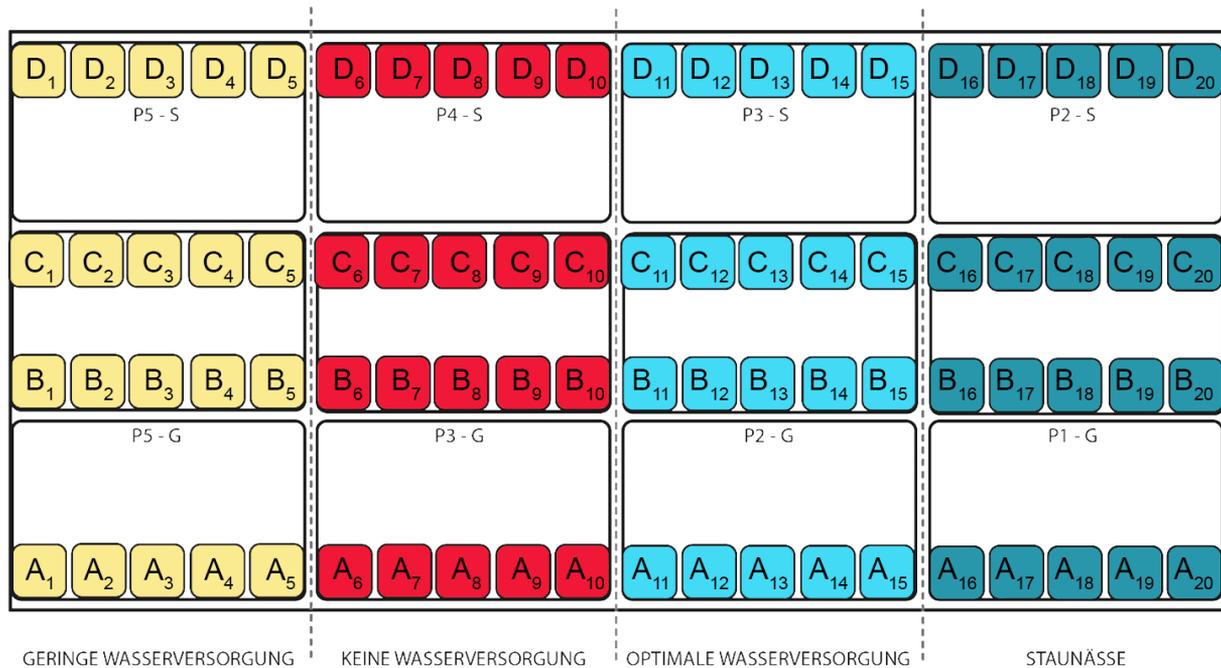


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus von oben. Die Buchstaben A-D stehen für die vier verschiedenen Arten (A: *Brunnera macrophylla*, B: *Geranium sanguineum*, C: *Bergenia cordifolia*, D: *Heuchera x cultorum*), welche durch die gestrichelte Linie in die unterschiedlichen Bewässerungsregime eingeteilt sind. P1 – G bis P5 – S kennzeichnen die Bodenfeuchtesensoren

## (2) Datenaufnahme im Zuge des Trockenstressversuches

Während des Versuchszeitraumes wurden von den Pflanzen bzw. der Umgebungssituation unterschiedliche Parameter erhoben. Je nach Sensortyp erfolgten die Datenaufnahmen kontinuierlich in regelmäßigen Zeitabständen oder sporadisch in Form manueller Messungen sowie punktuell oder großflächig. In der Versuchslaufzeit wurden Daten mit folgenden Sensoren erhoben:

- **RGB-Kamera** (Zeitrafferkamera der Firma Brinno) – kontinuierliche Datenaufnahme des gesamten Versuchsaufbaues (in räumlicher Hinsicht)
- **Thermalkamera** (Vue Pro der Firma FLIR) – kontinuierliche Datenaufnahme des zentralen Teils und sporadische Aufnahmen des gesamten Versuchsaufbaues
- 6-Kanal **Multispektralkamera** (Airphen der Firma hi-phen) – sporadische Aufnahmen des zentralen Teils und des gesamten Versuchsaufbaues
- **Spektroradiometer** (PSR-2500 der Firma Spectral evolution) – sporadische Messungen einzelner fix ausgewählter Blätter jeder Pflanze
- **Porometer** (AP4-Pormeter der Firma UP GmbH) – sporadische Messungen einzelner Blätter
- **Bodenfeuchtesensoren** (ECH2O 5TM der Firma MeterGroup) – kontinuierliche Messung in einzelnen Pflanzentöpfen
- **Temperaturfühler** – kontinuierliche Messung der Lufttemperatur und der Temperatur in einzelnen Pflanzentöpfen
- **Strahlungsmesser** (QSO-S PAR sensor der Firma Apogee Instruments) – kontinuierliche Messungen

In Abbildung 2 ist der Versuchsaufbau mit der Positionierung der Sensoren dargestellt. Die RGB, Thermal- und Multispektralkamera wurden über den Pflanzen montiert. Um die Pflanzen möglichst vollflächig zu erheben, wurden die Sensoren direkt unter das Glashausedach montiert. Der Abstand zwischen Sensoren und Pflanzen bestand 1,5 m. Bedingt durch die unterschiedlichen Sichtfelder der Kameras war bei der Thermal- und der Multispektralkamera jedoch nur die Erfassung der in der Mitte angebrachten Pflanzenreihen (keine und optimale Wasserversorgung) möglich.

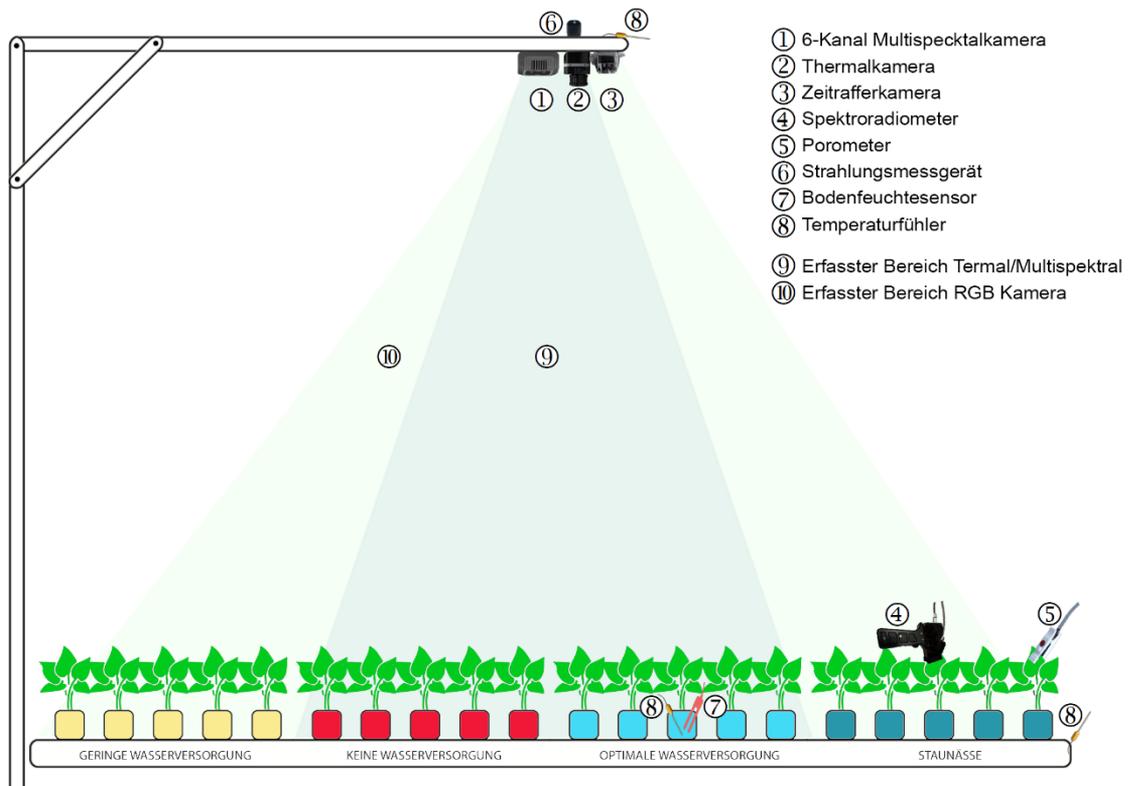


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Sensorerhebung des Trockenstressversuchs im Glashaus der Universität für Bodenkultur Wien.

Die stomatäre Leitfähigkeit kennzeichnet den Öffnungsgrad der Stomata und wurde wie die spektrale Reflexion direkt am Blatt gemessen, wobei immer dieselben Blätter für die Messungen herangezogen wurden. Diese Messungen wurden sporadisch durchgeführt, wobei jede Woche zumindest eine Messung erfolgte. Bei der Durchführung der Blattmessungen wurde auch die Position der Kameras mehrmals verändert, um auch vom gesamten Versuchsaufbau Daten aufzunehmen.

Die verwendete RGB-Kamera nimmt Daten im sichtbaren Wellenlängenbereich (VIS) auf, während der 6-Kanal-Multispektralsensor zusätzlich auch die reflektierte Strahlung im Bereich des Nahen Infrarotes (NIR) bis 850 nm abdeckt. Dieser Wellenlängenbereich ist besonders interessant für Vegetationsanalysen und die Erfassung der Pflanzenvitalität (Jones & Vaughan 2010). Vitale Pflanzen zeichnen sich durch eine hohe Absorption von sichtbarem Licht (durch Pflanzenpigmenten) sowie hohe Reflexion der elektromagnetischen Strahlung im NIR (Zellstruktur der Blätter) aus.

Zusätzlich zu den Aufnahmen mit der Multispektral- und Thermalkamera wurden auch Messungen mit einem Spektroradiometer vorgenommen. Das Instrument ermöglicht es, potentiell relevante Spektralbereiche zu erfassen, die derzeit von den verfügbaren Drohnensensoren noch nicht abgedeckt werden. Das verwendete Spektroradiometer erfasst neben dem VIS und NIR Bereich zusätzlich das sog.

mittlere Infrarot (englisch shortwave infrared SWIR) von 1000 bis 2500 nm. In diesem Wellenlängenbereich wird die Reflexion primär durch den Wassergehalt der Pflanzen beeinflusst.

Ein weiterer Vorteil der Spektrometermessung besteht darin, dass eine künstliche Beleuchtung verwendet wird. Dadurch sind derartige Messungen nicht durch sich verändernde Lichtverhältnisse (Wolken, Abschattungen durch die Glashauskonstruktion) beeinflusst und liefern dadurch für den konkreten Versuch verlässlichere Ergebnisse als die Multispektralkamera.

Die zum Beginn des Versuches mit dem Spektrometer aufgezeichneten Spektalkurven der Testpflanzen sind in Abbildung 3 dargestellt. Die sechs Bereiche, welche durch die Kanäle der Multispektralkamera erfasst werden, sind farblich hervorgehoben.

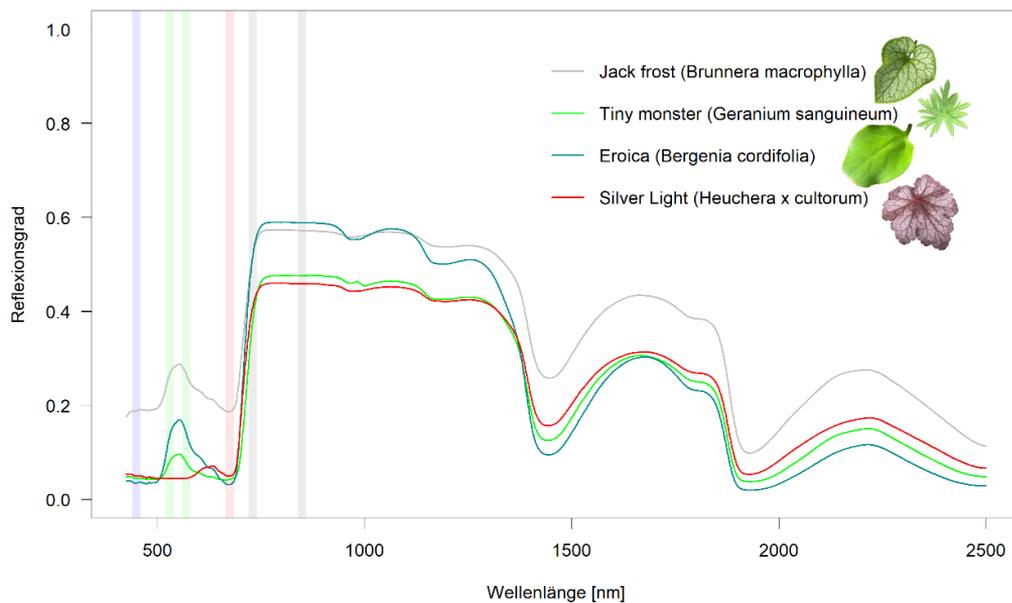


Abbildung 3: Mittlere Spektalsignaturen der vier getesteten Pflanzenarten zum Beginn des Versuches mit dem Spektrometer gemessen und schematische Hervorhebung des Aufnahmebereiches des Multispektralsensors (farbige Balken).

Die vier Arten sind vor allem durch die unterschiedlichen Reflexionsgrade im sichtbaren Bereich gut unterscheidbar. Die höhere Reflexion im Bereich des sichtbaren Lichtes der panaschierten Blätter der Art *Brunnera macrophylla* ist deutlich erkennbar, wobei das gesamte Spektrum in diesem Bereich verschoben erscheint. Die spektrale Signatur der roten Blätter der Art *Heuchera x cultorum* zeigt ein Maximum im Bereich des roten, anstelle des grünen Lichtes. Die beiden anderen Arten zeigen mit einem deutlichen Maximum im grünen Wellenlängenbereich relativ ähnliche und für grüne Vegetation typische spektrale Signaturen im sichtbaren Bereich, wobei *Bergenia cordifolia* etwas höhere Reflexionsgrade zeigt. Im NIR Bereich weist hingegen *Geranium sanguineum* höhere Reflexionsgrade auf. Bemerkenswert ist auch die deutlich höhere Reflexion von *Brunnera macrophylla* im SWIR Bereich. Die vier Arten können in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen somit gut unterschieden werden.

Zusätzlich zur Analyse des Reflexionsgrades in den einzelnen Spektralkanälen lassen sich durch Kanal- bzw. Bandkombinationen sogenannte Vegetationsindizes (VI) berechnen, welche oftmals gute Rückschlüsse auf den Vegetationszustand (Blattfläche, Vitalität) zulassen. VIs haben darüber hinaus den Vorteil z.B. Belichtungsunterschiede zu reduzieren. Beispiele für Vegetationsindizes sind:

Normalized Difference Vegetation Index NDVI (Rouse et al., 1974):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Rot}}{\text{NIR} + \text{Rot}} = \frac{\rho_{850} - \rho_{675}}{\rho_{850} + \rho_{675}}$$

Normalized Difference Water Index NDWI (Gao, 1996):

$$\text{NDWI 1} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR1}}{\text{NIR} + \text{SWIR1}} = \frac{\rho_{850} - \rho_{1240}}{\rho_{850} + \rho_{1240}}$$

$$\text{NDWI 2} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR2}}{\text{NIR} + \text{SWIR2}} = \frac{\rho_{850} - \rho_{1640}}{\rho_{850} + \rho_{1640}}$$

$$\text{NDWI 3} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR3}}{\text{NIR} + \text{SWIR3}} = \frac{\rho_{850} - \rho_{2130}}{\rho_{850} + \rho_{2130}}$$

Photochemical Reflectance Index PRI (Gamon et al., 1992):

$$\text{PRI} = \frac{\text{Grün1} - \text{Grün2}}{\text{Grün1} + \text{Grün2}} = \frac{\rho_{530} - \rho_{570}}{\rho_{530} + \rho_{570}}$$

NIR, SWIR, Grün und Rot sind allgemein gültige Bezeichnungen der Spektralkanäle. Die unterschiedlichen Wellenlängen aus den Hyperspektraldaten werden mit  $\rho$  und der entsprechenden Wellenlänge bezeichnet. Für die Berechnung der Indices aus den mit dem Spektorradiometer aufgenommenen Hyperspektraldaten wurden primär jene Wellenlängen verwendet, welche auch von der Multispektralkamera erfasst werden (VIS bis NIR).

Thermalsensoren erfassen im Gegensatz zu den optischen Sensoren nicht reflektierte, sondern emittierte Strahlung mit deutlich höherer Wellenlänge (> 7500 nm). Diese Strahlungsenergie steigt mit der Temperatur des Objektes und wird durch dessen Emissivität (Emissionsgrad) beeinflusst. Bei Pflanzen sinkt die Temperatur mit steigender Verdunstung von Wasser (Evapotranspiration).

Um die Wasserversorgung der Pflanzen zu charakterisieren, wurde zusätzlich mittels Porometer die stomatare Leitfähigkeit gemessen. Sie gibt Auskunft über die Stresssituation der Pflanze. Je weiter die Stomata geschlossen sind, desto geringer ist die stomatare Leitfähigkeit und damit auch die Photosyntheseleistung. Wenn die Spaltöffnungen der Pflanze geschlossen sind, sinkt gleichzeitig auch der transpirierte Wasserdampf pro Flächen- und Zeiteinheit. Diese Messungen wurden daher durchgeführt, um festzustellen, ab welchem Zeitpunkt die Pflanzen ohne Wasserversorgung erste Stressreaktionen aufgrund des Wassermangels zeigen. Zeitgleich wurden die Erhebungen mit den Fernerkundungssensoren durchgeführt, um festzustellen, ob diese Stressreaktion auch mit diesen Verfahren detektiert werden können.

### 2.2.2. Schätzung der Blattmasse mittels Multispektraldaten – Blattschnittversuch

Zusätzlich zum Trockenstressversuch wurde die Eignung des Multispektralsensors zur Quantifizierung der Biomasse getestet. Hierzu wurden Pflanzen aufgereiht und schrittweise zurückgeschnitten. Sowohl vom Ausgangszustand als auch nach jeder Entnahme wurden Multispektraldaten in seitlicher Betrachtung aufgenommen, um die einzelnen Schritte zu dokumentieren und Vegetationsindizes zu berechnen. Die entnommenen Blätter wurden auf weißem Papier fixiert und eingescannt, sodass die entfernte Blattfläche jedes Schnittdurchganges ermittelt werden konnte. Für jeden einzelnen Entnahmeschritt wurden die NDVI Werte des von der Pflanze eingenommenen Bereiches ermittelt, und der noch an der Pflanze befindlichen Blattfläche gegenübergestellt (Darvishzadeh et al. 2008).

### **2.2.3. Datenerhebung durch Befliegung mittels Drohnen**

#### **(1) Rechtliche Situation in Österreich**

Prinzipiell wird der Betrieb von Drohnen (uLFZ) in den Paragraphen 24c bis 24l des Luftfahrtgesetzes (LFG, BGBl. Nr. 253/1957) geregelt. Die zuständige Behörde ist die Austro Control. Ein Fluggerät ist nur dann als uLFZ zu klassifizieren, wenn die Verwendung nicht ausschließlich „zum Zwecke des Fluges selbst“ erfolgt. Verfügt das Fluggerät über eine Kamera, so ist dies bereits nicht mehr erfüllt und das Fluggerät als uLFZ zu klassifizieren.

Hierbei wird in zwei Klassen unterschieden:

- Klasse 1 sind uLFZ, die mit Sichtverbindung zum Piloten geflogen werden (diese sind Gegenstand des Berichtes)
- Klasse 2 sind uLFZ, die ohne Sichtverbindung zum Piloten geflogen werden (daher autonom unterwegs sind).

Innerhalb der Klasse 1 werden Kategorien von A bis D unterschieden. In welche Kategorie ein uLFZ fällt, hängt von dessen Gefährdungspotenzial (Kombination Gewicht des uLFZ + Einsatzbereich) ab. Mit höherer Kategorie werden die Anforderungen an das uLFZ strenger, beispielsweise müssen bei einem uLFZ der Kategorie C alle für den Flug relevanten Teile redundant ausgeführt sein. Ein Quadrocopter (4 Rotoren) kommt daher prinzipiell nur für die niedrigste Kategorie A in Frage.

Ausgenommen von dieser Betrachtungsweise sind Fluggeräte, deren Energie < 79 Joule beträgt. Bei einer Flughöhe von 25 m ist daher ein Gewicht von ca. 250 g maximal zulässig, damit das betreffende Fluggerät als „Spielzeug“ klassifiziert werden kann.

#### **(2) In DRoB verwendete Drohnen**

Aufgrund eines technischen Gebrechens der für DRoB vorgesehenen Drohne musste für die Befliegungen auf eine handelsübliche Drohne des Typs „DJI Mavic 2 Enterprise (Dual edition)“ (siehe Abbildung 4) zurückgegriffen werden. Die Drohne verfügt über einen kombinierten RGB/Thermal-Sensor mit einer Auflösung von 3840 x 2160 Pixel (RGB) bzw. 160 x 120 Pixel (thermal). Das Gesamtgewicht des Systems beträgt etwa 1,1 kg bei einer Flugzeit von ca. 25 Minuten. Aufgrund der Ausführung als Quadrocopter ist eine Zertifizierung nur in der Kategorie A möglich, was die Drohne für Befliegungen im städtischen Bereich unbrauchbar macht. Im Projekt DRoB wurde die Drohne hauptsächlich für die Befliegung der Grünfassaden von Testobjekten im Versuchsgarten des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB) der BOKU Wien verwendet. Neben der eingeschränkten Einsatzbarkeit der Drohne aufgrund der rechtlichen Situation ist als wesentlicher Nachteil dieses Drohrentyps die fehlende Möglichkeit zusätzliche Nutzlast zu befördern, anzuführen. Zwar macht der vollintegrierte RGB/Thermalsensor einen schnellen Überblick durch Übertragung eines Live-Bildes zum Bildschirm der Fernsteuerung möglich, jedoch werden die Daten durch unterschiedliche interne Prozesse bearbeitet bzw. verfälscht. Eine Verarbeitung im Post Processing ist daher nur schwer bzw. durch Reverse Engineering eingeschränkt möglich.



*Abbildung 4: DJI Mavic 2 Enterprise (Dual edition) im Flug (Immitzer, 2019)*

Aufgrund der oben angeführten Gründe ist die Verwendung einer Drohne zumindest der Kategorie C für die Befliegungen aus rechtlicher Sicht notwendig. Weiters sollte die Drohne eine ausreichende Nutzlast bei sinnvollen Flugzeiten bieten.

Die Verwendung einer Drohne „out of the box“ kommt aufgrund der fehlenden Redundanzsysteme nicht in Frage, vielmehr ist eine völlige Neukonstruktion bzw. die Adaptierung eines bestehenden Systems notwendig. Aufgrund der hervorragenden Flugeigenschaften wurde als Trägerplattform ein DJI M600pro Hexakopter gewählt (siehe Abbildung 5). Die notwendigen Adaptierungen hinsichtlich Redundanzsystem und Trägerplattform wurden in Kooperation mit der Fa. Riener Modellbau durchgeführt.

Der wesentlichste Unterschied zum im Handel erhältlichen Modell ist unter anderem die redundante Ausführung der Flugsteuerung. In der Drohne sind zwei völlig unabhängige Flugsteuerungen (inkl. Lagesensorik, Sensorik zur Positionsbestimmung, etc.) verbaut. Die beiden Einheiten sind durch ein Bussystem miteinander verbunden. Fällt eine Flugsteuerung aus, so wird automatisch, ohne ein Eingreifen des Piloten auf die Reserveflugsteuerung umgeschaltet.



*Abbildung 5: DJI M600pro (modifiziert) in Draufsicht (linkes Bild) und Seitenansicht (rechtes Bild) (Lederbauer, 2019)*

Die Adaptierung der Halterung für die benötigte Sensorik wurde ebenfalls in Zusammenarbeit mit der Fa. Riener Modellbau durchgeführt. Konkret wurde eine maßgefertigte Sensorhalterung für die Drohne zur Datenerfassung an Gebäudefassaden entwickelt. Die Halterung kann zwei Multispektralkameras, zwei Thermalkameras und eine RGB-Kamera tragen und ermöglicht durch ihre Ausrichtung die horizontale Aufnahme von Bilddaten (siehe Abbildung 6). Dadurch ist eine Aufnahme von qualitativ hochwertigen Bilddaten auch von Fassaden unterschiedlicher Höhe möglich. Ebenso kann die Vorrichtung für die Sensorik durch einen einfachen Klappmechanismus für Nadiraufnahmen, beispielsweise zur Erfassung von Dachbegrünungen, verwendet werden. Als RGB-Kamera wird im verwendeten Setup eine Vollformatkamera vom Typ Sony A7r verwendet. Das verwendete Kameragimbal (DJI Zenmuse) ermöglicht eine freie Wahl des Pitchwinkels („Neigung der Kamera“).



Abbildung 6: Klappbare Halterung für multispektrale bzw. thermale Sensorik an DJI M600pro (linkes Bild); Sony A7r auf DJI Zenmuse (rechtes Bild) (Lederbauer 2019)

### **(3) Untersuchung der Ausrichtung von Grünfassaden – Versuchsgarten der BOKU Wien**

Im Zuge dieser Studie konzentrierten sich die Untersuchungen bezüglich Drohneneinsatz auf Fassadenbegrünungen, da diese bezüglich der Datenaufnahme deutlich größere Herausforderungen darstellen als Dachbegrünungen. Dies betrifft vor allem die Ausrichtung der Fassade in Kombination mit dem Sonnenstand. Zum Zweck der Evaluierung der Verwendbarkeit verschiedener Drohnensensoren für das Monitoring von Grünfassaden wurden Pflanzenwände im Versuchsgarten des IBLB der BOKU untersucht. Dazu wurden vier bestehende Versuchsobjekte, welche auf drei Seiten mit Vegetationsträgern ähnlich begrünt sind (nord-, west- und südseitig), mit einer DJI Mavic 2 Enterprise befliegen und zusätzlich Daten mit der Multispektralkamera aufgenommen. Die untersuchte Fassadentypen waren mit unterschiedlichen Pflanzen begrünt, welche von Kräutern und Gräsern über Sukkulenten / Sedum-Vegetation bis hin zur Staudenbepflanzung reichten. Ziel der Datenaufnahme war es, die Auswirkungen der Fassadenausrichtung in Verbindung mit der Tageszeit auf die Datenerfassung bzw. Datenqualität zu ermitteln.

### **(4) Fassadenerfassung mittels terrestrischem Laserscanner**

Die geplanten Befliegungen von Fassaden im städtischen Bereich konnten aufgrund der rechtlichen Situation (fehlende Fertigstellung der Kategorie-C Drohne) nicht durchgeführt werden. Ersatzweise wurde eine Datenerfassung mittels terrestrischem Laserscanner durchgeführt. Hierfür wurde ein Scanner des Typs RTC 360 der Fa. Leica Geosystems verwendet.

Mittels terrestrischen Laserscannern wird die Umgebung durch eine Vielzahl von Distanzmessungen in sehr hoher zeitlicher Frequenz (ca. 1 Mio. Punkte pro Sekunde) bei gegebenem Horizontal- und Vertikalwinkel abgetastet. Die Ableitung der Distanz wird durch Messung der Laufzeit des ausgesendeten Signals vom Scanner zum Objektpunkt und vice versa bewerkstelligt. Durch die Ableitung von 3D-Koordinaten aus den Messungen kann die vom Standpunkt aus sichtbare Umgebung vollständig rekonstruiert werden. Zusätzlich wird für jede Messung die Amplitude des zurückgeworfenen Signals (abhängig von der Distanz des Objektpunktes und den Materialeigenschaften) erfasst und pro 3D-Punkt gespeichert.

Der Ablauf der Erfassung einer Fassade gliedert sich grob in folgende Schritte:

- Erfassung der Objektgeometrie von unterschiedlichen Standpunkten aus
- Registrierung (räumliche Zuordnung der Einzelscans zueinander)
- Ableitung einer gesamten Punktwolke des beobachteten Bereiches
- Ableitung von Folgeprodukten (Pläne, Orthofotos etc.)

## **2.3. Robotik**

### **2.3.1. Trends und Ansätze**

Ziel war es, derzeitige Trends und Ansätze im Bereich der autonomen Pflege von begrünten Fassaden zu identifizieren. Die Recherche inkludiert eine Literaturrecherche im Internet (allgemeine Suche, Patentdatenbanken) sowie Expert\*inneninterviews.

Zunächst wurde im Internet nach bereits bestehenden Robotern im (1) vertikal begrünten Bereich, (2) vertikal, nicht begrünten Bereich und (3) horizontal begrünten Bereich für die Pflege von Gebäudebegrünungen recherchiert. Daran anschließend wurde die Recherche auf einzelne Komponenten ausgedehnt, mit denen automatisierte Pflegemaschinen für horizontale, begrünte Flächen, die derzeit am Markt erhältlich sind, ausgestattet sind. Zusätzlich wurden Expert\*innen aus diesem Fachbereich telefonisch bzw. per E-Mail kontaktiert, um weitere Auskunft in Bezug auf Anwendbarkeit bestehender Systeme auf Vertikalbegrünungen zu erhalten.

### **2.3.2. Erarbeitung der technischen Anforderungen an einen Roboter**

In einem weiteren Schritt wurden im Rahmen von internen Workshops und in Absprache mit dem Projektpartner GRÜNSTATTGRAU (Vorprojekt Begrenzungsleiste für bodengebundene Fassadenbegrünung mit *Parthenocissus tricuspidata*) technische Anforderungen an den Roboter definiert.

### **2.3.3. Kategorisierung von Maßnahmen, Technologien und grünen Infrastrukturen**

Im Anschluss wurde eine Kategorisierung von Maßnahmen, Technologien und grünen Infrastrukturen vorgenommen. Für grüne Infrastrukturen wurde hierzu die ÖNORM L1136 herangezogen. Die *International Federation of Robotics* bezieht sich in ihrer Einteilung von Robotern auf die Definition der

Internationalen Organisation für Standardisierung (ISO). Die ISO 8373:2012 umfasst sowohl Industriemaschinen als auch Serviceroboter (Online Browsing Platform ISO 2012).

Die Plattform robots.nu (RobotXperience 2019) teilt Roboter anhand ihres Einsatzes ein:

- Roboter zu Hause
- Roboter bei der Arbeit
- Roboter in der Ausbildung
- Roboter in der Pflege

### **2.3.4. Erstellung einer technischen Zeichnung eines möglichen Pflegeroboters**

Die ersten Konzeptentwürfe für einen möglichen Trimm-Roboter wurden mit den Programmen Blender und E-Draw Max erstellt. Daraus wurde mithilfe von SolidWorks 2020 ein weiterführendes 3D-Modell entwickelt, aus welchem die technischen Zeichnungen abgeleitet wurden.

## **2.4. Monitoring- und Pflegeszenarien mittels Drohnen und Robotik**

### **2.4.1. Einsatzszenarien von Drohnen und Robotik**

Aufbauend auf den unterschiedlichen Versuchen bezüglich des Monitorings mit Drohnensensoren bzw. den intensiven Literaturrecherchen bzw. Konzeptionierung des Roboters wurden mögliche Einsatzszenarien erarbeitet und in einem Expert\*innenworkshop mit Unternehmer\*innen aus dem Bereich Dach- und Fassadenbegrünung diskutiert. Neben den Einsatzmöglichkeiten wurden dabei auch ökonomische Gesichtspunkte erörtert und das Marktpotenzial neuer Lösungen im Bereich Pflege evaluiert. Die Einsatzmöglichkeiten von Drohnen und Robotern im Bereich Fassadenbegrünung wurde abschließend mittels Stärken-Schwächen-Analyse bewertet.

### **2.4.2. Akzeptanzerhebung bezüglich des Einsatzes von Drohnen und Robotik**

Die Akzeptanz des allgemeinen Einsatzes von Drohnen sowie von Robotik wurde im Zuge einer Literaturrecherche erhoben. Zusätzlich erfolgte eine Erhebung mit Fokus auf Begrünung im Zuge der Expert\*innenbefragung bezüglich Pflegekosten. Im Rahmen der Interviews mit insgesamt 18 Besitzer\*innen und verantwortlichen Personen von Fassadenbegrünungen, ausführenden Unternehmen und Systemhersteller\*innen, wurde die Bereitschaft zum Einsatz von Drohnen für das Monitoring und den Einsatz von robotergestützten Systemen für die Pflege von Fassadenbegrünungen abgefragt. Diese Abfrage erfolgte durch die nachfolgenden Skalierungsfragen mit einer Skala von 1-10 (1 keine Akzeptanz, 10 hohe Akzeptanz). Folgende Fragen wurden gestellt:

1. **Akzeptanz von Drohnen:** Wie stehen Sie zum Einsatz von robotergesteuerten Systemen (Drohnen) zum Einsatz für das Monitoring von Vertikalbegrünungen?
2. **Akzeptanz von Pflegerobotern:** Wie stehen Sie zum Einsatz von Robotertechnik (z.B. ähnlich Fassadenreinigung: schienengeführt, seilgeführt) für Pflegemaßnahmen wie dem Schnitt von jungen Trieben bei Vertikalbegrünungen?

Zusätzlich wurde im Rahmen des Expert\*innenworkshop die Akzeptanz derartiger Systeme thematisiert und dokumentiert.

## 3. Ergebnisse

### 3.1. Monitoring und Pflege von Fassadenbegrünungen – Bedarf & Kosten

#### 3.1.1. Problemanalyse: Folgen von nicht durchgeführter Pflege

Die Art des Pflegeeingriffes und dessen Kosten ist abhängig von der jeweiligen Art der Fassadenbegrünung (Perini und Rosasco 2013). Nach dem Leitfaden für Fassadenbegrünung werden zwischen bodengebundenen Begrünungen mit und ohne Kletterhilfe und fassadengebundenen Begrünungen mit vollflächigen und teilflächigen Vegetationsträgern unterschieden (MA 22 – Wiener Umweltschutzabteilung 2019). Des Weiteren ist bei fassadengebundenen Begrünungen zwischen Regalsystemen mit horizontaler Wuchsebene und Living-Wall-Systemen (LWS) mit vertikaler Wuchsebene zu unterscheiden. Diese Klassifizierung ist auch im Themenbereich der Pflege sinnvoll, da je nach Begrünungsart unterschiedliche Arbeitsschritte notwendig sind. Damit diese Systeme nachhaltig betrieben werden können und sie ihre positiven Effekte entfalten, ist neben der fachgerechten Installation, die Pflege dieser Objekte obligatorisch (Chew et al. 2019). Die Folgen von nicht oder nicht fachgerecht durchgeführter Pflege sind in den folgenden Kapiteln erörtert.

#### 3.1.2. Bodengebundene Begrünung

Ein dichter, flächendeckender Bewuchs durch eine bodengebundene Begrünung mit Kletterpflanzen erfordert Pflegemaßnahmen, die umso aufwendiger werden, je größer die bewachsene Fläche und je älter die Begrünung ist. Durch Pflegearbeiten, wie dem Freischneiden von Fenstern und Dachrinnen und dem Stützen von größeren verholzten Zweigen mittels Wandanker, lassen sich pflanzenbedingte Schäden vermeiden. Voraussetzungen dafür sind:

- Ausreichende Tragfähigkeit des Putzes bei selbstkletternden Pflanzen
- Einwandfreier Untergrund ohne Risse
- Fallrohre und Dachrinnen sollten möglichst vom Bewuchs freigehalten werden
- Fassadenelemente, die hinterwachsen und dann durch Dickenwachstum gesprengt werden können, sollten nicht begrünt werden (z.B.: schuppenförmige Verkleidungen, vorgehängte-hinterlüftete Plattenverkleidungen, etc.)
- Dispersionsbeschichtungen sollten nicht mit Selbstklimmern begrünt werden. Die leicht ätzende Wirkung der Haftscheiben oder -wurzeln kann zu einer Schädigung der Beschichtung führen (Rath et al. 1989)
- ebenso Wände mit außenliegender Wärmedämmschicht (Pfoser et al. 2013)

Vernachlässigung in der Pflege führt zu einem unkontrollierten Wuchs der Pflanzen in Bereiche, die nicht dafür vorgesehen sind, wie z.B. Fensterbereiche, Dachstühle oder eventuelle Nachbargebäude. Im Laufe der Zeit können einzelne Teile der Kletterpflanzen absterben. Dies ist insbesondere bei verholzten Ästen problematisch, da diese bei stärkeren Windlasten abbrechen können. Eine regelmäßige Kontrolle auf Sicherheit ist daher notwendig. Wenn die Pflege in großen Fassadenhöhen nicht mehr realisiert und radikale Lösungen, wie z.B. die komplette Entfernung der Pflanzen, praktiziert wird, entstehen unattraktive Bilder an den Fassaden. Vor allem durch die Haftorgane, welche auch nach der Beseitigung der Pflanzen an der Fassade zurückbleiben, da diese nur sehr zeitaufwändig zu

entfernen sind (Pfoser et al. 2013). Ein weiterer Extremfall ist, dass die Pflanzen solange wachsen und sich selbst durch ihr Eigengewicht ablösen, bis z.B. durch Sturm, Teile der Begrünung herunterbrechen und es so zu Schäden an der Fassade und Umgebung kommen kann (Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V. 2014). Weitere Schadensrisiken durch mangelhafte Pflege oder Wartungsfehler sind:

- Brandgefahr, Brandüberschlag (Totholz/Trockenmasse)
- Ein- und Überwachsen von Bauteilen (mangelnder Rückschnitt)
- Schäden durch Wuchs-, Schnee-, Eis- und Windlast (mangelnder Rückschnitt)  
(Forschungsgesellschaft Landesentwicklung Landschaftsbau e.V. 2018)

Um diesen Fällen vorzubeugen, ist ein regelmäßiges Monitoring und bei Maßnahmenentscheid fachgerechte Pflegedurchführung notwendig. Nur so kann sichergestellt werden, dass die bodengebundene Begrünung langfristig problemlos betrieben werden kann.

### **3.1.3. Fassadengebundene Begrünung**

Fassadengebundene Begrünungssysteme erfordern im Regelfall ein breiteres Spektrum an Arbeitsschritten im Vergleich zu bodengebundenen Begrünungen. Dies lässt sich vor allem auf die zusätzliche Bewässerungsanlage und weitere notwendige Technikausstattung zurückführen. Fassadengebunden bedeutet, dass der Wurzelbereich der Pflanze zur Gänze vom natürlichen Boden abgetrennt an der Fassade künstlich hergestellt wird. Begrünungen in Trögen mit Kletterpflanzen oder anderen Gehölzen an der Fassade sind davon ebenso betroffen, wie jene mit mehrjährigen Stauden begrünte, vorgehängt, hinterlüftete Gesamtsysteme. Gängige Probleme, welche auftreten, entstehen durch (Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V. 2014):

- Falsche Bewässerungseinstellungen
- Gänzlicher Ausfall der Bewässerungsanlage bzw. versehentliche Unterbrechung der Wasserversorgung durch technisches oder menschliches Versagen
- Herausfallende Pflanzen
- Fehlsteuerung der Nährstoffversorgung
- Fraßschäden an Wurzel und Blatt durch Schädlinge.

Diese Probleme führen in der Regel dazu, dass die Pflanzen absterben und lückenhafte Begrünungen entstehen, die sich kaum selbst erholen können (es sei denn, die Keimung von Saatgut ist möglich). Deshalb sind in wandgebundenen Systemen mit geringer Resilienz regelmäßige Nachpflanzungen notwendig. Dies führt in weiterer Folge zu einem schlechten Image der Branche und bringt Systemhersteller\*innen, pflegende Unternehmer\*innen und Planer\*innen in Erklärungsnotstand. Nachdem der österreichische Markt der Systemhersteller\*innen von wandgebundenen Systemen jedoch eine vergleichsweise lange Tradition in der Produktentwicklung hat und Projekte in der Regel von Fachunternehmen geplant werden, finden diese Aspekte ausreichende Berücksichtigung. Laut einer umfangreichen Fallstudie, durchgeführt von Chew et al. (2019), stehen zwei von sieben der kritischsten Defekte von LWS im direkten Zusammenhang mit der Pflege ebendieser. An erster Stelle ist die Unzugänglichkeit für Pflegemaßnahmen (örtliche Erschließung) und an zweiter Stelle das Sicherheitsrisiko während der Reinigungs- und Reparaturmaßnahmen des Pflegepersonals genannt.

Auch Pfoser (2013) erwähnt, dass die Erreichbarkeit der begrünten Flächen für Pflege und Wartung dauerhaft sichergestellt werden muss. Diese Aspekte müssen bei der Planung ausreichend berücksichtigt werden, damit die Begrünung im späteren Betrieb reibungslos funktioniert.

#### **3.1.4. Regelwerke und Stand der Technik**

Fassadenbegrünungen sind im Gegensatz zu Dachbegrünungen derzeit noch kein normierter Baustandard (ÖNORM) in Österreich, im weiteren EU-Kontext sind ebenfalls noch keine diesbezüglichen Standardisierungen vorhanden. Mit 2020 soll sich das ändern, der erste Standard ist in Entwicklung: die ÖNORM L1136 für Fassadenbegrünung (Verband für Bauwerksbegrünung). Derzeit ist jedoch eine Vielzahl von Richtlinien und Leitfäden in ganz Europa abrufbar. Als Stand der Technik gilt für Österreich und seine klimatischen wie baulichen Verhältnisse in Expert\*innenkreisen die FLL-Richtlinie für Fassadenbegrünung (2018) aus Deutschland und der Leitfaden Fassadenbegrünung der Stadt Wien (Wiener Umweltschutzabteilung und ÖkoKauf Wien 2019).

Die Art und Häufigkeit der Pflege ist abhängig vom gewünschten Erscheinungsbild, der Geometrie der begrünten Fläche, der Anzahl und Art der Aussparungen wie Fenster, der Höhe, die Zugänglichkeit, sowie der Art der Begrünung und dem verwendeten System (Hollands und Korjenic 2019). Des Weiteren nennt Mumford (2013) die Faktoren der Pflanzenauswahl, die Frequenz der Besuche und die Art der Bewässerung. Generell wird zwischen Anwuchs-, Entwicklungs- und Unterhaltungspflege unterschieden. Die Abnahme und der definierte abnahmefähige Zustand umfassen demzufolge alle Leistungen, die zur Erzielung des abnahmefähigen Zustandes erforderlich sind. Dieser ist erreicht, wenn die Sicherheit über den Anwuchserfolg besteht (abhängig von der Anzahl an Vegetationsperioden). Die Entwicklungspflege beginnt nach der Abnahme der Fertigstellungspflege und sorgt für eine langfristig stabile Begrünung. Die Unterhaltungspflege dient der langfristigen Erhaltung einer funktionsfähigen Begrünung (Forschungsgesellschaft Landesentwicklung Landschaftsbau e.V. 2018).

##### **(1) Arbeitsschritte für bodengebundene Begrünungen**

Der Bundesverband GebäudeGrün (2018) sieht ein- bis zweimal jährlich durchzuführende Instandhaltungsmaßnahmen vor, im Leitfaden für Fassadenbegrünung der Stadt Wien (Wiener Umweltschutzabteilung und ÖkoKauf Wien 2019) werden zumindest jährliche Sichtkontrollen empfohlen. Bei Maßnahmenentscheid zur Pflege sollten folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Lenken der Triebe
- Rückschnitt
- Anbinden von Jungtrieben
- Freihalten der Bausubstanz (Fenster-, Türöffnungen, Entwässerungseinrichtungen).

Der Bundesverband GebäudeGrün (2018) beschreibt zusätzlich das Entfernen von abgestorbenen Pflanzenteilen und gegebenenfalls Düngegaben. In der FLL - Richtlinie für Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadebegrünungen (Forschungsgesellschaft Landesentwicklung Landschaftsbau e.V. 2018) ist kein Pflegeintervall beschrieben, jedoch werden folgende zusätzliche Instandhaltungsleistungen, welche oben nicht genannt wurden, zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes beschrieben:

- Kontrolle auf Krankheiten und Schädlingsbefall, evtl. Durchführung von Pflanzenschutzmaßnahmen
- Kontrolle der Kletterhilfen, auch hinsichtlich der Verkehrssicherheit
- Wässern.

## **(2) Arbeitsschritte für fassadengebundene Begrünungen**

Bei fassadengebundenen Begrünungen ist darauf zu achten, dass spezialisierte und qualifizierte Unternehmen für die Pflege eingesetzt werden, vor allem dann, wenn die herstellende Firma keine Pflege ihrer Produkte übernimmt (Mumford et al. 2013). Im Idealfall ist die Herstellungsfirma mit dem Pflegeunternehmen in Informations- und Erfahrungsaustausch, um die systemspezifischen Anforderungen fachgerecht bewältigen zu können.

Der Bundesverband GebäudeGrün (2018) empfiehlt für wandgebundene Begrünungen fünf- bis zehnmal jährlich durchzuführende Instandhaltungsmaßnahmen. Im Leitfaden für Fassadenbegrünung der Stadt Wien (2019) sind zumindest jährliche Sichtkontrollen und je nach Begrünungsart zwei bis vier Pflegedurchgänge pro Jahr angedacht. Ersterer beschreibt dabei folgende Aufgaben:

- Rückschnitt
- Vom Bewuchs freihalten: Fenster und -läden, Dächer, Fallrohre, Blitzableiter, Markisen und Luftaustrittsöffnungen
- Entfernen von abgestorbenen Pflanzenteilen
- Ersetzen von ausgefallenen Pflanzen
- Wartung der Wasser- und Nährstoffversorgungsanlage
- Vor dem Winter: Frostsicherung der Bewässerungsanlage
- Düngen (falls nicht automatisiert über die Wasserzufuhr).

Ergänzend dazu beschreibt der Leitfaden für Fassadenbegrünung der Stadt Wien (2019) das Entfernen von Fremdvegetation und gegebenenfalls den Austausch von Substrat bzw. Substratersatz. Die FLL (2018) gibt kein bestimmtes Pflegeintervall vor, empfiehlt in der Instandhaltung jedoch zusätzlich zu den oben genannten Punkten:

- Jährliche Kontrolle der konstruktiven Bauteile, insbesondere der Verankerung
- Inspektion und Wartung der Pflanzgefäße
- Inspektion und Wartung der Bewässerungsanlage nach FLL-Bewässerungsrichtlinien
- Inspektion und Wartung der Entwässerungseinrichtung
- Wartung der Ver- und Entsorgungssysteme
- Turnusmäßiger Austausch von Verbrauchsgütern oder Filtern
- Regelmäßiger Betrieb von netzbedingten Versorgungseinrichtungen für die Fernwartung.

Die Verantwortung für den Erhalt der Begrünung geht nach der Abnahme auf den/ die Auftraggeber\*in über, zum langfristigen Erhalt der Begrünung sollten mit Fachfirmen entsprechende Pflege- und Instandhaltungsverträge abgeschlossen werden (Forschungsgesellschaft Landesentwicklung Landschaftsbau e.V. 2018). Giardano et. al. (2017) teilt die Pflege in Routine- und Spezialmaßnahmen ein, wobei erstere zumindest zweimal im Jahr durchgeführt werden sollten (Tabelle 2).

Routinemaßnahmen	Spezialmaßnahmen
Überwachung der Bewässerung	Reparaturen der Bewässerung
Monitoring des Pflanzenwachstums	Austausch von Materialien und Systemkomponenten
Pflegeschnitte	Schädlingsbekämpfung
Kontrolle der verwendeten Materialien und Komponenten	

Tabelle 2: Einteilung der Pflege von Living Wall Systemen nach Giardano in Routine- und Spezialmaßnahmen.

Laut Mumford et al. (2013) ist die Pflege von fassadengebundenen Begrünungen der Schlüsselfaktor, ob diese nachhaltig funktionieren oder nicht, dies betrifft jedoch nur wartungsintensive Systeme. Die Arbeitsschritte zur Überprüfung der Bewässerung werden jedoch detaillierter beschrieben als in den oben angeführten Regelwerken:

1. Instandhaltung einer homogenen Wasserverteilung
2. Jahreszeitlich variierende Bewässerungseinstellungen
3. Anpassung an die Pflanzenauswahl
4. Regelmäßige Kontrolle der Komponenten

Die Pflegeintervalle aus den Regelwerken der Technik variieren von zwei bis zehn Pflegemaßnahmen pro Jahr. Die in DRoB erhobenen wandgebundenen Begrünungssysteme werden alle zweimal jährlich gepflegt, einmal im Frühjahr und einmal im Herbst. Für das Monitoring und regelmäßige Sichtkontrollen wurde in keinem der Objekte gesondertes Budget zur Verfügung gestellt. Der Maßnahmenentscheid, ob gepflegt werden soll, wird erst getroffen, wenn größere Arbeitsschritte zu erledigen sind. Hierfür wäre ein Kriterienkatalog angelehnt an die Baumkontrolle sinnvoll. Arbeitsschritte sind im Frühjahr das Nachpflanzen von ausgefallenem Pflanzenmaterial und im Herbst das Zurückschneiden der Vegetation und die Vorbereitung auf die Winterruhe.

Als Schlüsselfaktor neben der Pflege ist die Bauweise des Begrünungssystems maßgeblich. Sie bestimmt den Pflegeaufwand. Desto besser ein System funktioniert, desto geringer ist der Pflegeaufwand. Fassadengebundene Begrünungen, welche von gängigen am österreichischen Markt befindlichen Systemhersteller\*innen ausgeführt wurden, werden in der Regel ein bis maximal zweimal jährlich gepflegt. Mehr als zwei Routinepflegegänge pro Jahr werden von der Auftragnehmer\*innenseite nicht toleriert. Pflegeintensivere Systeme haben es schwer, sich langfristig am Markt durchzusetzen.

Es ist daher davon auszugehen, dass der Markt derzeit maximal zwei Routinepflegegänge pro Jahr toleriert. Entweder muss sich die Systemtechnik darauf einstellen oder durch dementsprechende Kommunikationsmaßnahmen die Akzeptanz der Pflege erhöht werden. Der Trend geht jedoch in die Richtung, die Pflege auf einmal jährlich zu reduzieren.

### 3.1.5. Angaben und Maßzahlen zur Pflege von Fassadenbegrünung

In Tabelle 3 werden Preise für die Pflege von unterschiedlichen Fassadenbegrünungstypen aus internationaler Literatur gelistet, diese dienen als Referenzwerte zum Vergleich mit den erhobenen Fassadenbegrünungen. Perini und Rosasco (2013) erstellten Ökobilanzen für die unterschiedlichen Arten von Fassadenbegrünungen und ermittelten auch deren Pflegekosten. Fassadengebundene Begrünungen weisen demnach deutlich höhere Kosten auf als bodengebundene Begrünungen. Dies ist vor allem an der größeren Anzahl an Arbeitsschritten festzumachen, wie der Kontrolle und Wartung der Bewässerung, dem Austausch von Paneelen (bei LWS) und der Nachpflanzung von abgestorbenen Pflanzen. Zum Austausch von Paneelen ist anzumerken, dass die derzeitigen österreichischen Systemanbieter\*innen am Markt langlebige Systeme anbieten, ein Tausch von Paneelen nicht vorgesehen ist und auch in der Praxis nicht durchgeführt wird. Perini und Rosasco (2013) ermittelten ihre Pflegekosten für die unterschiedlichen Begrünungsmethoden anhand einer 225 m<sup>2</sup> großen Modellfassade in Genua.

Quelle	Bodengebunden mit Kletterhilfe €/m <sup>2</sup>	Bodengebunden Selbstklimmer €/m <sup>2</sup>	Teilflächiger Vegetationsträger (horizontale Wuchsebene) €/m <sup>2</sup>	Living Wall oder vollflächiger Vegetationsträger (vertikale Wuchsebene) €/m <sup>2</sup>
Perini und Rosasco (2013)	2,81	2,81	-	27,02
Eppel (2016)	-	-	-	68,25*
Hollands und Korjenic (2019)	34,14	34,14	75,28	-
Pfoser (2013)	10-20	15	10	~40

Tabelle 3: Pflegekostenaufstellung für unterschiedliche Arten von Fassadenbegrünungen, die Preise beziehen sich auf Quadratmeter Pflege pro Jahr. \*Mittelwert von vier unterschiedlichen Living Wall Systemen.

Eppel (2016) testete vier verschiedene vollflächige, fassadengebundene Vegetationsträger mit vertikaler Wuchsebene auf einer Versuchsfläche von 6 m<sup>2</sup> und ermittelte die in Tabelle 4 angeführten Pflegekosten pro Jahr. Im Gegensatz zu der Kalkulation von Perini und Rosasco (2013) sind Kosten für Wasser und Strom inkludiert, welche als laufende Kosten und nicht als Pflegekosten zu kategorisieren wären. Des Weiteren betrachtete Eppel (2016) eine Fläche von 6 m<sup>2</sup>; es kann davon ausgegangen werden, dass die Kosten ab einer gewissen Fassadenfläche für die Pflege sinken. Das heißt, dass kleinere Flächen überproportional teurer zu pflegen sind als größere Flächen, da gewisse Kosten wie Anfahrt, eventuelle Miete von Geräten (Hubsteiger etc.) sich auf den Quadratmeterpreis aufteilen.

Hollands und Korjenic (2019) erstellten ein Modell zu Kosten und Nutzen von unterschiedlichen Begrünungssystemen. Dabei wurden Kosten für Instandhaltung, Wartung und Pflege einer 55 m<sup>2</sup> großen Fassade bei jährlichen Maßnahmen in einem Zeitraum von 25 Jahren kalkuliert.

Hersteller*in		Substratbefüllter Kunststoffträger, modular		Gesamtsystem Mehrlagiges Geotextil (Vlies)		Gesamtsystem Vegetationsträger Mineralwolle		Substratbefüllte Module, Metall	
		2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
Kosten in €/m <sup>2</sup>	Wasser & Strom	2,95	3,68	0,82	1,29	2,09	1,76	4,24	3,21
	Pflanzung, Pflege und Pflanzenschutz	25,62	51,27	6,67	59,42	29,10	19,58	27,99	20,01
	Wartung	15,27	33,88	11,80	36,70	9,72	28,33	9,72	24,17
	Reparaturen	4,16	58,33	0,00	16,70	47,90	29,17	36,25	4,17
	<b>Gesamt</b>	<b>48,00</b>	<b>147,16</b>	<b>19,29</b>	<b>114,11</b>	<b>88,81</b>	<b>78,84</b>	<b>78,20</b>	<b>51,56</b>

Tabelle 4: Pflegekosten von vier verschiedenen Living Wall Systemen, ermittelt an einer 6 m<sup>2</sup> großen Versuchsfläche über zwei Jahre (Eppel 2016).

Zu den dargestellten Kosten ist anzumerken, dass die Interpretation und Vergleichbarkeit dieser schwerfällt, da nur die Anwuchs- und Entwicklungspflegephase betrachtet wurde und der Zeitraum mit zwei Jahren zu kurz ist und daher keinen Rückschluss auf eine Unterhaltspflege zulässt. Die verglichenen Systemtypen sind sehr unterschiedlich in ihrem Aufbau, es wurden jedoch nur vollflächige Vegetationsträger betrachtet. Die Unregelmäßigkeiten speziell im Bereich der Reparaturen lassen darauf schließen, dass mit den Systemen entweder in der Pflege nicht korrekt umgegangen wurde oder bereits während der Bauphase Unregelmäßigkeiten auftraten, welche nachfolgend behoben werden mussten. Begrünungen mit diesen Systemen sind am österreichischen Markt nur in geringer Anzahl vorhanden, den Großteil machen teilflächige Vegetationsträger mit horizontaler Wuchsebene aus.

### 3.1.6. Erhebung der Pflegekosten von bestehenden Fassadenbegrünungen

Tabelle 5 listet die Kosten für die Pflege verschiedener Fassadenbegrünungsobjekte auf. Dabei wurde jeweils der Quadratmeterpreis pro Jahr für die Pflege und die Kosten für Pflege in Prozent zu den Anschaffungskosten der Vertikalbegrünung pro Jahr ermittelt. Bodengebundene Begrünungen mit Selbstklimmern wurden in dieser Tabelle nicht behandelt, da für deren Ermittlung eine eigene Methode angewendet wurde (siehe

Tabelle 6).

Die Rubrik „Teilflächiger Vegetationsträger (horizontale Wuchsebene)“ in Tabelle 5 ist aufgrund des größten Stichprobenumfangs am aussagekräftigsten. Die Kategorien „Bodengebundene Begrünungen mit Rankhilfe“ und „Wandgebundene Tröge mit Kletterpflanzen“ haben einen geringeren Stichprobenumfang, deshalb können damit keine pauschalisierten Aussagen getroffen werden. Aus den erhobenen Beispielobjekten resultiert ein Mittelwert von 5% der Anschaffungskosten für die Pflege von teilflächigen Vegetationsträgern pro Jahr, bei Vernachlässigung der Extremwerte sinkt dieser auf 4,51%. Dies entspricht einem Preis von 34,83 € (32,76 € bei Streichung der Extremwerte) pro Quadratmeter pro Jahr, welcher weder mit dem Preis von Hollands und Korjenic (2019) noch mit jenem von Pfoser (2013) übereinstimmt. Vielmehr bildet der erhobene Preis den Mittelwert der beiden Literaturquellen. Die in Tabelle 3 angeführten Preise für LWS mit vertikaler Wuchsebene konnten in unserer Erhebung nicht überprüft werden, da dieses System in keinem der aufgenommenen Beispiele verwendet wurde.

Die Kategorie „Wandgebundene Tröge mit Kletterpflanzen“ enthält nur vier Beispielobjekte, diese variieren von 0,54 € (Institut für Physik Humboldt Universität Berlin) bis 88,57 € (Stücki – Einkaufszentrum Basel) pro Quadratmeter pro Jahr oder 0,19% bis 10,31% der Anschaffungskosten. Der Durchschnittspreis beträgt 34,53 € oder 4,07%, diese Werte können aufgrund der großen Schwankungsbreite der erhobenen Beispiele und des geringen Stichprobenumfangs nur als grobe Richtwerte angesehen werden.

Bodengebundene Begrünungen mit Kletterhilfen weisen eine Schwankungsbreite von 2 € - 13,78 € pro Quadratmeter pro Jahr auf, dies entspricht im Durchschnitt 6,10 €. Dieser Wert befindet sich zwischen den Werten von Pfoser (2013) und Perini und Rosasco (2013).

Objekt	Bodengebunden mit Kletterhilfe		Wandgebundene Tröge mit Kletterpflanzen		Teilflächiger Vegetationsträger (horizontale Wuchsebene)	
	€/m <sup>2</sup>	%d. H.*	€/m <sup>2</sup>	%d. H.*	€/m <sup>2</sup>	%d. H.*
Fassade – Wien 1	-		-		8,50	2,25
Fassade – Wien 2	-		20		-	
Fassade – Wien 3	-		-		25	6
Privatgarten 1090 Wien	-		-		75	5
Stücki Einkaufszentrum Basel	+		88,57	10,31	-	
Vertikaler Regengarten London	-		-		11	4,94
Rubens at the Palace Hotel London	-		-		22	4,62
CityCenter Amstetten	2,53	1,63	+		-	
Begrünte Stiegenaufgänge City Garage Graz	-		-		80	11,11
The Harmonie Vienna Hotel Wien	2		-		-	
Institut für Physik Humboldt Universität Berlin	+		0,54	0,19	-	
MFO-Park Zürich	+		29	1,71	-	
Stadthaus M1 Freiburg im Breisgau	13,78	22,87	-		-	
Peter-Lamar-Platz in Dillingen, Bayern	-		-		22,3	1,01
<b>Durchschnittskosten</b>	<b>6,10</b>	<b>12,25</b>	<b>34,53</b>	<b>4,07</b>	<b>34,83</b>	<b>5</b>

Tabelle 5: Pflegekosten unterschiedlicher Beispielobjekte, die Preise sind € pro Quadratmeter pro Jahr. + steht für Kombination mehrerer Begrünungsmaßnahmen. (\*der Herstellungskosten) Quellen der Tabelle sind (GRÜNSTATGRAU Forschungs- und Innovations-GmbH 2019) und durchgeführte Erhebungen von Objekten.

### 3.1.7. Ermittlung der Unterhaltspflege einer bodengebundenen Begrünung

Um die tatsächlichen Pflegekosten für eine bodengebundene Begrünung mit Kletterpflanzen zu ermitteln, wurde ein Beispielobjekt ausgewählt und von 17 Gartenbauunternehmen, welche Pflege in ihrem Arbeitsportfolio haben, unverbindliche Angebote zur Pflege ebendieser eingeholt. Die zu tätigenen Arbeitsschritte wurden aus der Richtlinie der Forschungsgesellschaft Landesentwicklung Landschaftsbau (2018) und dem Leitfaden für Gebäudebegrünung der Stadt Wien (2013) abgeleitet.

Das Beispielobjekt ist mit *Parthenocissus tricuspidata* ohne Rankhilfe und mit *Wisteria sinensis* mit Rankhilfe begrünt. Es hat eine Höhe von rund 12 m und eine Breite von 25 m. Dies entspricht einer

Gesamtfläche inkl. Fenstern von 300 m<sup>2</sup>. Das Beispielobjekt befindet sich in Wien, der Überwuchs an den Fenstern macht einen Pflegedurchgang sowie Kontrolle der Pflanzen notwendig.

Arbeitsaufgaben für die Angebotslegung waren:

- Entfernen von abgestorbenen Pflanzenteilen
- Fenster, Fensterläden und Dach von Bewuchs freihalten
- Überprüfung der Vitalität der Pflanzen

Fünf der 17 Firmen haben abgesagt, mit der Begründung, dass sie nicht spezialisiert genug für die Aufgabenstellung sind. Von sieben Firmen ist keine Rückmeldung gekommen, die restlichen Firmen haben ein unverbindliches Angebot gelegt. Positionen, welche in den Angeboten enthalten waren:

- Einrichten der Baustelle
- Erwirken eines Halteverbots bei der MA46
- Arbeitszeit (diese variiert zw. 1-2 Tage)
- Maschinenmiete, Hebebühne bzw. LKW-Arbeitsbühne
- Abtransport des anfallenden Grünschnitts



*Abbildung 7: Beispielobjekt zur Ermittlung der Pflegekosten von bodengebundenen Fassadenbegrünung in Wien (Pfeiffer 2018).*

Die Angebote hatten eine Schwankungsbreite von 1.314 € bis 2.622 € inkl. Umsatzsteuer (Tabelle 6), dies entspricht einem Quadratmeterpreis im Mittel von 6,08 €. Durch Streichen des teuersten und billigsten Angebots entsteht ein Durchschnittspreis von 5,76 €/m<sup>2</sup>. Bei einem durchschnittlichen Pflegeintervall von drei Jahren für bodengebundene Begrünungen mit Kletterpflanzen entsteht ein Quadratmeterpreis pro Jahr von rund 2 €. Die Angaben von 10-20 €/m<sup>2</sup> pro Jahr in der Publikation von Pfoser (2013) und jene von Hollands und Korjenic mit 34,14 € erscheinen zu hoch im Vergleich mit dem erhobenen Beispielobjekt. Jener Quadratmeterpreis, welcher von Perini (2011b) mit 2,81 €/m<sup>2</sup> für ein 225 m<sup>2</sup> großes Objekt ermittelt wurde, liegt sehr nahe an den hier erhobenen Kosten.

Arbeitsschritte	Halteverbot MA46	Einrichten der Baustelle	Arbeitszeit	Maschinenmiete	Abtransport Grünschnitt	Preis (€)
Angebot 1	X	X	1 Tag	X	X	1.999
Angebot 2		X	1 Tag	X	X	1.450
Angebot 3			1 Tag		X	1.314
Angebot 4	X	X	1 Tag	X	X	2.622
Angebot 5		X	1 Tag	X		1.740
<b>Durchschnittspreis</b>						<b>1.825</b>

Tabella 6: Arbeitspositionen der Angebote mit entsprechendem Endpreis inklusive Umsatzsteuer.

### 3.1.8. Marktanalyse zum Thema Pflege von Vertikalbegrünungen

Faktoren, die den Markteintritt erschweren, sind die Errichtungskosten von Fassadenbegrünungen, die laufenden Kosten der Wartung und Pflege sowie der Nachweis von Lebenszykluskosten. Durch wartungsintensive Systeme, welche nicht ökonomisch betrieben werden können und vergleichsweise hohe Errichtungskosten aufweisen, wird das Image der Branche in Mitleidenschaft gezogen (Peritsch 2017). Auch Riley (2017) zeigte, dass die Kosten zur Errichtung von Vertikalbegrünungen das größte Hindernis für deren Verbreitung sind. Nichtsdestotrotz steigt das Interesse an der Implementierung von Vegetation in die Architektur (Perini und Ottelé 2014). Wesentlich in der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Vertikalbegrünungen ist der übergeordnete Nutzen, welcher nur schwer abzubilden ist. Die Kosten werden meistens von einer bestimmten Person oder Gruppe getragen, wohingegen sich die Personen, durch die Reduktion der Luftschadstoffe, der Kühlung des städtischen Raums und dem verbesserten Mikroklima profitieren, nur schwer eingrenzen lassen (Hollands und Korjenic 2019).

Der Toleranzbereich für die Pflege von Fassadenbegrünungen ist gering, im Idealfall wollen die Endkund\*innen kein Geld dafür ausgeben. Somit wird Kritik an den laufenden Pflegekosten geäußert, da selbst gut durchdachte Systeme mit geeigneter Pflanzenauswahl auf Wartung angewiesen sind. Die Europäische Föderation für Bauwerksbegr nungsverb nde (European Federation Green Roofs and Walls 2015) beschreibt ebenfalls die Wartung und Pflege bei Bauwerksbegrünungen als ein finanzielles Hindernis, aber auch als eine potenzielle Marktlücke. In den meisten europäischen Städten werden Bauwerksbegrünungen als ein noch nicht standardisiertes Bauelement gesehen, die Positionierung als Mainstream-Technologie fehlt. Nicht fachgerechte Planung sowie unpassende Vorgaben bzw. Gesetzgebung und fehlende Förderungen sind ein Hindernis für den Markteintritt, welche es den Entscheidungstr ger\*innen erschwert, Bauwerksbegrünungen umzusetzen (European Federation Green Roofs and Walls 2015).

Eine wesentliche Herausforderung für eine dynamische Marktentwicklung im Bereich der Fassadenbegrünung wird es sein, effiziente Lösungen für die Wartung und Pflege von Vertikalbegrünungen anzubieten. Die Kompetenzfelder von Garten- und Landschaftsbauunternehmen müssen in den Bereichen der Industriekletter\*innen- und Hebetechnik erweitert werden, um die notwendigen Pflege- und Wartungsservices anbieten zu können (Peritsch 2017). Mit der wachsenden Anzahl an begrünten Fassaden, steigt auch der Pflegebedarf. Somit werden in Zukunft spezialisierte Firmen benötigt, die diese Arbeitsaufgaben fachgerecht durchführen können.

Peritsch (2017) nennt Potenziale, welche die Chance des Markteintrittes erleichtern könnten, zum Beispiel durch:

- Technische Innovationen für optimierte Fassadenbegrünungssysteme, wie beispielsweise Pflegewerkzeuge.
- Pflege mit Robotern und dem Augenmerk auf spezielle Fachgebiete wie beispielsweise Pflanzengesundheit.
- Innovative Geschäftsmodelle für Errichtung, Betrieb und Pflege von Fassadenbegrünungen (Leasing, Contracting, Bürgerbeteiligungsmodelle, Crowd-Fundings, Public-Private-Partnership-Konzepte).

Ebenso sieht die Europäische Föderation für Bauwerksbegrünungsverbände (European Federation Green Roofs and Walls 2015) ein Wachstumspotenzial von Arbeitsplätzen in folgenden Bereichen:

- Aus- und Weiterbildung, Kompetenzerweiterung
- Konferenzen und Netzwerke
- Beratung von angewandten, städtischen, grünen Infrastruktur Projekten
- Forschung und Entwicklung (Werkzeuge und Technologien, Synergien)

Den Markteintritt von Fassadenbegrünungen begünstigt zum einen die zunehmende Nachfrage von Endkund\*innen für gebäudeintegrierte Grünflächen, zum anderen eine steigende Anzahl von Stadtentwicklungsprojekten mit Bauwerksbegrünung. Das Interesse von Bauträger\*innen am Potenzial der Wertsteigerung von Immobilien durch Bauwerksbegrünung und die Zunahme an gesetzlichen Regelungen, wie städtische Bauordnungen zur Stadtbegrünung, wird die zukünftige Nachfrage steigern. Des Weiteren bestätigen wissenschaftliche Studien und Untersuchungen die ökonomischen, sozialen, klimatischen und ökologischen Potenziale und fördern die Verbreitung und Weiterentwicklung dieser Technologien. Auch das Interesse der Medien an einem positiv besetzten Thema wie lebenswerte, nachhaltige und gesunde Städte beschleunigen die Markteinführung. Fassadenbegrünungen sind ein globales Zukunftsthema mit dem wachsenden Potenzial für zukünftige Arbeitsplätze (Peritsch 2017).

### **3.1.9. Umfrageergebnisse des Green Market Reports (GMR)**

Die nachfolgenden Auszüge sind Teil einer ersten Vorab-Publikation und beinhalten für DRoB relevante Ergebnisse:

#### **(1) Das Leistungsangebot Pflege, Wartung und Instandhaltung**

Im Zuge der Umfrage (n=30) im Rahmen des Austrian Green Market Report wurde ermittelt, welche Änderungen bezüglich des Angebots an Dienstleistungen im Bereich der Wartung, Instandhaltung und Pflege Unternehmen derzeit planen.

Es ist zu erkennen, dass die meisten Unternehmen (84%) auch zukünftig ihr Angebot an Pflege von Gebäudebegrünungen erweitern wollen. Es gibt jedoch auch Unternehmen, die nicht auf Wartung und Pflege fokussiert sind. Etwa 13% der befragten Unternehmen möchten derartige Dienstleistungen zukünftig neu anbieten und verfügen bisher nicht über ein derartiges Angebot. Drei Prozent möchten Dienstleistungen im Bereich Pflege zukünftig nicht mehr anbieten.

Wartung und Pflege kann daher durchaus als interessanter Markt für die Zukunft gesehen werden, da sich bei steigendem Bedarf immer mehr Unternehmen auf dieses Geschäftsfeld fokussieren können. Auch wird durch die steigende Komplexität und Größe der Anlagen eine Spezialisierung der Unternehmen unabdingbar, dementsprechend auch das Erschließen von neuen Kompetenzen sowie eine Erhöhung der Effizienz im Serviceprozess. Das Vorliegen von Daten zu Begrünungen (Drohnen: visuell, Performance) zur Vorausplanung von Pflegeeingriffen, als auch der Einsatz von Technik bzw. der Einsatz von Robotern könnten durchaus zur Effizienz und Erleichterung der Arbeit beitragen.

## **(2) Hürden bei der Realisierung von Gebäudebegrünungen**

In Bezug auf die Realisierung von Gebäudebegrünungen wurden verschiedene Vertreter\*innen der Branche in ganz Österreich befragt. Dabei handelt es sich um Architekten\*innen, Landschaftsarchitekten\*innen, Garten- und Landschaftsbauer\*innen, System- und Komponentenhersteller\*innen und -händler\*innen. Bei der Fragestellung wurde zwischen den unterschiedlichen Begrünungsformen Dach, Fassade und Innenraum unterschieden. Ziel war es zu ermitteln, bei welcher Art am ehesten mit Hürden in der Umsetzung und Planung betreffend Pflege, Instandhaltung und Wartung gerechnet werden kann. Der Fokus der Unternehmen auf unterschiedliche Leistungen führt dazu, dass sich für die einzelnen Fragestellungen eine abweichende Anzahl an befragten Personen ergibt.

**Hürden bei der Realisierung von Dachbegrünungen:** Vorbehalte (z.B. dauerhafte Abdichtung, Lebensdauer) bzw. geringer Kenntnisstand zur Dachbegrünung der Auftraggeber\*innen. Die Branche sieht Hürden in der Dachbegrünung bei der Abdichtung und der generellen Lebensdauer des Daches in Bezug auf Statik und Struktur. So müssen etwa die ordnungsgemäße Instandhaltung sowie regelmäßige Überprüfungen vorausgesetzt werden, wodurch die regelmäßige Pflege und Wartung an Bedeutung gewinnt. Mehr als die Hälfte der befragten Unternehmen (n = 45) ist sehr häufig (9%) oder häufig (59%) mit Hürden vor und während der Realisierung von Dachbegrünungen konfrontiert. Nur 25% sind selten bzw. 7% nie damit konfrontiert. Der Aspekt der Dachabdichtung, welcher sich auf die generelle Lebensdauer der Anlage und des Gebäudes bezieht, ist das größte Hemmnis. Dies muss daher im Zuge der Planung maßgeblich berücksichtigt und an den individuellen Auftrag angepasst werden.

**Hürden bei der Realisierung von Fassadenbegrünungsprojekten:** Vorbehalte (z.B. Schädigung der Fassade, Optik, Insekten) bzw. geringer Kenntnisstand zur Fassadenbegrünung bei potenziellen Auftraggeber\*innen. In Bezug auf Hürden in der Realisierung von Fassadenbegrünungen geben 20% der Befragten (n = 35) an, sehr häufig und 68% häufig mit Vorbehalten bezüglich Schädigung der Fassade, der Optik und Insektenbefall konfrontiert zu werden. Diesen Vorbehalten könnte ein Wissenstransfer an die Auftraggeber\*innen über die ordnungsgemäße Instandhaltung und Pflege der Fassadenbegrünung entgegenwirken. Im Vergleich zu den Dachanlagen besteht bei den Fassadeninstallationen eine höhere Anzahl an Hürden. Dies lässt sich durch die komplexere beziehungsweise individuellere Bauweise erklären. So müssen hierbei weitaus mehr technische Installationen, wie etwa bei einem Flachdach, gesetzt werden. Auch müssen die Möglichkeiten der Bewässerung und der Pflege im Vorhinein in die Planung miteingezogen werden. Angemerkt wurde auch der Befall von Insekten und die Beschädigung der Fassade selbst. Diese müssen durch vorherige Schutzmaßnahmen und regelmäßige Pflegedurchgänge weitestgehend vermieden werden.

### **(3) Hürden bezüglich Pflege, Wartung und Instandhaltung von Gebäudebegrünungen**

Die Pflege der installierten Grünanlagen ist maßgeblich für die Gesundheit der Pflanzen, deren Funktion, den Zustand des Gebäudes (Dichtheit, Statik) und für das allgemeine Erscheinungsbild. Hierbei muss zwischen den Installationsorten Dach und Fassade unterschieden werden. So ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten des Zugangs für Servicepersonal oder der Installation von Bewässerungs- bzw. Beleuchtungsanlagen. Zudem ist die Akzeptanz standardisierter Pflegemaßnahmen (Dachbegrünung) bei Auftraggeber\*innen gering.

Im Bereich Dach wurden die größten Hürden bezüglich der Pflege angegeben. Dies ist vor allem der Zugänglichkeit geschuldet. So müssen nicht nur Mensch und Material, sondern auch die Bewässerung auf das Dach gebracht werden. Zusätzlich benötigt es oftmals einer Absturzsicherung sowie speziellen Vorrichtungen, um den Zugang zu ermöglichen. Es wurde auch angemerkt, dass bezüglich der Pflege die Unterscheidung zwischen Intensiv- und Extensivdach erfolgen muss, da durch ein intensiv begrüntes Dach ein mehrfach höherer Pflegeaufwand besteht.

Bei der Fassade besteht eine relativ ähnliche, aber etwas geringere Anzahl an Hürden in Bezug auf die Pflege im Vergleich zur Dachbegrünung. Auch hier ist oftmals der Zugang zu höher gelegenen Anlagen schwierig, auch wenn manche Anlagen vom Boden aus gepflegt werden können. Mehrere Teilnehmer\*innen haben angemerkt, dass die Bewässerung oftmals unterschätzt und teilweise nicht vollkommen in der Planung berücksichtigt wird. So fehlt die Aufklärung der Interessenten\*innen darüber, wie viel Wasser über das Jahr benötigt wird, oder dass sich Leitungswasser nicht immer für das Bewässern eignet. So sollte die Bevorratung von Wasser (z.B. Regenwasser) für die Bewässerung im Grundplan berücksichtigt werden.

#### **3.1.10. Fördermaßnahmen der Städte in Bezug auf Fassadenbegrünung**

Gebäudebegrünungen schaffen ein grünes und nachhaltiges Stadtbild, die Pflege der Anlagen wirkt sich maßgeblich auf das Image der Stadt aus. Somit liegt es nahe, dass die Stadtverwaltung an einem gepflegten Erscheinungsbild der Pflanzen sowie funktionstüchtigen und ordnungsgemäß gewarteten Gebäudebegrünungen interessiert ist.

Daher wurden ausgewählte Städte und Gemeinden in Österreich bezüglich der Förderprogramme für Bauwerksbegrünungen in ihrer Stadt befragt. Ziel war es, in Erfahrung zu bringen, ob die Städte die Förderungen für die Begrünung von Fassaden nur in Verbindung mit verpflichtenden Pflegemaßnahmen zur Verfügung stellen und ob diese Bedingung von den Verantwortlichen als sinnvoll angesehen wird. Über die Hälfte der befragten Stadtverwaltungen (n = 50) sehen die Vereinbarung von Pflegemaßnahmen bei der Festlegung von Bedingungen für die kommunalen Förderungen von Fassadenbegrünungen als sehr sinnvoll (56%) bzw. eher sinnvoll (36%) und zielführend an, nur 8% lehnen diese Maßnahme eher ab. Vier der teilnehmenden Städte geben an, dass bereits ein Förderprogramm für Fassadenbegrünungen angeboten wird. Auch verbinden zwei dieser Stadtverwaltungen die Vergabe dieser Förderung an die Bedingung, im Vorhinein Vereinbarungen über Pflegemaßnahmen zu treffen. Eine Stadt in Niederösterreich gibt an, dass Pflegemaßnahmen sehr sinnvoll sind, jedoch nicht verpflichtend vorgeschrieben werden sollten und sieht die freiwillige Verantwortung im privaten Bereich. Anders ist es laut Angabe bei der Dachbegrünung. Hier muss für Förderungen ein vollständiger, verpflichtender Pflegeplan vorgelegt werden. Zusätzlich werden auch weitere Belege wie eine Artenliste, ein Statiknachweis,

Gestaltungsplan, Nachweis über Asbest- und PVC-freie Dachabdichtungsmaterialien, sowie der Verzicht auf Biozideinsatz in der Pflege verlangt.

Es ist zu erkennen, dass die Städte verschiedene Herangehensweisen haben und auf unterschiedlichem Entwicklungsstand in Bezug auf Begrünung von Gebäuden und den damit zusammenhängenden Förderungen bzw. Vorgaben sind. Alle Stadtverwaltungen, die bereits länger im Bereich Gebäudebegrünung aktiv sind, beziehen den Abschnitt der Pflege und Wartung in ihre Überlegungen ein. Städte, die neu ins Thema einsteigen, orientieren sich an Best-Practise Erfahrungen. Es ist daher ein durch zunehmende Verbreitung von Regulativen und Zuschüssen wachsendes Marktsegment im Bereich Pflege/Wartung prognostizierbar.

## **3.2. Monitoring von Vegetation mittels unterschiedlicher Drohnensensorik**

### **3.2.1. Vitalitätsmonitoring im Zuge des Trockenstressversuches im Glashaus**

Die Veränderung des volumetrischen Wassergehalts in den Töpfen der vier Bewässerungsgruppen während des Versuchszeitraums ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Gruppen „optimale (300 ml)“ und „geringe Wasserversorgung (50 ml)“ waren über die gesamte Versuchslaufzeit sehr ähnlich. Trotz der täglich höheren Wasserversorgung von 250 ml war der Wassergehalt nicht viel höher. Lediglich im Zeitraum von 02.06. bis 04.06.2019 war der Wassergehalt in der Gruppe mit geringer Wasserversorgung deutlich geringer, was auf die höhere Temperatur und Sonnenstrahlung in diesem Zeitraum zurückzuführen ist. Zwischen 14.05. und 17.05.2019 ist die Bewässerungsanlage ausgefallen, was für die Gruppen „keine Wasserversorgung“ und „Staunässe“ keine Konsequenzen hatte. Das Substrat in der Behandlung mit Staunässe hatte einen volumetrischen Wassergehalt zwischen 0,35 und 0,48 und war vollkommen gesättigt. Das Substrat in den Töpfen ohne Bewässerung trocknete innerhalb von fünf Tagen komplett aus. Mit 05.06.2019 wurde die Bewässerung für alle Gruppen abgedreht und der Versuch beendet.

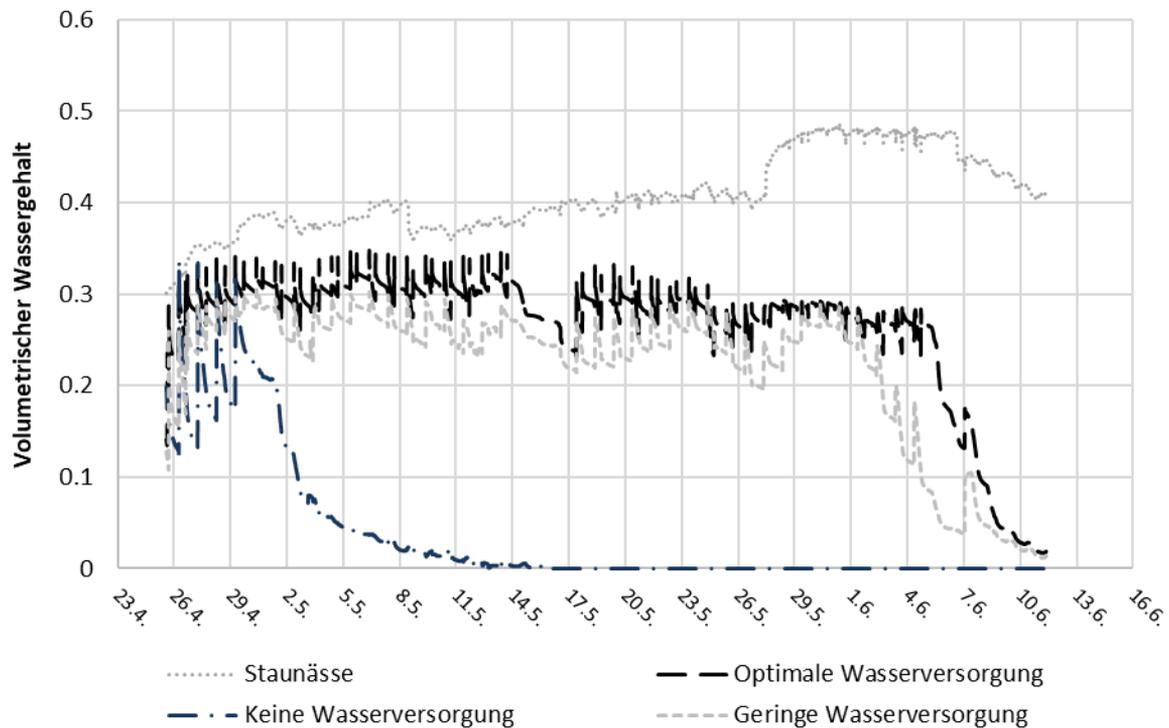


Abbildung 8: Diagramm der Bodenfeuchtemessung in den Töpfen der unterschiedlichen Bewässerungsstufen innerhalb der Versuchslaufzeit, die horizontale Achse gibt die Versuchslaufzeit an und die vertikale Achse den volumetrischen Wassergehalt kalibriert nach der TOPP Formel (1980)

Die Messungen der stomatären Leitfähigkeit mittels Porometer zeigten, dass *Geranium sanguineum* und *Heuchera x cultorum* bereits fünf Tage nach Abschalten der Bewässerungsanlage eine reduzierte stomatäre Leitfähigkeit aufwiesen. Nach weiteren drei Tagen traf dies auch für die anderen beiden Arten zu. Nach 14 Tagen, am 13.05.2019 zeigten sich bei Pflanzen ohne Wasserversorgung aller beobachteten Arten deutliche Stressreaktionen. Bei den Arten *Brunnera macrophylla* und *Heuchera x cultorum* zeigten auch die Pflanzen der Gruppe mit Staunässe Stressreaktionen (Abbildung 9).

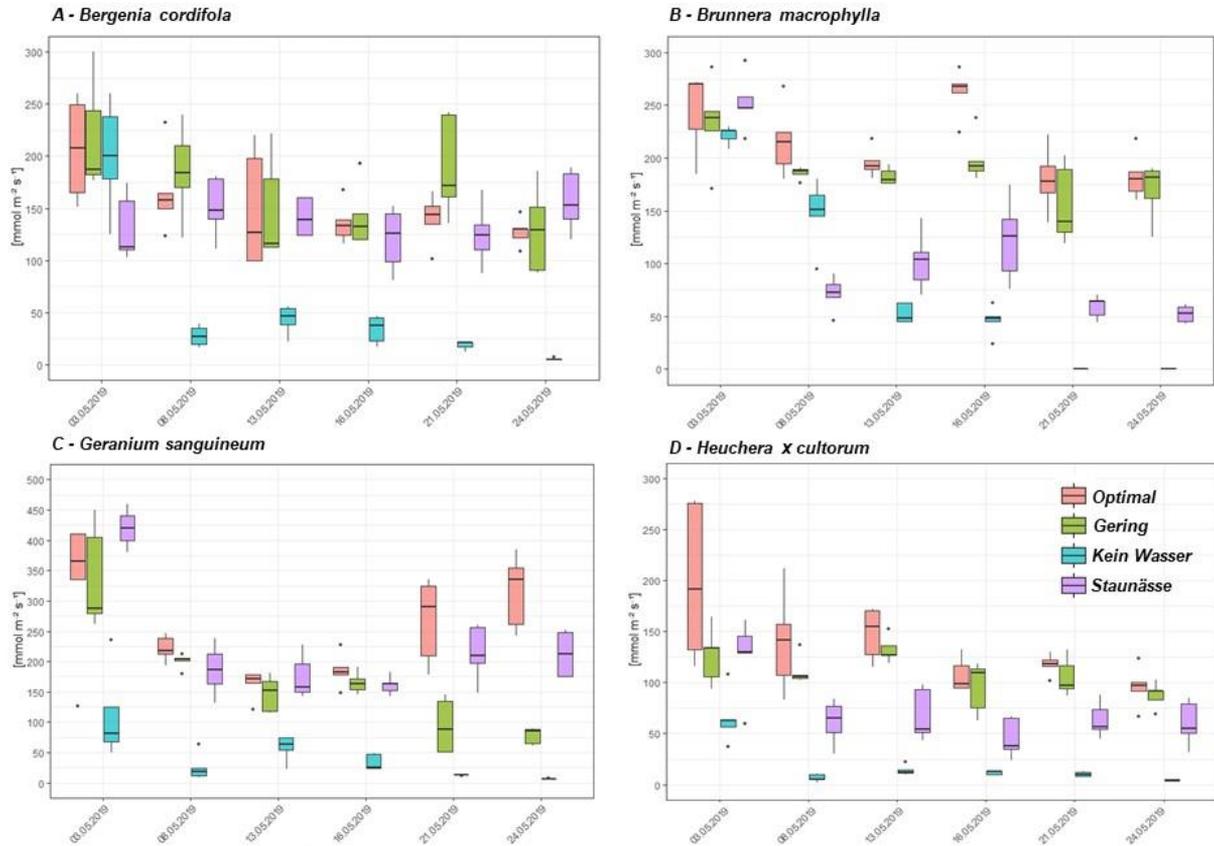


Abbildung 9: Messungen der stomatären Leitfähigkeit der vier verschiedenen Arten *Bergenia cordifolia*, *Brunnera macrophylla*, *Geranium sanguineum* und *Heuchera x cultorum*, unter den verschiedenen Bewässerungsstufen von 03.05.2019 bis zum 24.05.2019.

Die RGB-Aufnahme in Abbildung 10 wurde mit der Zeitrafferkamera gegen Ende des Trockenstressversuches aufgenommen. Bei allen vier Arten sind die Pflanzen der Gruppe „keine Wasserversorgung“ deutlich geschwächt bzw. bereits abgestorben. Am deutlichsten wurden Stresssymptome bei *Brunnera macrophylla* festgestellt, wo die Pflanzen ohne Wasserversorgung bereits Ende Mai, nach 20 Tagen abgestorben waren, und somit bei den letzten Messungen nicht mehr berücksichtigt werden konnten, und jene mit Staunässe deutliche Vergilbungserscheinungen zeigten. Bei den anderen Arten waren die Veränderungen der Blätter deutlich geringer und auch erst später bemerkbar. Die visuell eindeutig ersichtlichen Symptome traten deutlich später auf, als die Stresssymptome mittels Porometer nachgewiesen wurden.

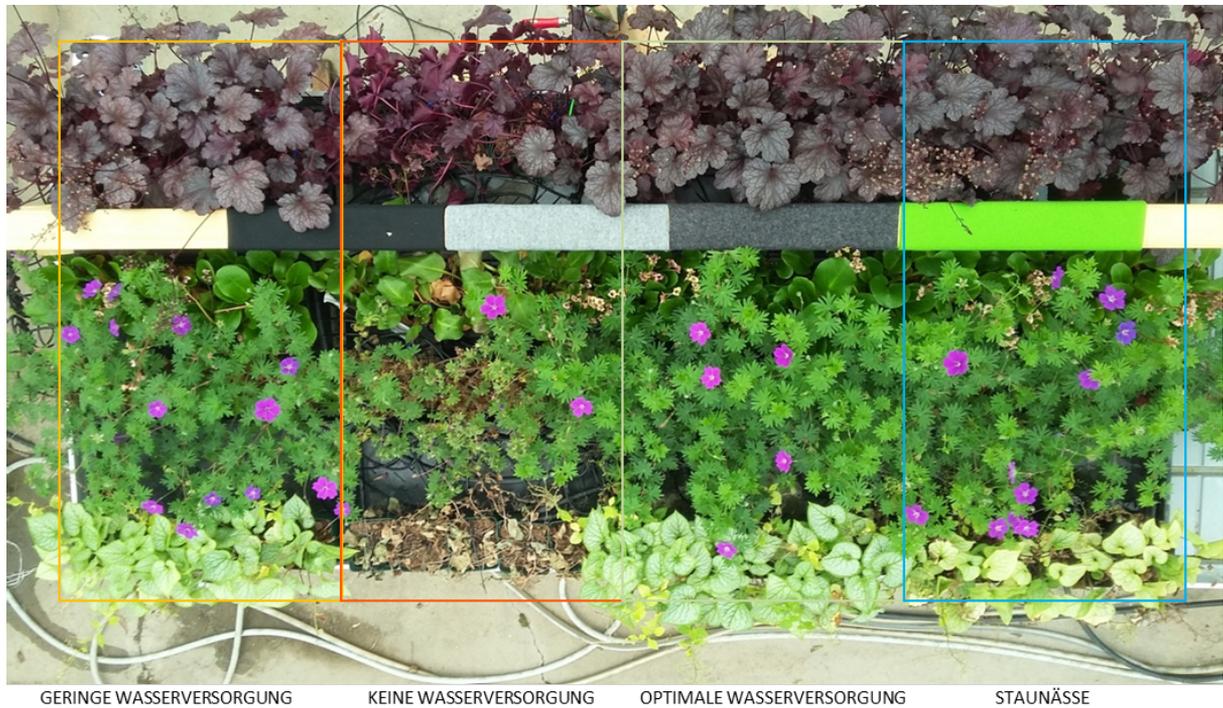


Abbildung 10: RGB Aufnahme der Zeitrasterkamera des Trockenstressversuchsaufbaues zum Versuchsende (06.09.2019). Die künstlichen Targets in unterschiedlicher Farbe dienen als Referenz für die Multispektralkamera.

### (1) Auswertung der multi- und hyperspektralen Sensoren

Wie im Versuchsaufbau beschrieben, konnte die Multispektralkamera auf Grund der baulichen Gegebenheiten nicht in der optimalen Höhe montiert werden, wodurch nur Teile des Versuchsaufbaues erfasst wurden. Durch manuelle Verschiebung der Kamera wurden mehrere Fotos aufgenommen und diese anschließend zu einem Orthomosaik zusammengefügt. In Abbildung 11 ist beispielhaft ein aus den Aufnahmen vom 13.05.2019 erstelltes Orthofoto dargestellt.

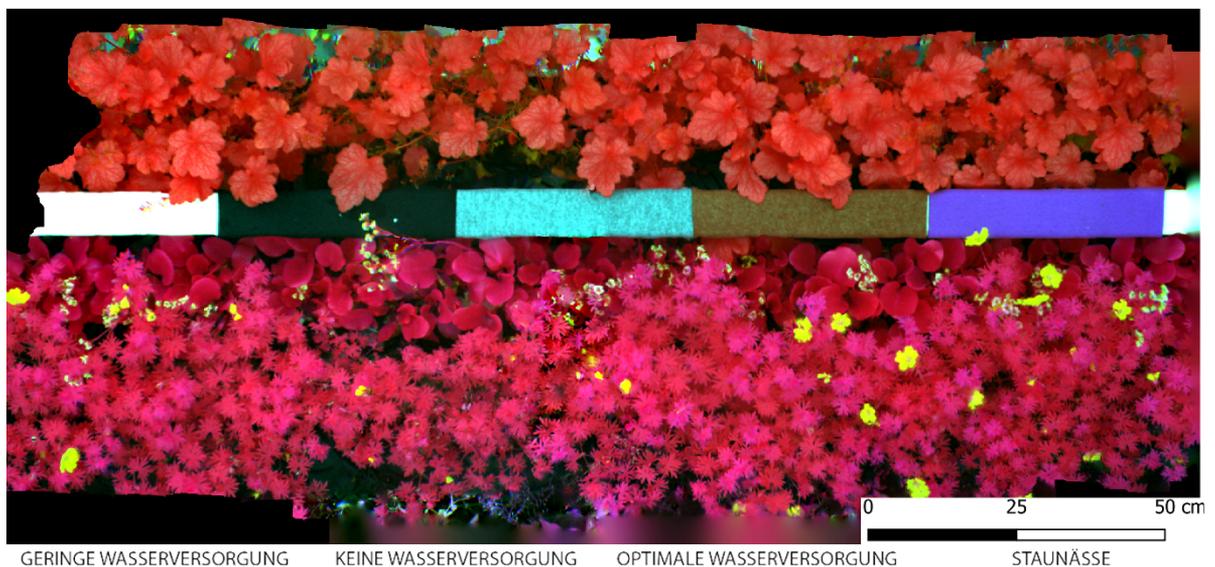


Abbildung 11: Multispektralaufnahme in Falschfarbendarstellung (R=NIR, G=Rot, B=Grün) des Trockenstressversuchsaufbaues am 13.05.2019. Die künstlichen Targets in unterschiedlicher Farbe dienen als Referenz für die Umrechnung von digital numbers (DN) auf Reflexionsgrad.

Für die Auswertung wurden primär die Messungen des Spektroradiometers verwendet, um verlässliche Messungen im Inneren des Glashauses sicherzustellen. Die Veränderung der spektralen Signaturen der Pflanzen ohne Wasserversorgung über die Zeit ist in Abbildung 12 für die vier untersuchten Arten dargestellt. Dabei wurden immer die letzten Messungen, bei denen noch keine Veränderung zur vorherigen Messung feststellbar waren, grün dargestellt und alle darauffolgenden in unterschiedlichen Rottönen. Bei *Brunnera macrophylla* sind ab dem 13.05. Veränderungen erkennbar, die bis zur letzten Messung dieser Gruppe am 23.05. stark zunehmen (Blätter waren bei den folgenden Messungen nicht mehr messbar). Es ist ein Anstieg im sichtbaren Bereich (verminderte Chlorophyllgehalte) und im SWIR (geringerer Wassergehalt) ersichtlich. Die Verluste der Zellstruktur führen zu den Veränderungen im Bereich des NIR. Bei *Geranium sanguineum* sind nur deutlich geringere Veränderungen zu einem späteren Zeitpunkt feststellbar. Ähnliches gilt auch für die beiden anderen Arten, bei welchen erst ab den 03.06. Veränderungen ersichtlich sind. Bei den Pflanzen der anderen Wasserregimegruppen waren keine oder nur geringe Veränderungen (z.B. *Brunnera macrophylla* mit Staunässe) feststellbar.

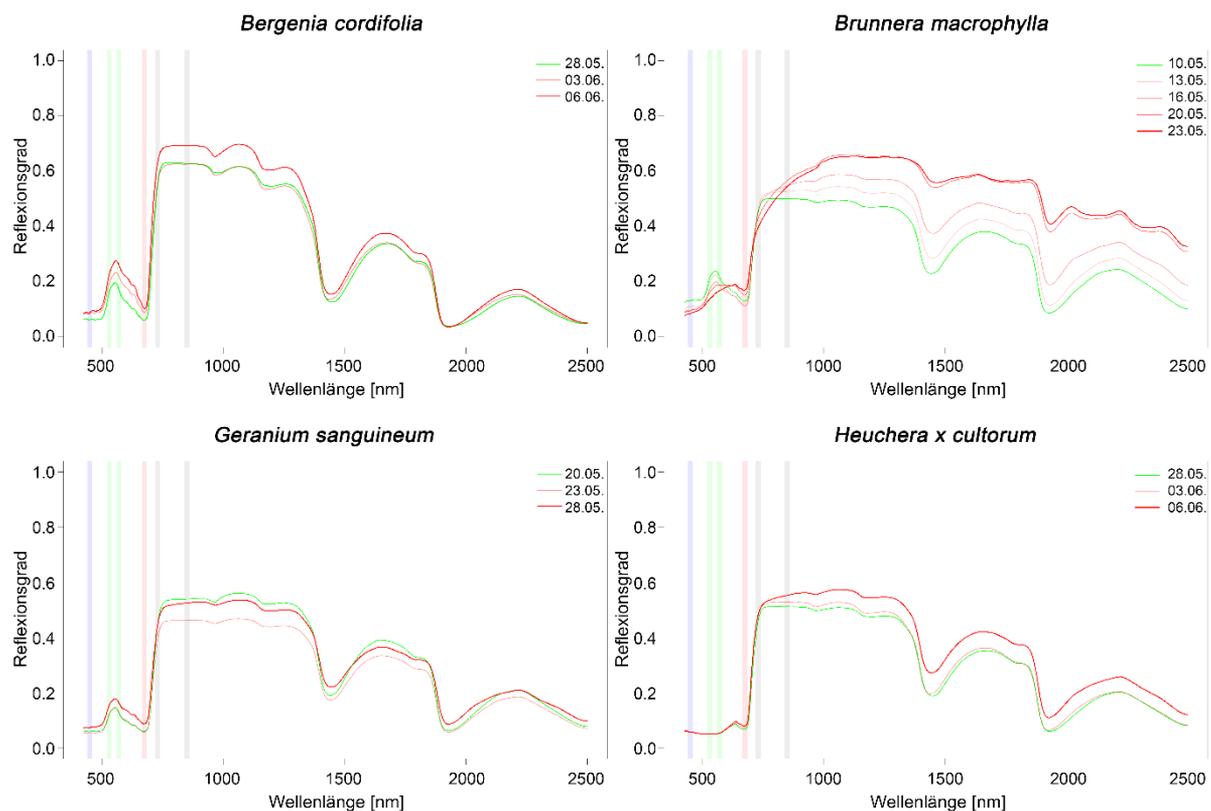


Abbildung 12: Spektrale Signaturen aus der Gruppe der Pflanzen ohne Wasserversorgung; in grün jeweils die letzte Messung, bei der keine Veränderung zu den vorherigen Messungen feststellbar war, dunkler werdende Rottöne kennzeichnen die zunehmende Veränderung. Die sechs Balken charakterisieren schematisch den Aufnahmebereich des Multispektralsensors.

In allen getesteten Indizes waren Veränderungen bei den gestressten Pflanzen feststellbar. Am deutlichsten und auch am frühesten zeigten die NDWI-Varianten den Wasserstress an. In Abbildung 13 sind die Verläufe des NDWI 2130 dargestellt. Bei *Brunnera macrophylla* und *Geranium sanguineum* ist die Wasserstressgruppe ab dem 13.05., bei *Bergenia cordifolia* ab dem 16.05. und bei *Heuchera x cultorum* bereits ab dem 02.05. bzw. eindeutig ab dem 10.05. von den anderen Gruppen unterscheidbar.

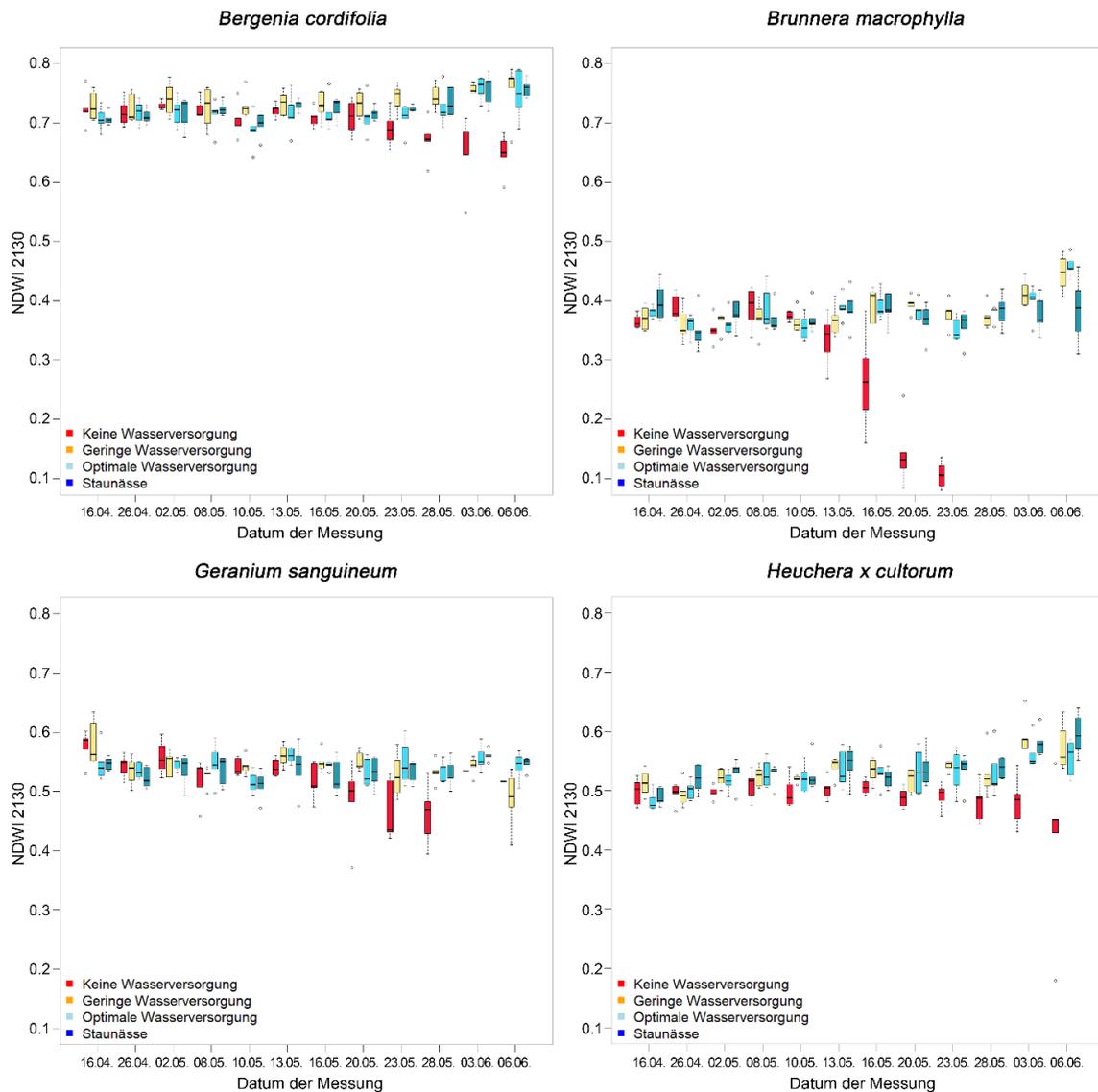


Abbildung 13: Änderung des NDWI 2130 der einzelnen Bewässerungsregime über die Zeit getrennt nach den vier untersuchten Pflanzenarten.

## (2) Auswertung der Thermaldaten

In Abbildung 14 ist ein Mosaik aus mehreren Aufnahmen des Thermalsensors vom 13.05.2019 dargestellt, in welchem deutliche Temperaturunterschiede zwischen der Wasserstress-Gruppe und der optimal bewässerten Gruppe erkennbar sind. Die Temperatur der Pflanzen mit Wasserstress ist eindeutig höher und die Aufheizung der Blätter durch die Sonne bzw. die reduzierte Transpirationsleistung wird in den Thermalaufnahmen sichtbar. Festzustellen war ein Unterschied in der Blattoberflächentemperatur von bis zu 10°C, welcher zur Kontrolle zusätzlich mit einem Infrarot-Thermometer gemessen wurde und sich auch mit der wissenschaftlichen Literatur deckt (Still et al. 2019). Unter Wasserstress wird ein Phytohormon (Abscisinsäure) im Blatt synthetisiert, welches das Verschließen der Spaltöffnungen (Stomata) bewirkt, um das Austrocknen der Pflanze so lange wie möglich hinauszuzögern. Unter Sonneneinstrahlung kann somit kein Wärmeausgleich über Transpirationsvorgänge durch die Poren stattfinden und die Pflanze erhitzt. Daher sind die Temperaturunterschiede zwischen den Stressgruppen an sonnigen und warmen Tagen deutlich stärker ausgeprägt als bei Bewölkung oder in der Nacht. Die Stressreaktionen der Versuchspflanzen zeigen sich sowohl in der stomatären Leitfähigkeit als auch in den zeitgleich erhobenen Thermaldaten.

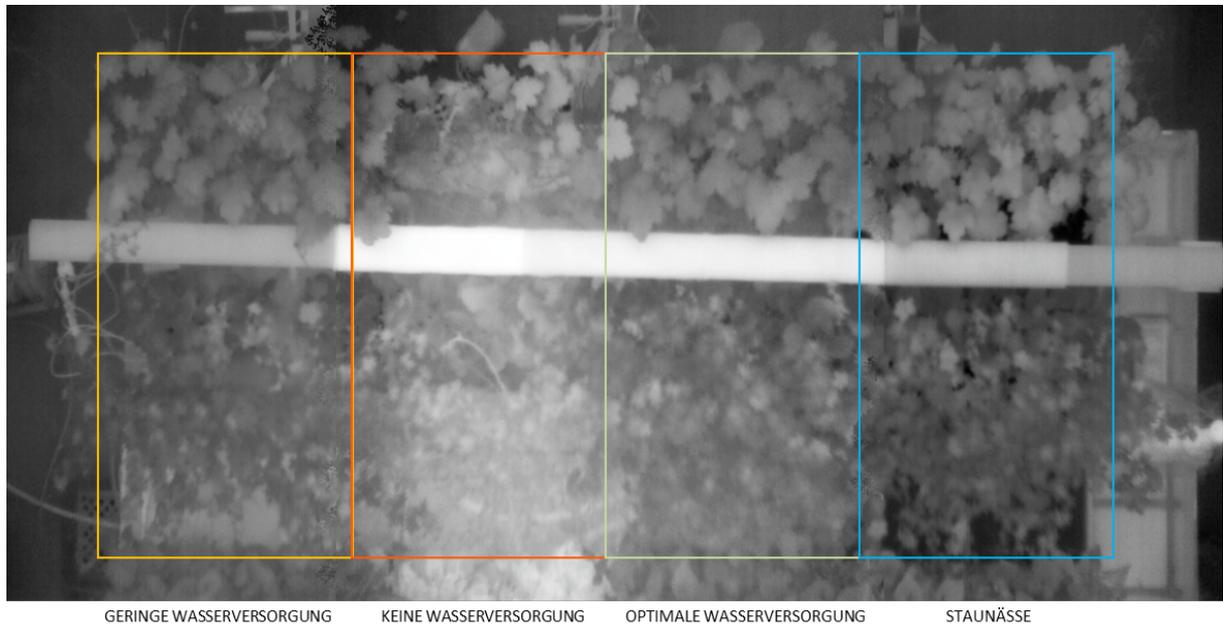


Abbildung 14: Thermalaufnahmen des Wasserstressversuchs vom 13.05.2019 in einer Gesamtaufnahme.

Zur Darstellung des Tagesverlaufs der Temperatur sind in Abbildung 15 ausgewählte Thermalbilder, über den Tag verteilt aufgenommen, dargestellt. Während die gestressten und optimal versorgten Pflanzen in den Abend-, Nacht- und Morgenstunden kaum nennenswerte Temperaturunterschiede zeigen, sind diese am Tag deutlich erkennbar.

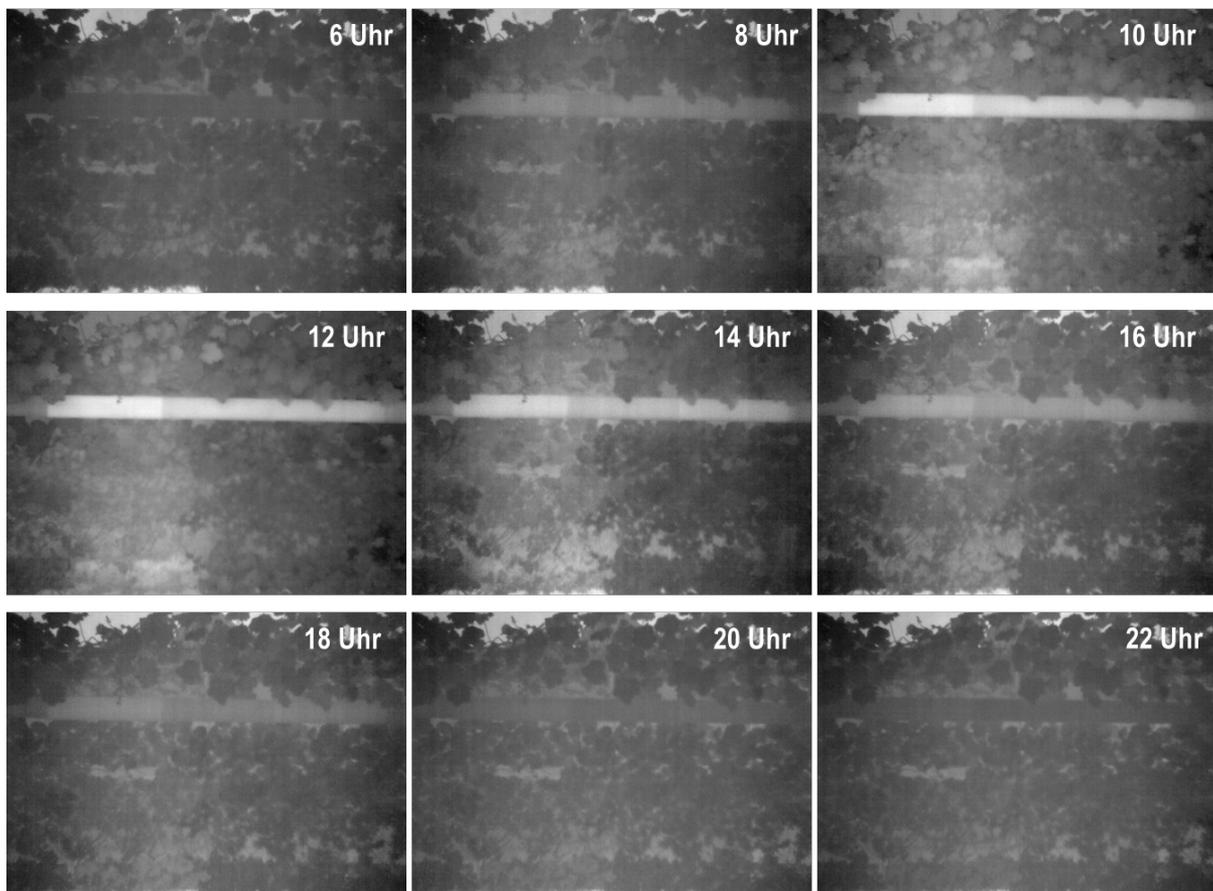


Abbildung 15: Detailaufnahmen der Gruppen keine (linker Teil der Detailaufnahmen) und optimale Wasserversorgung (rechter Teil der Detailaufnahmen) zu unterschiedlichen Tageszeiten (13.05.2019).

Noch deutlicher sind die Temperaturverläufe in Abbildung 16 ersichtlich. Die Abbildung zeigt die Strahlungstemperatur der beiden Gruppen keine bzw. optimale Wasserversorgung über die Zeit. Neben den Strahlungstemperaturen der Pflanzen ist auch der Verlauf der Glashaustemperatur dargestellt. Bedingt durch den Sonnenaufgang beginnt die Lufttemperatur anzusteigen und die Pflanzen beginnen mit der Photosynthese und Transpiration. Dies führt bei den Pflanzen mit optimaler Wasserversorgung zu einem Absenken der Strahlungstemperatur, während die Pflanzen, denen kein Wasser zur Verfügung steht, sich deutlich erhitzen. Die deutlichsten Temperaturunterschiede sind bei der Art *Brunnera macrophylla* zu sehen. Bei allen Pflanzenarten ist zu beobachten, dass sich die Strahlungstemperatur in den Nachtstunden wieder angleicht.

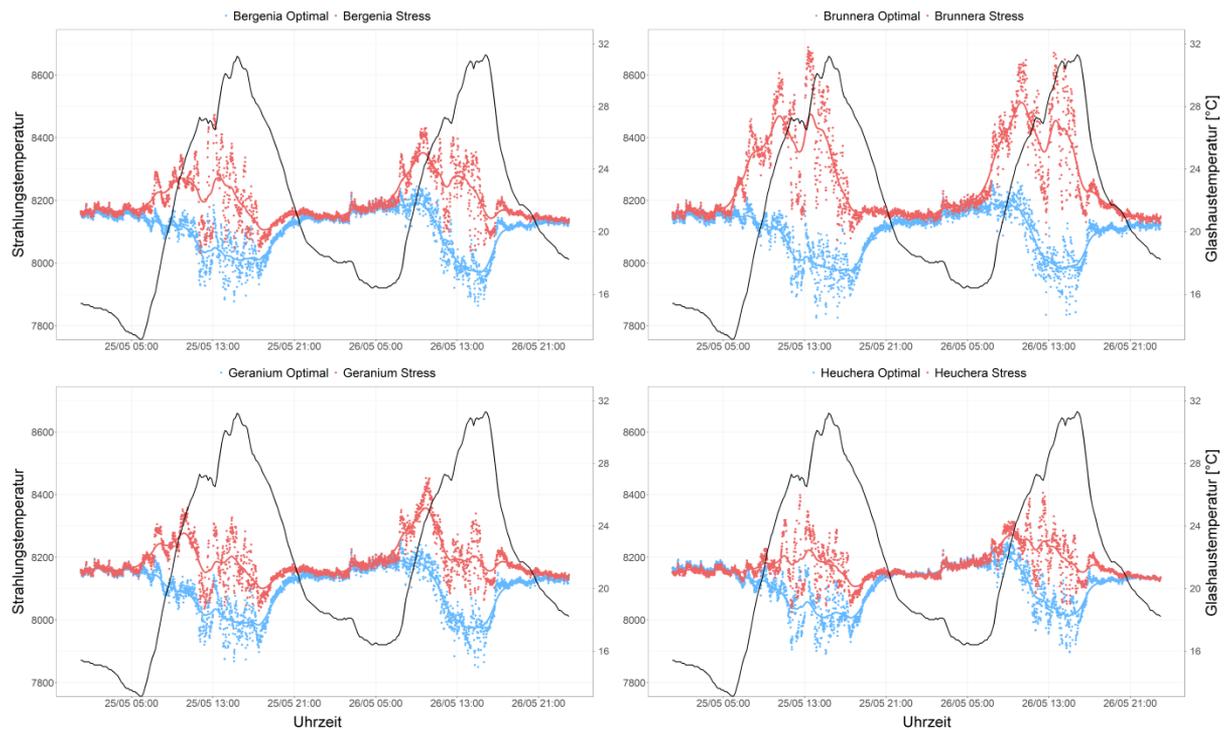


Abbildung 16: Vergleich der Strahlungstemperatur gemessen mit der Thermalkamera auf Pflanzenbereichen der vier untersuchten Arten aus den Gruppen keine (rot) bzw. optimale (blau) Wasserversorgung und der Glashaustemperatur (schwarz) an zwei warmen Tagen.

### 3.2.2. Erfassung der Blattfläche im Zuge des Blattschnittversuches

In Abbildung 17 sind die Multispektralaufnahmen in Falschfarbendarstellung zur Dokumentation des schrittweisen Zurückschneidens vitaler Pflanzen dargestellt. Die Pflanzen wurden in fünf Schritten völlig zurückgeschnitten und die dabei entnommene Blattfläche erfasst.

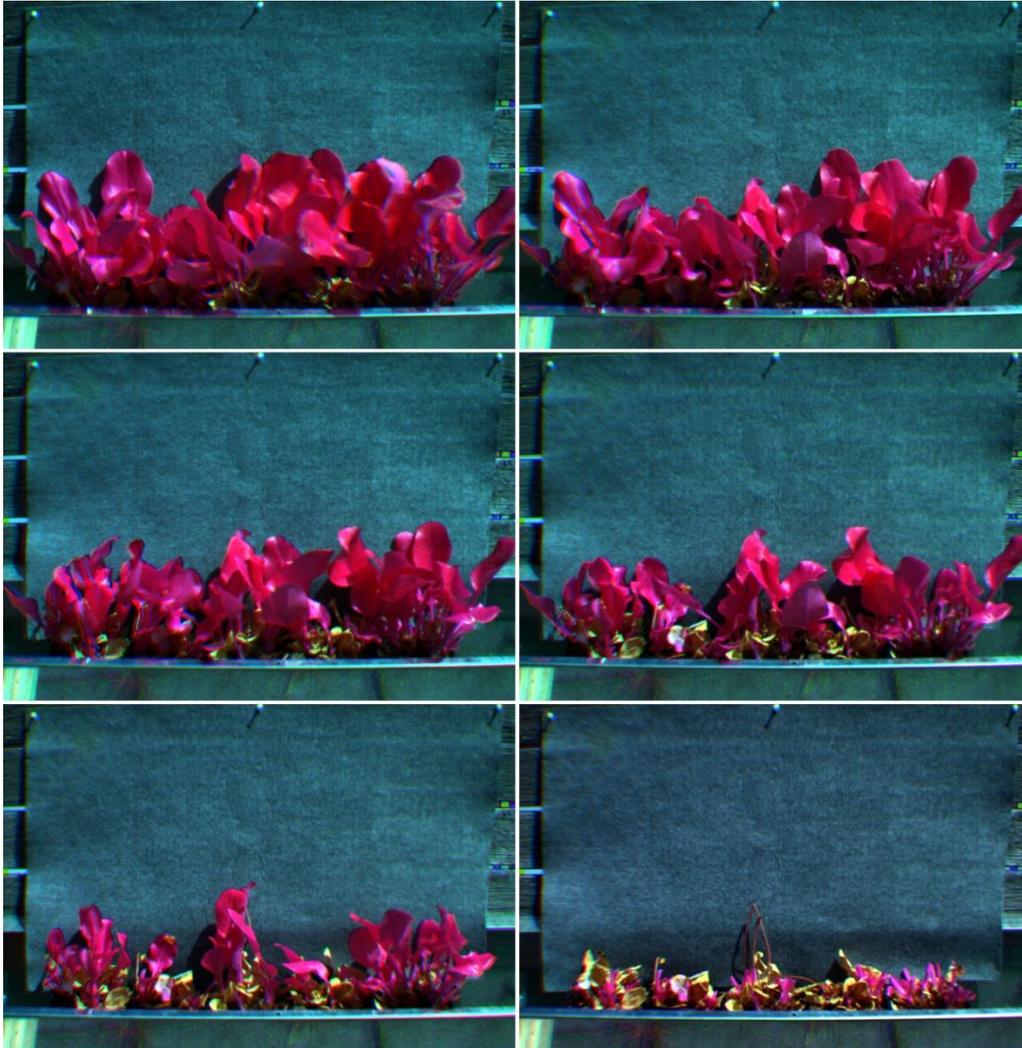


Abbildung 17: Dokumentationsschritte des Blattschnittversuchs in Falschfarbendarstellung (R=NIR, G= Rot, B= Grün) am Beispiel *Bergenia cordifolia*

Zusätzlich wurden aus den Daten Vegetationsindizes wie der NDVI berechnet. Der Vergleich der NDVI-Werte mit der Blattfläche der Pflanze ist in Abbildung 18 dargestellt. Der bekannte exponentielle Zusammenhang zwischen Blattfläche und NDVI (z.B. Darvishzadeh et al. 2008) ist deutlich erkennbar, ebenso die sogenannte Sättigung des NDVI bei Überschreitung einer bestimmten Blattmasse. Diese Effekte werden in der vorliegenden Studie noch durch die seitliche Betrachtung verstärkt. Bei den deutlich ausgelichteten Pflanzen ist der Zusammenhang daher gut sichtbar. Die Ergebnisse zeigen, dass mittels Multispektralaufnahmen Rückschlüsse auf die Blattfläche bzw. Biomasse von Vegetation auch bei seitlicher Betrachtung möglich sind. Dadurch können derartige Aufnahmen zur Erfassung, Quantifizierung und Überwachung der Zu- und Abnahme pflanzlicher Biomasse auch im Bereich Gebäudebegrünung verwendet werden.

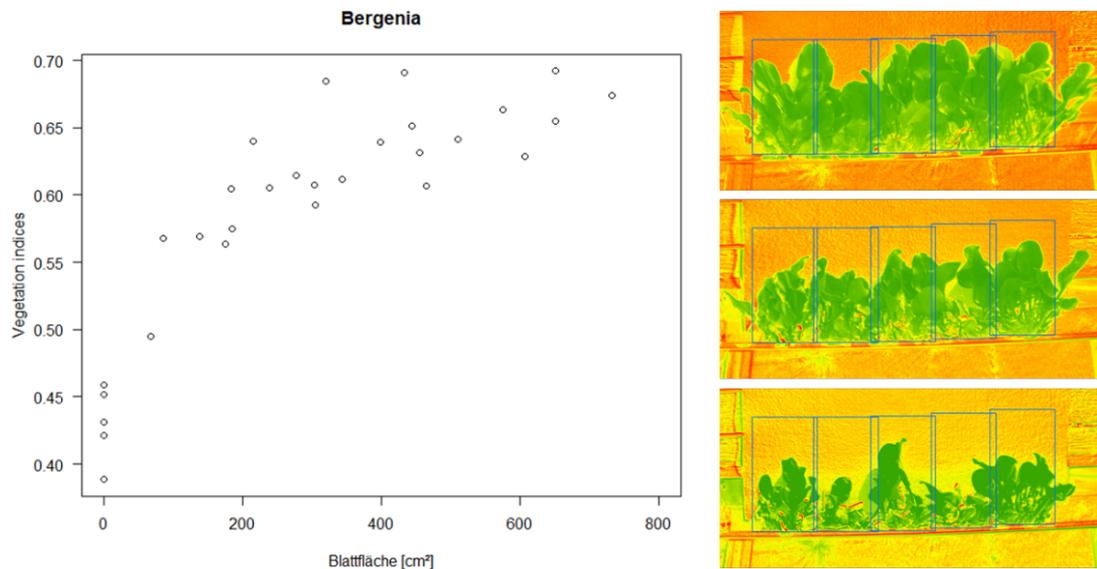


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Blattfläche von *Bergenia cordifolia* und dem Vegetationsindex NDVI (links) und Beispiele des berechneten NDVI von drei verschiedenen Schnittstufen wobei die Blattfläche (grün dargestellt) von oben nach unten abnimmt (rechts).

### 3.2.3. Einsatz von Drohnen für die Erfassung der Vegetation an Grünfassaden

#### (1) Auswirkung der Fassadenausrichtung auf die Aufnahmequalität der aufgenommenen Daten

Die Ergebnisse beziehen sich auf die Datenaufnahme von ähnlich bepflanzten, jedoch unterschiedlich ausgerichteter Grünfassaden. Es standen vier Fassadentypen (F1-F4) zur Verfügung, die sich durch unterschiedliche Bepflanzungen unterscheiden. Jeder Fassadentyp war zusätzlich mit drei Ausrichtungen (Nord, West und Süd) ausgeführt. Bei allen hier dargestellten Abbildungen wurden aus patentrechtlichen Gründen Systemkomponenten manuell ausmaskiert. Diese Ausmaskierungen hatten keinerlei Einfluss auf die Auswertung der Daten für die Zwecke des vorliegenden Projektes.

- Monotemporal (13:00 Uhr)

Die Aufnahmen der Grünfassaden mit unterschiedlicher Ausrichtung zur Mittagszeit zeigen, dass die unterschiedlichen Beleuchtungszustände große Auswirkung auf die Datenqualität haben. Vor allem bei reinen RGB-Aufnahmen sind die Nordwände deutlich schlechter beleuchtet, wodurch nahezu keine Unterscheidung zwischen Wand und Pflanzen möglich ist. Der seitliche Einfallswinkel der Sonnenstrahlung an der Westseite erzeugte eine bessere Bildqualität, aber auch einen sehr starken Schattenwurf. Die Aufnahmen der Südseite zeigten konstant gute Belichtung und damit gute Bildqualität. Durch die höhere Reflexion von Vegetation im Nahen Infrarotbereich wirkt sich die Ausrichtung etwas geringer auf die Datenqualität aus. Der Vergleich der Aufnahmen in Abbildung 19, bei welchen die Multispektraldaten in Falschfarben- oder Color-Infrared (CIR)-Darstellung gezeigt werden, unterstreicht diese Aussage. Trotz Beleuchtungsunterschiede kann die Vegetation bei allen Aufnahmen sehr gut erkannt und bewertet werden.

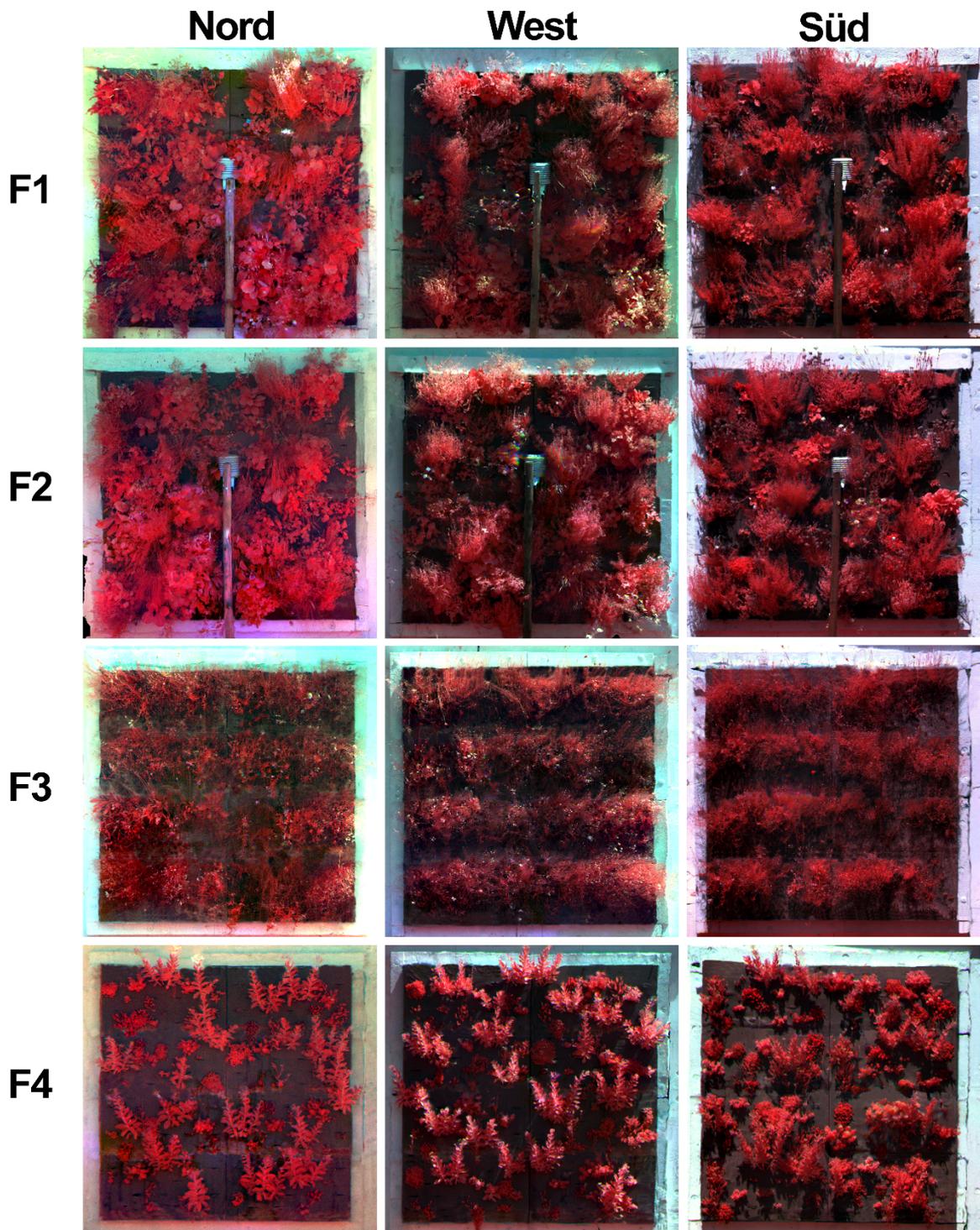


Abbildung 19: Veranschaulichung der Belichtungszustände in Falschfarbendarstellung der Multispektralaufnahmen unterschiedlicher Fassaden mit ähnlicher Bepflanzung (F1-F4) bei Nord, West und Süd-Ausrichtung der Fassade.

- Multitemporale Multispektralaufnahmen (09:45, 12:45 und 15:00 Uhr)

Um den Einfluss des Sonnenstandes in Kombination mit der Fassadenausrichtungen auf die Qualität der erfassten Daten zu untersuchen, wurden Multispektralaufnahmen der Fassaden zu drei verschiedenen Tageszeitpunkten aufgenommen. Zur Erstellung der multispektralen Orthophotos wurden stark überlappend Bildraten einzelner Teilbereich der begrünten Wände aufgenommen. Für die anschließenden Analysen konnten die Bildsequenzen mithilfe gängiger Photogrammetrie-Software über Image-Matching-Verfahren in zusammenhängende Orthophotos prozessiert werden.

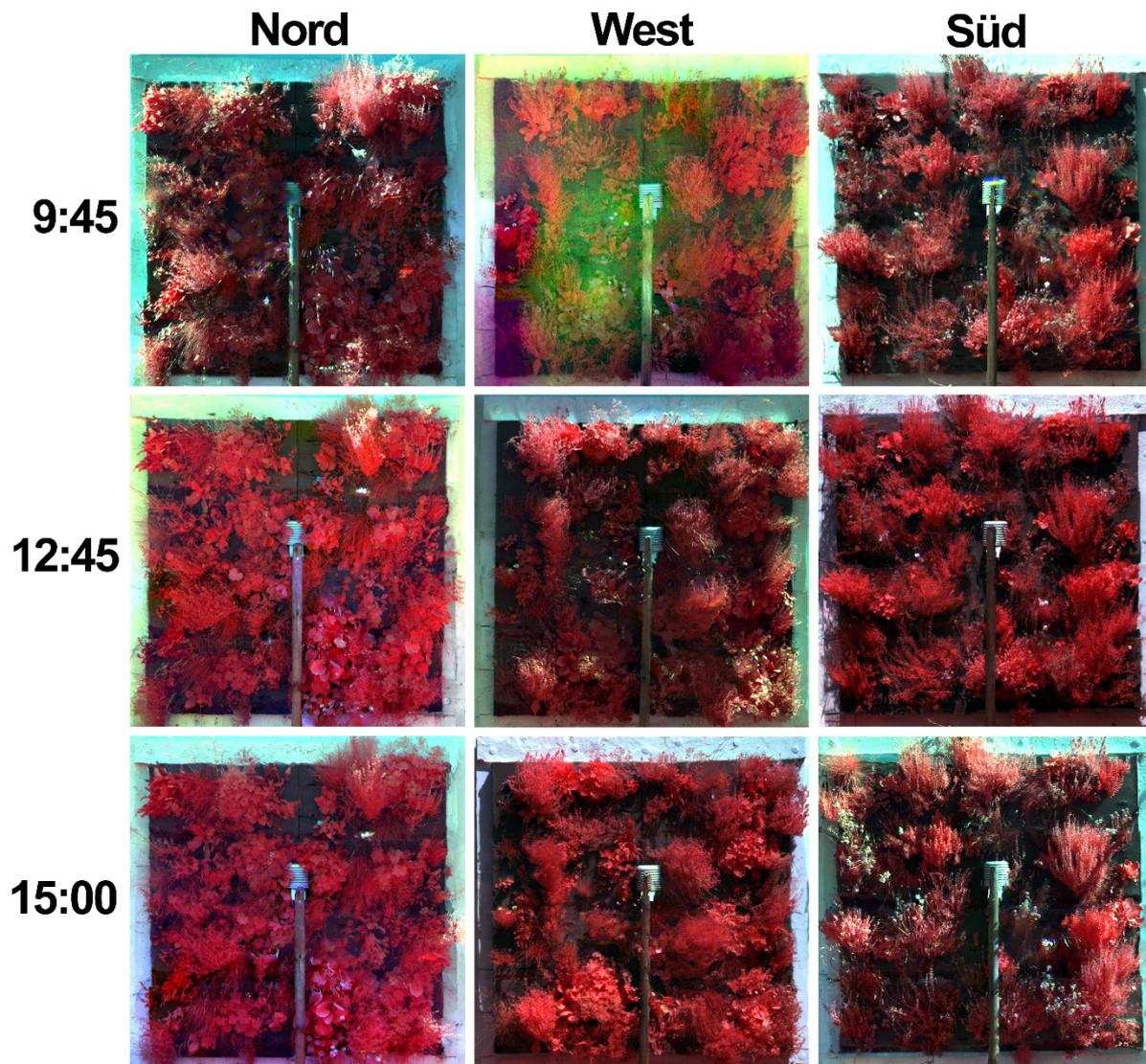


Abbildung 20: Orthophotos der drei unterschiedlich ausgerichteten Fassaden des Bepflanzungstyps F 1 zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten in Falschfarbendarstellung (R=NIR, G=Rot, B=Grün).

Ähnlich wie bei der oben beschriebenen Untersuchung der Ausrichtung sind die Beschattungseffekte in den Kanälen im sichtbaren Wellenlängenbereich deutlich größer als jene im Nahen Infrarot. Daher erfolgt die Gegenüberstellung der Orthophotos in Abbildung 20 wieder in Falschfarbendarstellung. Während bei der RGB-Aufnahme (nicht gezeigt) die Nordwand vor allem bei Aufnahme am Vormittag bzw. Nachmittag sehr geringe Kontraste aufweist, ist die Vegetation in Falschfarbendarstellung bei allen Aufnahmen gut erkennbar. Abstriche gibt es bei den Aufnahmen der Nordwand am Morgen bzw. der Südwand am Abend. Ebenso wirkt sich der niedrige Sonnenstand am Morgen negativ auf die Datenerfassung der westlich ausgerichteten Fassade aus, da das Gegenlicht in einem ungünstigen Einfallswinkel auf die Linse des Sensors fiel und folglich die Qualität der Aufnahme beeinträchtigte. Allgemein ist festzuhalten, dass bei seitlichem Sonneneinfall der erhöhte Schattenwurf der Vegetation die Auswertung erschwert, jedoch teilweise durch eine Nachbearbeitung der Bilddaten minimiert werden kann. Neben dem Sonnenstand und der Ausrichtung der Fassade ist bei Grünfassaden auf Wohnhäusern zusätzlich mit Spiegelungseffekten, zum Beispiel durch Fenster, zu rechnen. Bei derartigen Datenaufnahmen werden die Bilder mit großer Überlappung und von unterschiedlichen Blickpunkten aufgenommen. In Verbindung mit der anschließenden Erstellung von Orthophotos können diese Effekte jedoch minimiert werden.

- Vergleich der Multispektral- und Thermalaufnahmen

Die thermalen Bilddaten der Drohnenbefliegung zeigen den Abkühlungseffekt der Pflanzen vor der Rückwand der Begrünungsfläche sehr gut. Die Pflanzen kühlen sich durch Transpirationsmechanismen selbst und heben sich als kühlere Bildbereiche von der aufgewärmten Umgebung ab (Abbildung 21). Generell lassen sich so warme und kalte Bereiche unterscheiden, aber eine gezielte Ansprache von Temperaturunterschieden zwischen einzelnen Pflanzen gestaltet sich auf Grund der geringen räumlichen Auflösung der Daten schwierig.

Ebenso wirken sich die deutlichen Temperaturunterschiede zwischen den Pflanzen und der aufgeheizten Umgebung auf die Auswertung aus. Um Temperaturunterschiede zwischen einzelnen Pflanzen, wie sie in Kapitel 3.2.1 gezeigt wurden, zu erfassen, müsste neben der Aufnahme von räumlich besser aufgelösten Bildern auch eine auf die Pflanzentemperatur optimierte Skalierung erfolgen.

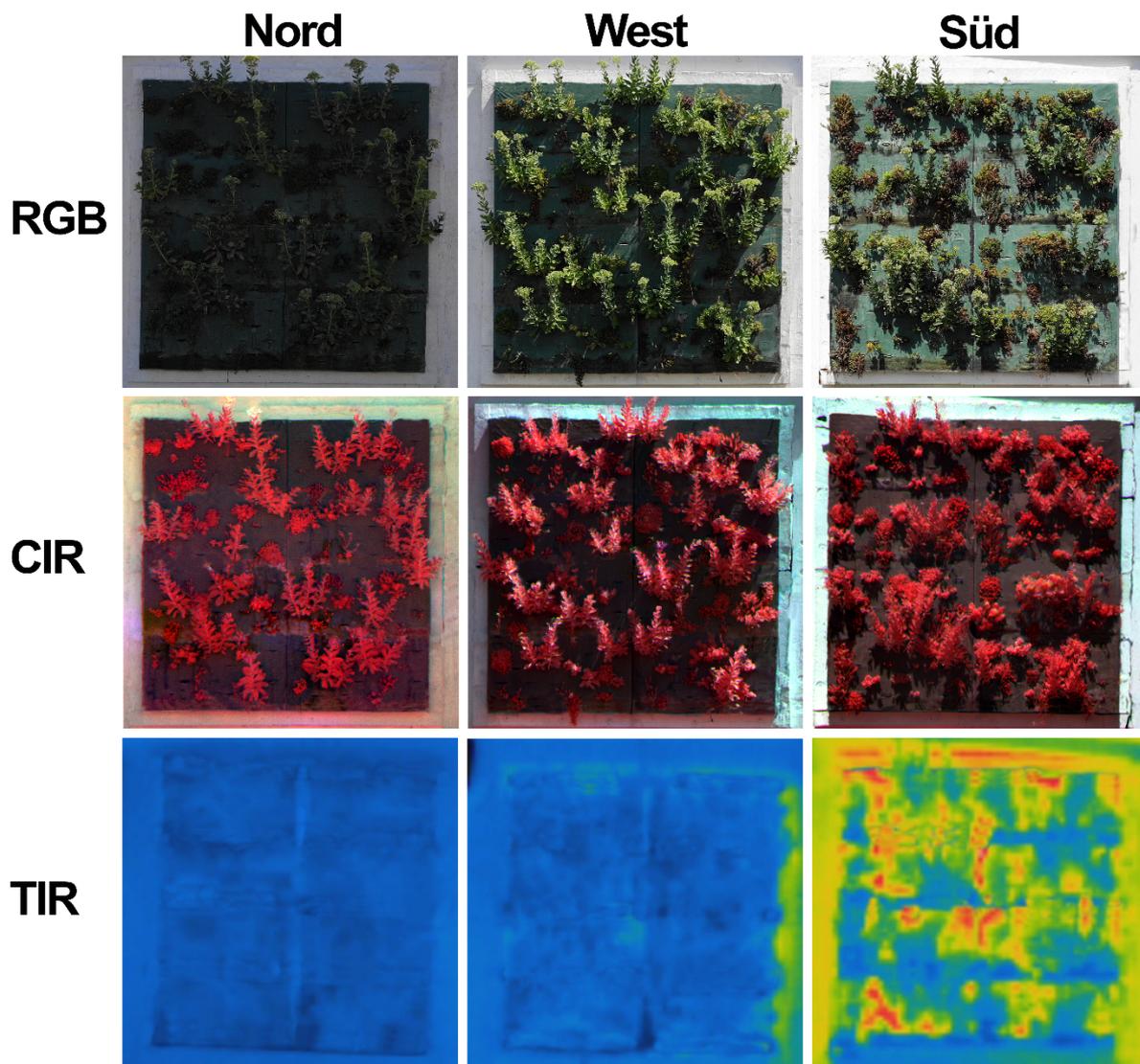


Abbildung 21: Vergleich von RGB-Aufnahme, Multispektralaufnahme (zeitversetzt aufgenommen) in Falschfarbendarstellung „CIR“ (R=NIR, G=Rot, B=Grün) und Thermalaufnahme (TIR) der drei begrünten Seiten des Fassentyps 4 zur Mittagszeit.

Auch die Wahl des richtigen Aufnahmemodus stellt einen wichtigen Aspekt dar. Im Automatikmodus wird die Bildwert-Skala laufend anhand der im Bildbereich registrierten Minimal- und Maximalwerte angepasst. Abhängig von den abgebildeten Materialien und ihren thermischen Eigenschaften können wesentliche Unterschiede in der Temperaturamplitude und durch Histogrammspreizung auch in der Darstellung der Zielobjekte entstehen. Durch eine fixe Skalierung auf einen bestimmten Temperaturbereich kann eine Histogrammspreizung verhindert und dadurch die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Aufnahmezeitpunkten sichergestellt werden. Bezüglich der Auswertung der Thermaldaten muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass diese mit der Ersatzdrohne (DJI Mavic 2 Enterprise) erfolgte. Ursprünglich war geplant, die Aufnahmen mit einer Thermalkamera mit besserer Sensorauflösung vorzunehmen (z.B. FLIR Vue Pro).

Eine Gegenüberstellung der RGB-, der Multispektral- (etwas zeitversetzt aufgenommen) und der Thermalaufnahmen des Fassadentyps 4 findet sich in Abbildung 21 und zeigt nochmals die unterschiedlichen Qualitäten der Aufnahmen. Während in der RGB-Aufnahme an der Nordseite die Pflanzen nur sehr schwer erkennbar sind (wie oben bereits erwähnt), bietet die Aufnahme des Multispektralsensors gute Bildqualität und gezielte Ansprachen einzelner Pflanzen sind möglich. Bei den Aufnahmen der Westseite erschwert der seitliche Lichteinfall verbunden mit starkem Schattenwurf eine Interpretation und Analyse der Pflanzen bei allen optischen Sensordaten. Die Aufnahmen der Südseite hingegen sind auf Grund der guten Beleuchtungsverhältnisse von guter Datenqualität. Von den drei getesteten Sensoren eignen sich für gezielte Pflanzenansprachen die Multispektraldaten am besten. Um die Vorteile der einzelnen Sensoren zu verbinden, ist eine Kombination der Daten zu empfehlen.

## (2) Darstellung und Auswertungsmöglichkeiten der aufgenommenen Daten

Die multispektralen Orthophotos sind aufgrund der Datenerfassung im NIR zur Erkennung und zur Beurteilung des Pflanzenzustands besser geeignet. Darüber hinaus ermöglichen die Daten, wie bereits erwähnt, die Berechnung von Vegetationsindizes wie zum Beispiel der NDVI. Wie im Kapitel 3.2.2 beschrieben, lassen sich somit Rückschlüsse auf Blattflächen/Biomasseunterschiede vornehmen. Die Indexbildung reduziert zusätzlich Beleuchtungsunterschiede, wodurch für die Vegetationsansprachen ein konstanteres Bildmaterial zur Verfügung steht. Die in Abbildung 22 dargestellte Gegenüberstellung der Falschfarbendarstellung mit dem aus den Daten berechneten NDVI veranschaulicht dies eindrucksvoll.

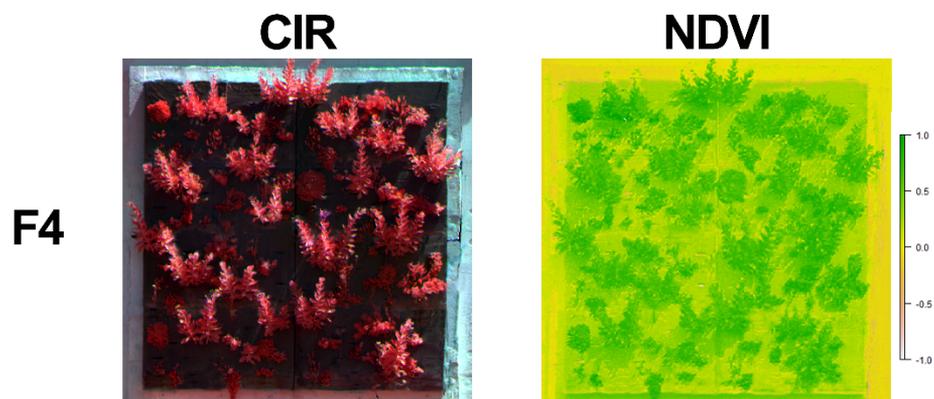
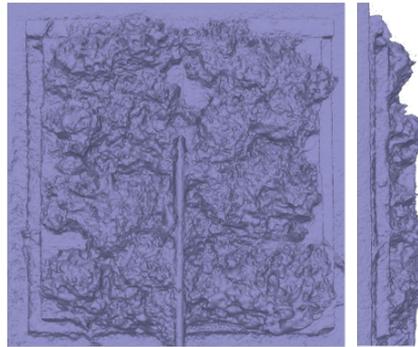


Abbildung 22: Falschfarbendarstellung (CIR, R=NIR, G=Rot, B=Grün) eines Orthophotos und der daraus berechnete NDVI der Westseite des Fassadentyps 4 bei der morgendlichen Datenerfassung.

Bei der Befliegung des Versuchsgartens wurden alle Pflanzenwände umflogen und Bilddaten aus unterschiedlichen Blickwinkeln erfasst. Dies ermöglichte die Rekonstruktion der Pflanzenbewuchses durch die Erstellung eines 3D-Modells durch die photogrammetrische Aufbereitung der Daten. Die Visualisierung des 3D-Mesh in Abbildung 23 kann zum Beispiel für die Erfassung der Biomasse bzw. des Deckungsgrades verwendet werden.



*Abbildung 23: Visualisierung des Oberflächenmodells als 3D-Mesh einer Fassadenbegrünung von vorne und von der Seite.*

### **(3) Datenerfassung an Grünfassaden von Gebäuden im städtischen Bereich**

Da sich die Ersatzdrohne während der Projektlaufzeit noch in der Entwicklung befand, konnte die Datenerfassung an Fassaden im städtischen Bereich ausschließlich mittels terrestrischem Laserscanner durchgeführt werden. Auf Basis der erfassten Daten wurden für die Szenarien unterschiedliche Folgeprodukte der rohen Punktwolke generiert, die im Folgenden beschrieben werden.

## Szenario 1: Grünfassade der MA48 - Zentrale (Einsiedlergasse 2, 1050 Wien)



Abbildung 24: Mittels terrestrischem Laserscanner erfasste Punktwolke (Grünfassade MA 48, Wien)

Als wesentlicher Nachteil der Methode gegenüber einer Erfassung mittels Drohne ist das Auftreten von „Schatten“ (sichttoten Räumen) zu nennen, die sich aufgrund der Aufnahmesituation von unten ergeben. In der Abbildung 24 sind solche Schatten vor allem im Bereich der Fenster bzw. des Daches zu erkennen. Ansonsten ist das erfasste Datenmaterial mit dem mittels Drohnen aufgenommen und photogrammetrisch abgeleiteten Material vergleichbar.



Abbildung 25: Aus der Punktwolke und Farbinformation abgeleitete Orthofotos (MA 48 Zentrale, Detail)

Die in Abbildung 25 dargestellten Orthofotos sind maßstäbliche Repräsentationen der Geometrie der Bepflanzung in der Ebenen der Fassade. Ein Messen bzw. eine lagerichtige Verortung der Pflanzen sind daher möglich.

## Szenario 2: Grünfassade Hackengasse 18, 1150 Wien



Abbildung 26: Unbearbeitete Punktwolke der Grünfassade (Hackengasse 18, 1150 Wien)

Abbildung 26 zeigt die von mehreren Standpunkten aus erfasste, unbearbeitete Punktwolke der Grünfassade Hackengasse 18, 1150 Wien. Zusätzlich zur Geometrie des beobachteten Objektes können durch interne Kameras den einzelnen Punkten auch RGB-Information zugewiesen werden.

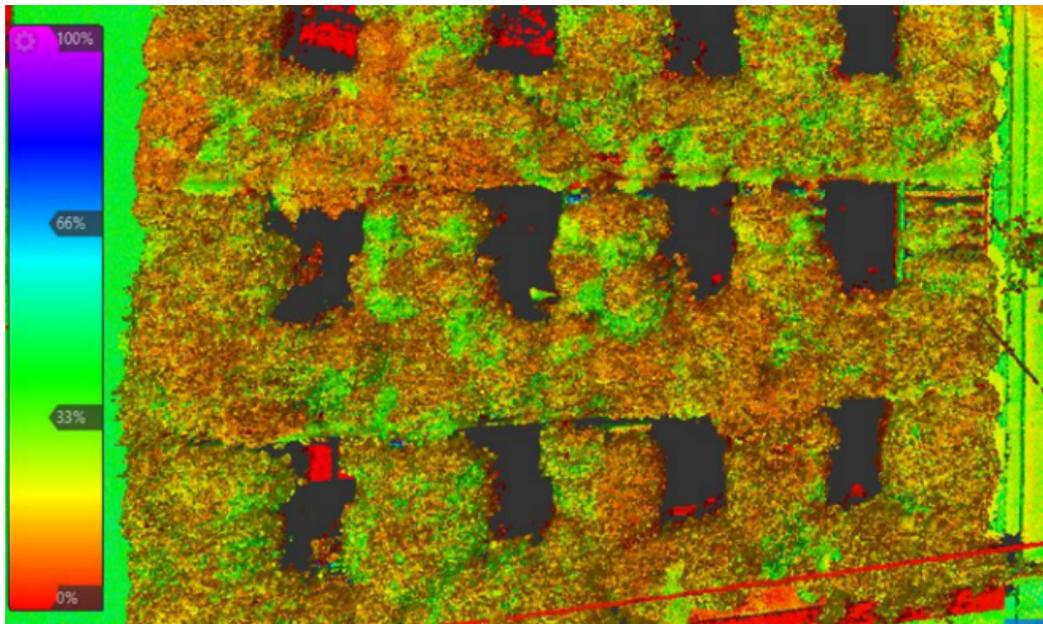


Abbildung 27: Orthofoto der zurückgeworfenen Signalstärke (Hackengasse 18, 1150 Wien)

In Abbildung 27 ist wiederum ein Orthofoto dargestellt. Im Unterschied zu Abbildung 25 sind hier allerdings nicht die RGB-Werte der Fassade verortet, sondern die Amplituden der zurückgeworfenen Signale je 3D Punkt. Diese Information ist vergleichbar mit jenen Daten, die von einer Multispektralkamera in einem Spektralband generiert werden.

#### **(4) Abgeleitete Produkte und Integration in BIM**

Unter dem Begriff BIM („Building Information Modeling“) wird grob eine gemeinsame und vernetzte Datenbasis für die Planung, Ausführung und den Betrieb von Gebäuden während aller Phasen des Gebäudelebenszyklus verstanden (Herrmann und Westphal, 2017). Standards, vor allem für den Bereich der Gebäudebegrünung, sind derzeit jedoch noch nicht in aller Tiefe etabliert bzw. definiert.

Das automatisierte Generieren von betriebs- und pflegerelevanten Daten über Sensoren und Messgeräte, z.B. zu Bewässerungsanlagen und dessen automatisierte Ausgabe von Notalarmen und Verbrauchsdaten über Apps der Systemhersteller\*innen auf mobilen Endgeräten der Pflegefirma, ist bereits jetzt bei einigen Pilotprojekten ab 100 m<sup>2</sup> in der Fassadenbegrünung üblich. In der Dachbegrünung haben erste Systemhersteller\*innen ihre Systeme für den Planungs- und Wartungsprozess BIM-fähig gemacht, in der Fassadenbegrünung beschäftigen sich bereits mehrere F&E-Vorhaben damit. Die zusätzliche, (teil)automatisierte oder einsatzbezogene Generierung von bildbasierten Daten über den Lebenszyklus eines Projekts hinweg ermöglicht Rückschlüsse für Planungs-, Bau- und Erhaltungszyklen sowie damit verbundene Erfordernisse und den ressourcenschonenden Einsatz von Arbeitskräften.

Grundsätzlich sind die mittels Drohnen oder terrestrischem Laserscan erfassten Daten und daraus abgeleiteten Produkte bestens für eine Integration in BIM geeignet, da die Information des Zustandes der Bepflanzung lagerichtig abgebildet wird. Die eigentliche Information (multispektral, thermal, etc.) kann einer räumlichen Koordinate (X, Y, Z) in einem „Fassadenkoordinatensystem“ eindeutig zugeordnet werden. Auch die temporale Komponente ist abbildbar. Voraussetzung für eine BIM Integration wären aber klare Definitionen, welche Daten in welcher Form bereitgestellt werden müssen. Die notwendige Entwicklung derartiger Standards für den Bereich Gebäudebegrünungen sind Gegenstand laufender Projekte wie z.B. das im Zuge der FFG Förderungsschiene „Stadt der Zukunft“ finanzierte Projekt „GreenBIM“.

### **3.3. Pflege mittels Robotik**

#### **3.3.1. Trends und Ansätze im Bereich Gebäuderobotik**

##### **(1) Roboter im vertikalen, begrünten Bereich**

Für die Pflege von begrünten Fassaden wurden zwei Konzeptstudien gefunden, die beide vom Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart durchgeführt wurden (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung 2018a, 2018b). Die Motivation für diese Studien wird mit der Annahme begründet, dass die Wartungskosten einer begrünten Fassade 5-10% der ursprünglichen Investitionskosten ausmachen und für Gebäudeeigentümer\*innen eine Barriere darstellen, Fassaden überhaupt zu begrünen. Zu den Konzeptstudien sind kaum Informationen öffentlich zugänglich, auch in der persönlichen Kommunikation wurde nicht viel preisgegeben. Die erste Studie stellt ein schienengeführtes System dar, welches zur Bewässerung eingesetzt werden, Bild-Daten erheben, ganze begrünte Module austauschen und Pflegeschnitte durchführen können soll. Dieses System soll für teilflächige fassadengebundene Vegetationsträger geeignet sein. Die zweite Studie stellt ein seilgeführtes System dar, wodurch sich flächige Bearbeitungsmöglichkeiten ergeben sollen. Es soll ein Schneidwerkzeug besitzen und für vollflächige Vegetationsträger geeignet sein. Die erste Studie verlangt ein spezifisches Begrünungssystem und ist daher nicht auf diverse

Begrünungssysteme anwendbar. Die zweite Studie ermöglicht kein spezifisches Eingreifen, sondern erlaubt die flächige Trimmung von Gebäudebegrünungen.

Die „open platform for artistic research into living systems BioTehna“ in Ljubljana (SI) arbeitete an einer „Green Wall“ als Prototyp-Installation eines vertikalen Gartens, in dem eine symbiotische Interaktion zwischen Pflanzen, Computern, Robotern und Menschen stattfinden soll (Biotehna 2020). Zusätzlich wurde ein spinnenähnlicher Roboter entwickelt, der die Temperatur-, Feuchtigkeit- und Licht-Bedingungen erhebt und Pflanzen bewässern soll. Dieser Roboter wurde aber bisher nicht in der vertikalen Achse getestet und die Befestigung bzw. Absturzsicherung ist noch nicht geklärt.

## **(2) Roboter im vertikalen, nicht-begrüntem Bereich**

Es wurde eine Reihe an Robotern recherchiert, die an nicht-begrüntem Gebäudefassaden eingesetzt werden. Dazu gehören Fassadenreinigungsroboter und solche, die für die Inspektion und Wartung von Gebäudefassaden eingesetzt werden. Dabei sind verschiedene Geschäftsmodelle in Anwendung wie kaufen, mieten oder der Bezug als Dienstleistung.

Die meisten Reinigungsroboter arbeiten mit Wasser, Luft und eventuell Reinigungsmittel. Das Wasser bzw. Reinigungsmittel wird auf die Fläche gesprüht, die Reinigung gelingt mittels einer integrierten Bürste. Diese Bürste ist meist klein und nicht sichtbar (etwa bei SERBOT (2020) Gecko Facade Robot, KITE Robotics (o.J.), Towercraft (o.J.), Erylon´s (o.J.) Clean Kong, Skyline Robotics`s (o.J.) Ozmo), bei einem Anbieter (Skyline Robotics o.J.) ist sie dagegen verhältnismäßig groß. Spezifische Werkzeuge für die Pflege von begrünten Wänden könnten bei zumindest einem Anbieter (KITE Robotics o.J.) eventuell anstelle der Bürste montiert und der Roboter so umfunktioniert werden.

Im Fall von Fassadenreinigungs-Robotern, deren Dienstleistung angeboten wird, und die sich nicht permanent am Gebäude befinden, verbleiben nur die Verbindungsstücke zu den Sicherungskabeln am Gebäude.

Fassadenreinigungs-Roboter für permanente gebäudespezifische Implementierung benötigen drei Komponenten: den Standard-Roboter, ein kundenspezifisches Sicherungssystem sowie ein kundenspezifisches Versorgungssystem (Strom, komprimierte Luft und reines Wasser). Unterstützungssysteme bieten den Versorgungsschlauch an und sichern den Roboter. Es gibt drei Varianten von Unterstützungssystemen: Versorgung durch einen Dachfahrwagen einer Building Maintenance Unit (BMU); Versorgung durch ein eigenes System; Versorgung eingebunden in eine bestehende BMU. Fassadenroboter zur Pflege begrünter Wände an einer BMU zu befestigen, wäre prinzipiell möglich. Jedoch wird Wind aufgrund der unkontrollierbaren Position des Roboters an der Fassade als problematisch angesehen.

Roboter zur Aufbringung von Schichtsystemen zur Funktionalisierung von Gebäudeoberflächen („Plotbot/Crawler“ der Forschungsplattform BAU.KUNST.ERFINDEN (o.J.)) arbeiten mit Effektoren, Sensoren und mobiler Basis, einer Software-Komponente, einem Hardware-Software-Interface, sowie einem Webinterface für den technischen Support und zur Unterstützung des Anwender\*innen-Dialogs. Mit dem Aufbringen und der Erneuerung des „DysCrete“-Schichtsystems hat das Forschungsprojekt „Plotbot/Crawler“ eine konkrete Anwendung als Aufgabenstellung (Forschungsplattform BAU.KUNST.ERFINDEN o.J.). Bei DysCrete handelt es sich um einen farbstoffsensitiven, energieerzeugenden Beton, bei dem die stromproduzierende Beschichtung in regelmäßigen zeitlichen Abständen erneuert wird, die den üblichen Renovierungszyklen für

Fassadenanstriche entsprechen. Es gab bereits Anfragen an das Projektteam, um den Potbot/Crawler auch für die Pflege von begrünten Wänden einzusetzen (Klussmann 2019).

Bei Kletterrobotern für die Gebäuediagnose (Analyse der Gebäudestruktur und innerer Schäden mit Ultraschallsensoren) ist die Frage der Haftung am Gebäude essentiell. Der Gewinner der Japan Design Foundation 2007 (C-BOT der Firma nr21 Design (o.J.)) imitiert mit bionischem Nanomaterial Gecko-Fußsohlen, um an Materialien wie Glas, Beton und Metall zu haften. Der C-BOT ist derzeit nur eine Designstudie und kein verkaufsfähiges Produkt (Galler 2019). Der C-BOT ist derzeit auch nicht darauf ausgelegt, deutlich mehr an Gewicht zu tragen, wie beispielsweise ein Schneidwerkzeug für die Pflege von Gebäudebegrünungen.

Generell ist die Haftungssituation von Fassadenreinigungs- bzw. -inspektionsrobotern an der Gebäudefassade an eine glatte Oberfläche gebunden, was eine Anwendung an begrünten Wänden ausschließt bzw. verkompliziert. Da einige verschiedene Systeme von Gebäudebegrünungen am Markt sind, ist eine allgemeine Applikationsmethode eines Pflegeroboters nicht möglich. Teilflächige und vollflächige Begrünungen verlangen verschiedene Pflegesysteme.

### **(3) Roboter im horizontalen, begrünten Bereich**

In großen landwirtschaftlichen Monokultur-Produktionsflächen in den USA und Europa werden eine Reihe von „Farming-Robotern“ eingesetzt. Diese Roboter übernehmen Pflanzenbeobachtung, Düngung, Pestizidausbringung, Unkrautvernichtung, Ernte und Aussaat, sind dabei jedoch nur auf ebenen Grund bzw. bis zu gewissen Neigungswinkeln unterwegs.

Digitalisierung in der Landwirtschaft wird von Begriffen wie „Precision Farming“, „Smart Farming“, „Farming 4.0“ oder „Digitale Landwirtschaft“ begleitet. Es geht um datengestützten Ackerbau und Automatisierungsfunktionen, sowie den Einsatz von Software, Robotik und IoT (Internet of Things). GNSS-basiertes Lenken, Mobilfunk-Connectivity und Systeme für die Kommunikation von Traktor und Anbaugerät bilden die Grundlage für aktuelle und zukünftige Anwendungen von Farming 4.0. Software zur Verwaltung landwirtschaftlicher Betriebe und ist bereits seit Jahrzehnten am Markt. Zukünftig soll noch mehr in Arbeitsentlastung investiert werden (Trend zu vollautomatischen Maschinen, die mit Daten aus der Cloud arbeiten), sowie in Unkrautbekämpfung (Roboter und Hacksysteme anstelle von Herbizidverfahren) und Informationsverarbeitung (Einsatz Künstlicher Intelligenz für Szenarioentwicklungen auf dem Feld und daraus resultierenden Optionen für Pflanzenschutz, Düngemaßnahmen, Bewässerung, u.a.; siehe Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2018).

Der Farmbot (o.J.) ist ein Do-It-Yourself-Baukasten aus den USA mit Kosten von etwa 450 USD. Die Entwicklung des Farmbot basiert auf Open-Access-Plattformen. Durch die austauschbare Spitze bietet der Farmbot eine Vielzahl von Optionen für Bewässerung, Unkrautentfernung und Düngung. In der relativ einfachen Ausführung als Baukasten ist der Farmbot nicht für eine Anwendung im vertikalen Bereich geeignet, einzelne Komponenten könnten jedoch interessant sein. Eine Reihe von Farm-Robotern bewegt sich ferngesteuert bzw. aufgrund von GNSS-Daten autonom auf dem Feld (beispielsweise Ecorobotix (o.J.), Agrobot (o.J.), Small Robot Company (o.J.)). Sie orientieren sich mittels Kamera, GNSS-Daten und Sensoren bzw. LiDAR-System (=engl. light detection and ranging) zur autonomen Navigation. Fernbedienung ist bei den meisten Robotern möglich.

Diese Roboter übernehmen in der Regel eine ganz bestimmte Funktion, wie gezielte Besprühung mit Herbiziden auf erkanntes „Unkraut“, Erkennung von erntebaren Früchten anhand ihrer Farbe (Reifungsgrad) und anschließender Ernte mit Stiel und Blatt, nur Blatt oder ohne Blatt. Die Roboter der Small Robot Company können Monitoring-Aktivitäten, Düngung, Jäten sowie Löcher bohren und Pflanzen setzen übernehmen, wobei die Software „Wilma“ die künstliche Intelligenz im Hintergrund (machine learning) ist (Small Robot Company o.J.). Die Roboter der Small Robot Company haben derzeit keine marktwirtschaftliche Relevanz, stellen aber eine interessante Alternative zu schweren, großen Robotermaschinen dar, die in Monokulturen das Feld pflegen.

Zu diesen großen Maschinen gehören die Roboter der Blue River Technology (o.J.), welche 2017 von John Deere übernommen wurde, einem der Weltmarktführer in Precision Agriculture. Der erste Roboter dünnt Salat-Setzlinge aus („Lettuce Bot“), der zweite Roboter ist in der Unkrautkontrolle auf Baumwoll- und Sojafeldern im Einsatz („See & Spray“). Auch die Roboter der Firma Naïo Technologies (o.J.) (Frankreich) bieten große Farming-Roboter an, die Unkrautentfernung in Weingärten und Gemüsefeldern übernehmen. Die US Firma Energid (o.J.) bietet einen Roboter an, der (Zitrus-)Früchte ernten, also vom Baum pflücken kann. Der pflückende Arm besitzt keine Sensoren und Antriebselemente, ist demnach robust, leicht herzustellen und zu ersetzen. Das „Gehirn“ besitzt sechs Kameras und ein Verrechnungszentrum. Die Kosten bewegen sich in einem ähnlichen Bereich wie die menschliche Arbeitszeit.

Von automatisierten Systemen im horizontalen Farming-Bereich sowie von Mäh-Robotern können für die vorliegende Konzeptstudie DRoB einzelne Komponenten, vor allem betreffend Schneidwerkzeuge, Künstliche Intelligenz für selbst-lernende Systeme, Sensoren für die Erkennung von Pflegebedarf und Erntemechanismen übernommen werden.

Die Recherche einzelner Komponenten, mit denen automatisierte Pflegemaschinen für horizontale begrünte Flächen (Mäh-Roboter) ausgestattet sind, ergab Einblicke in folgende Bereiche:

- **Schneidmittel:** Keiner der Roboter „mäht“ das Gras. Sie haben eine messerscharfe Schneide, die aus 2-4 Messern besteht, welche die Grashalme trimmt. Trimmen bedeutet auch, dass vor dem ersten Einsatz des vollautomatisierten Roboters der Rasen auf eine bestimmte Höhe gemäht werden muss. Sonst wird der Roboter den Rasen vermehrt nur vor sich herschieben und gar nicht die eingestellte Schnitthöhe erreichen.
- **Arbeitsvorgang/Antrieb:** Die Schneide sowie die für die Fortbewegung notwendigen Reifen, werden über Gleichstrommotoren angetrieben. Meist werden 3-4 Reifen angetrieben, es gibt auch Modelle mit Allradantrieb. Im Schnitt liegt die Lautstärke, die ein Mäh-Roboter mit all seinen Motoren erreicht, bei etwa 60 dB, meist darunter. Nicht jeder Mäh-Roboter ist in der Lage Pflanzen, Bäume, Spielzeug, Hütten, Hecken oder Rasen von Beton zu unterscheiden. Meist wird das einfache Prinzip der Arbeitsbereichsbegrenzung genutzt, dabei wird der Arbeitsbereich mit Hilfe eines Begrenzungsdrahtes abgesteckt. Dieser Draht steht unter wechselnder Kleinspannung und der Roboter erkennt bei Annäherung das induktive Feld um den Draht und dreht um bzw. fährt daran entlang.
- **Spannungsversorgung:** Die Arbeitsenergie beziehen alle Mäh-Roboter aus einem wiederaufladbaren Gleichstromakkumulator, der in einer fest installierten Ladestation aufgeladen wird, an welche der Mäh-Roboter selbständig andockt. Viele Hersteller\*innen

benutzen Begrenzungsdrähte zugleich als Orientierung, um zu helfen, die Ladestation zu finden, andere sind GNSS (Global Navigation Satellite Systems) unterstützt.

- **Sensorik:** Heutzutage sind die Mäh-Roboter mit einem kleinen Arsenal an Sensoren ausgestattet. Es gibt Kipp- bzw. Neigungssensoren, welche sofort die Schneide stoppen, falls das Gerät umfallen sollte oder hochgehoben wird. Zusätzlich verfügen sie über ein Sensorsystem, das erkennt, wenn bzw. ob der Mäh-Roboter an einen Gegenstand oder an eine Person anfährt. Dieses System kann mit Stoß- oder mit Ultraschallsensoren verwirklicht werden; letztere sind genauer, aber auch teurer und aufwendiger. Es gibt Regensensoren, welche bei Aktivierung die meisten Mäh-Roboter zurück in die Ladestation senden. GNSS wird mittlerweile von vielen Hersteller\*innen in verschiedenen Varianten eingesetzt: Zur Orientierung, Ortung und Diebstahlschutz. Viele Modelle verwenden GNSS, um den Mähbereich so effizient wie möglich auszunützen. Anstelle eines "Zick-Zack"-Zufallsprinzips wird der bisheriger Mähweg abgespeichert und zur Optimierung der bevorstehenden Wege genutzt.
- **Benutzerschnittstelle:** Gartenroboter sind ohne ihre Nutzer\*innen nur bedingt einsatzfähig. Mit Hilfe von diversen Schnittstellen kann mit den Geräten kommuniziert werden. Geschützt über eine PIN-Eingabe können die Nutzer\*innen auf das Gerät zugreifen. Viele Hersteller\*innen setzen auf eigene Apps, die vom Tablet, Handy oder Computer aus benutzt werden können. Diese Apps beinhalten die wichtigsten Informationen und Statusmeldungen, Befehle für den Roboter und eventuell GNSS Ortung. Ebenso bieten viele Hersteller\*innen eine Planungsfunktion an, mit der man dem Rasenroboter genaue Arbeitszeiten einprogrammieren kann. Manche Fabrikant\*innen haben ihre Modelle auch schon mit dem IoT (Internet of Things) verbunden. Nutzer\*innen können so beispielsweise per Sprachbefehl dem Mäh-Roboter starten.

### 3.3.2. Technische Anforderungen an den Roboter zum Einsatz an Grünfassaden

Der Innovationsgehalt kann derzeit nur qualitativ beschrieben werden, da noch keine messbaren Daten vorhanden sind und sich die Entwicklung im konzeptionellen Bereich und in der Erstellung eines Prototyps befindet. Ist dieser fertig gestellt und im Test an Fassaden aktiv, können messbare Daten erhoben und mit bestehenden Systemen verglichen werden. Für den Fassadenroboter können in weiterer Folge ein Patent beantragt und Schutzrechte angemeldet werden. Im Rahmen des Projektes DRoB wurden folgende technische Anforderungen an den Roboter zur Pflege bodengebundener Fassadenbegrünungen mit *Parthenocissus tricuspidata* definiert:

- Aufgabe: Schneiden überwachsender Triebe
- Roboter schienengeführt an Überwuchsleiste (Bewegung auf/ab, links/rechts)
- Gewicht des Roboters darf Traglast der Leiste nicht übersteigen (Roboter darf nicht von Leiste fallen)
- Antrieb: Motor und Batterie, PV-Ladestation (extern)
- Modularität der Verschleißteile (Schneidwerkzeug, etc.)
- Automatische Bewegung zu Startposition, wenn die Batterie schwach ist
- Fehlerbericht bei vorzeitigem Abbruch der Arbeit
- Notabschaltung bei starken Hindernissen
- Sicherung mit Kabel an Gebäude

- Schneidwerkzeug: (1) muss stoppen, wenn Roboter sich nicht an Leiste befindet. (2) darf Sicherungskabel nicht durchschneiden
- Roboter darf keine anderen Lebewesen verletzen (z.B. Vogelnester)
- Anlehnung an Rasenmäh-Roboter, Motorsensen, Dönerschneider
- Schneidwerkzeug, Antrieb, Benutzer\*innenschnittstelle, Spannungsversorgung, Sensorik

### 3.3.3. Kategorisierung von Maßnahmen, Technologien und grünen Infrastrukturen:

#### (1) Roboter

Der in DRoB entwickelte Roboter-Prototyp ist ein „professioneller Serviceroboter“. Nach ISO 8373:2012 ist ein Serviceroboter ein Roboter, „*that performs useful tasks for humans or equipment excluding industrial automation applications*“ bzw. auf Deutsch „Ein Roboter, der nützliche Aufgaben für Menschen oder andere Geräte durchführt, wobei industrielle Automatisierungsanwendungen (unter anderem Fertigung, Überprüfung, Verpackung, Montage) hiervon ausgeschlossen sind“ (Online Browsing Platform ISO 2012). Die Norm unterscheidet Serviceroboter für Privatpersonen und professionelle Servicerobotik. Auch der Green Wall Robot des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung ist ein „professioneller Serviceroboter“ (Kraus 2019), welcher nach ISO 8373:2012 wie folgt definiert ist: „*A service robot used for a commercial task, usually operated by a properly trained operator*“, auf Deutsch: Ein Serviceroboter, der für eine kommerzielle Aufgabe genutzt und in der Regel von einer speziell ausgebildeten Fachkraft bedient wird (Online Browsing Platform ISO 2012). Der im Projekt DRoB geplante Roboter ist ebenfalls in der Kategorie „professioneller Serviceroboter“ verortet. Anhand der Einteilung der Plattform robots.nu (RobotXperience 2019) ist der in DRoB geplante Roboter ein „Roboter bei der Arbeit“ / „Wartungsroboter“. Es gab zum Zeitpunkt des Projektabschlusses keine ÖNORM für professionelle Serviceroboter, allerdings die geltende ÖNORM für Assistenzroboter (ÖVE/ÖNORM EN 50636-2-107:2014). Für eine tatsächliche Entwicklung eines Pflegeroboters für vertikale Gebäudebegrünungen in einem Folgeprojekt, sind die in dieser ÖNORM enthaltenen Standards zu berücksichtigen.

#### (2) Grüne Infrastrukturen:

Laut ÖNORM L1136 sind in der Vertikalbegrünung folgende Kategorien gegeben:

- Bodengebundene Vertikalbegrünung ohne Rankhilfe
- Bodengebundene Vertikalbegrünung mit Rankhilfe
- Wandgebundene Vertikalbegrünung – Teilflächiger Vegetationsträger
- Wandgebundene Vertikalbegrünung – Vollflächiger Vegetationsträger

Der im Projekt DRoB konzeptionierte Roboter soll für die Pflege bodengebundener Vertikalbegrünung ohne Rankhilfe einsetzbar sein.

#### (3) Schematische Darstellung

Abbildung 28 zeigt die schematische Darstellung (a und b) sowie Bestandteile und Grobmaße (b-d) des Roboters, welche auf den Erkenntnissen der im Zuge der Recherche gefundenen Prototypen beruhen. Der schienengeführte Roboter dient für den Schnitt von Trieben von *Parthenocissus tricuspidata*, welche die Begrenzungsleiste überwachsen. Der Roboter wird mit einem Schneidwerkzeug ähnlich eines Rasentrimmers oder einer Motorsense ausgestattet, welches ein Schneiden überwachsener

Trieb ermöglicht. Der batteriebetriebene Roboter wird zwischen den jeweiligen Einsätzen mittels transportabler Ladestation aufgeladen. Der Roboter soll über ein Kabel an der Begrenzungsleiste bzw. am Gebäude vor Absturz gesichert sein. Er wird eine entsprechende Sensorik tragen, die erkennt, wann der Roboter sich nicht an der Leiste befindet und sicherstellt, dass das Schneidwerkzeug in diesem Zeitraum inaktiv ist. Im Fall einer massiven Behinderung, wie zum Beispiel der zu schneidende Trieb ist bereits zu stark verholzt oder die Batterie ist schwach, soll der Roboter sich zum Ausgangspunkt zurückbewegen und eine entsprechende Fehlermeldung geben. Zusätzlich werden der Einsatzzeitraum (Beginn-Ende) sowie der Standort (GNSS-Daten) und die abgefahrenen Laufmeter erfasst.

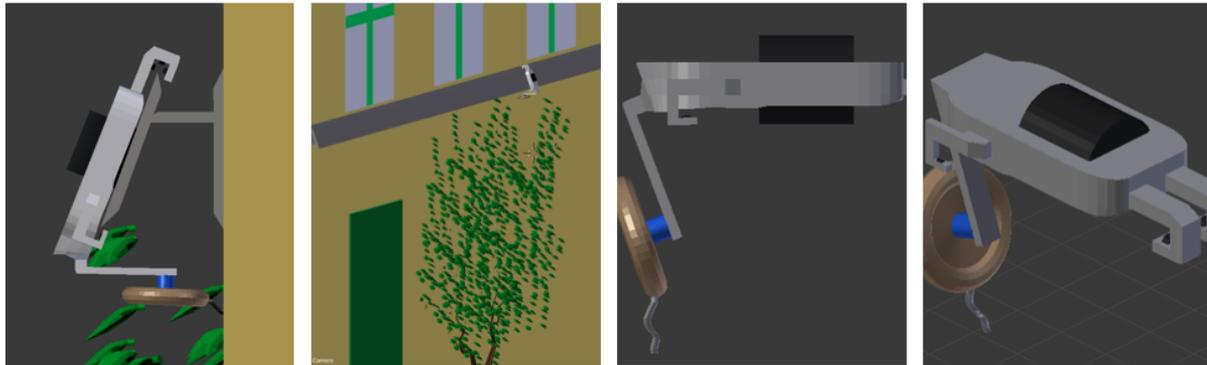


Abbildung 28: Schematische Darstellung des schienengeführten Roboters für den Pflegeschnitt: (a) schematische Darstellung des Roboters, (b) Übersichtsansicht zur Beurteilung des Größenverhältnisses, (c) Seitenansicht, (d) Draufsicht (alchemia-nova 2019).

### 3.4. Monitoring & Pflege von Fassadenbegrünungen mittels Drohne und Robotik

#### 3.4.1. Monitoringszenario für den Einsatz von Drohnen

Das Monitoring von wandgebundenen Fassadenbegrünungen kann in drei Szenarien unterteilt werden. Die erste Möglichkeit ist das Fernmonitoring über ortsfeste Sensorik wie zum Beispiel Durchflusssensoren, die überprüfen, ob Wasser zu den Pflanzen gelangt, oder Bodenfeuchtesensoren, die überprüfen, ob der pflanzenverfügbare Wassergehalt im Substrat hoch genug ist. Das zweite Szenario ist die visuelle Inspektion vom Boden, wobei hier lediglich die Vitalität der Pflanzen beurteilt wird. Dies erfolgt im Wesentlichen anhand der Blattfarbe, wobei als einfache Regel gilt: „Grün ist vital, braun ist gefährdet“. Dieser Arbeitsschritt kann auch von nicht ausgebildetem Personal durchgeführt werden. Das dritte Szenario ist die genaue Kontrolle durch eine Fachkraft, hierbei werden die einzelnen Systemkomponenten (Bewässerung, Kletterhilfen, etc.) genauer inspiziert und bei Notwendigkeit zur Pflege ein Maßnahmenentscheid getroffen.

Speziell der zweite Schritt kann potenziell durch den Einsatz von Drohnen und der entsprechenden Sensorik ersetzt oder zumindest verbessert werden. Vergleicht man die drohngestützte Erfassung mit einer ausschließlich visuellen Inspektion, so ergeben sich folgende Vorteile:

- Erfassung objektiver Daten durch Nutzung geeigneter Sensorik
- Räumlich verortbare Detailinformationen
- Besserer Blickwinkel für die Beurteilung (kein schleifender Schnitt von unten)
- Automatisierte Weitergabe der erhobenen Informationen an Robotersysteme zur Fassadenpflege möglich

Die Nachteile können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erheblicher Mehraufwand verglichen mit visueller Inspektion vom Boden
- Erhöhter Aufwand in der Vorbereitung (Bewilligung Drohnenflug, Vorbereitung der Sensorik, etc.)
- Fachpersonal für die Befliegung notwendig
- Ev. höhere Kosten

Im Folgenden werden die Kosten für eine Drohnenbefliegung einer Wand (siehe Kapitel 3.1.7 - Abbildung 7) grob abgeschätzt:

Vorbereitung des Fluges in rechtlicher Hinsicht (1 Stunde)	85 €
Vorbereitung Drohne, z.B. Laden der Akkus (1 Stunde)	85 €
An/Abfahrt (Pauschale)	150 €
Befliegung/Datenerfassung vor Ort (ca. 30 min)	55 €
Datenauswertung und Lieferung	120 €
<b>Gesamtsumme (netto)</b>	<b>495 €</b>

*Anmerkung: Der Stundensatz von 110€/Stunde für den/die Ingenieur\*in inkl. Equipment vor Ort geht von Equipmentkosten von ca. 30k Euro bei einer Abschreibungsdauer von 5 Jahren aus.*

### 3.4.2. Pflegeszenarios für den Einsatz von Robotik

Derzeit befindet sich kein Unternehmen am Markt, welches die Pflege von Fassadenbegrünungen unter dem Einsatz von Robotik anbietet bzw. einen solchen Roboter verkauft. Die folgenden Kosten sind als eine erste Kalkulation und daher nicht als Fixpreise zu verstehen. Ein hoher Kostenfaktor ist die technische Entwicklung des Roboters.

Der Roboter soll sich an der Begrenzungsleiste für *Parthenocissus tricuspidata* bewegen (schienengeführtes System) und überwachsende Triebe schneiden. Das Schnittgut wird nicht aufgefangen, sondern fällt zu Boden. Zur Sicherung vor dem Abstürzen ist der mittels Akkumulators betriebene Motor mit einer separaten Sicherung versehen. Verschleißteile (Schneidwerkzeug, Werkteile zur Befestigung an der Begrenzungsleiste) sind modular und austauschbar. Bei vorzeitigem Abbruch der Pflegearbeiten (z.B. durch schwache Batterie, Unregelmäßigkeiten entlang der Begrenzungsleiste, unzureichende Leistung des Schneidwerkzeugs, etc.) wird ein Fehlerbericht erstellt, dies inkludiert ein einfaches Steuerungs- und Sensorzentrum, sowie ein kleines Displayfenster.

Das Schneidwerkzeug stoppt, wenn der Roboter keinen Kontakt zur Begrenzungsleiste hat. Bei starken Hindernissen kommt es zur Notabschaltung. Des Weiteren fährt der Roboter automatisch zum Ausgangsort zurück, wenn die Batterie schwach ist.

Für den Einsatz in der Pflege wird Folgendes (exklusive Entwicklungskosten) angenommen: Das Pflegeszenario mit dem schienengeführten Roboter an der Wachstumsbegrenzungsleiste bezieht sich auf die Beispielfassade von Kapitel 3.1.7 – Abbildung 7. Das Beispielprojekt umfasst folgende zu pflegende Laufmeter:  $12\text{ m} + 12\text{ m} + 35\text{ m} = 59\text{ m}$ . Unter der Annahme, dass die Pflege einer Fassade inklusive Anfahrtszeit etwa vier Stunden dauert und zwei Personen vor Ort sind, ergeben sich bei einem durchschnittlichen Stundenlohn von 45 € folgende Daten (exklusive Entwicklungskosten und Gewinnspanne):

Personal für Betrieb inklusive Wartung (8 Stunden á 45€)	360 €
Personal Kundenkommunikation, Vertrieb (1 Stunde á 120€)	120 €
Summe Material inkl. Strom / Laufmeter Beispielprojekt (0,01 €/lfm)	~1 €
<b>Gesamtsumme (netto)</b>	<b>481 €</b>

Der konzeptionell entwickelte Roboter ist für die Befahrung der Begrenzungsleiste ausgelegt, deshalb ist eine vollflächig Pflege der Fassadenbegrünungen nicht umsetzbar und ein Vergleich mit den in Kapitel 3.1.7 erhobenen Daten nur beschränkt möglich. Der Roboter kann voraussichtlich die Begrenzungsleisten von zwei Fassaden pro Tag abfahren, was bei Vollauslastung einer jährlichen Pflegekapazität von 502 Gebäudefassaden (bei 251 Werktagen) entspricht. In seinem momentanen Entwicklungszustand ist er jedoch mit klassischer, manueller Fassadenpflege nicht konkurrenzfähig, da Bereiche wie Fenster nach wie vor manuell gepflegt werden müssen und er in diesem Fall nicht zur Effizienzsteigerung beitragen kann. Der in dieser Form entwickelte Roboter, auf der Begrenzungsleiste fahrend, ist geeignet zur Pflege von hohen Gebäuden, um den Überwuchs der Pflanzen in unerwünschte Bereiche zu verhindern. Somit kann er für besondere Einsatzbereiche durchaus gewinnbringend eingesetzt werden.

### **3.4.3. Akzeptanz für den Einsatz von Drohnen und Robotik allgemein und speziell im Bereich Gebäudebegrünung**

#### **(1) Akzeptanz für den Einsatz von Drohnen**

Der Verband Unbemannte Luftfahrt (eine gemeinsame Initiative des Bundesverbands der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) und des Bundesverbands der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie (BDLI) erhob 2017 in einer Studie (Verband Unbemannte Luftfahrt 2017) die Akzeptanz von Drohnen. Demnach verbinden die meisten Menschen (84%) die größte Sorge in Bezug auf Drohnen mit der Störung der Privatsphäre.

Die Akzeptanz für die Verwendung von Drohnen hängt stark von der Art des Einsatzes ab. Während Hilfeinsätze, Inspektion technischer Anlagen und Einrichtungen von der Bevölkerung stark befürwortet werden, lehnt der Großteil die Nutzung als Spielzeug oder für die Lieferung von Paketen in Städten ab. Der Verband Unbemannte Luftfahrt, weist darauf hin, dass es wichtig ist, dass man im Gefährdungsfall nachverfolgen kann, wer die Drohne gesteuert hat. Deswegen sei eine gesetzliche Registrierungspflicht notwendig (Verband Unbemannte Luftfahrt 2017).

Das Deutsche Zentrum für Raum- und Luftfahrt (DLR) veröffentlichte eine Studie zum Einsatz von Drohnen und kommt dabei ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Art des Einsatzes entscheidend für Zustimmung oder Ablehnung ist. Deutliche Zustimmung gibt es auch hier für Katastrophenschutz, Rettungs- und Forschungseinsatz. Die Erfassung von Agrarflächen für eine Optimierung der landwirtschaftlichen Nutzung wird ebenfalls positiv gesehen. Flüge für Werbeaufnahmen, Freizeitaktivitäten und die Paketzustellung werden dagegen eher kritisch gesehen. Generell gibt es mehr Zustimmung zu Drohnenflügen in unbewohnten Gebieten. In städtischen Gebieten befürwortet eine Mehrheit diese in Gewerbe- und Industriegebiete, für städtische Wohngebiete und Altstadtbereiche zeigt sich hingegen eine deutliche Ablehnung. Die Studie gibt auch Aufschluss über die demographische Verteilung von Akzeptanz bzw. Ablehnung: Vor allem jüngere und männliche Befragte äußern Interesse an dieser Technik und akzeptieren diese auch (DLR, 2018).

Auch die Abteilung Unfallforschung und Prävention der AXA Versicherungen AG (Schweiz) betreibt Umfragen zur Akzeptanz von Drohnen (AXA 2018). Nach deren Umfrage fühlen sich 62% der befragten Personen von Drohnen gestört, 36% haben kein Problem damit. Ebenso sagten 62%, dass sie Drohnen tendenziell als etwas Gefährliches einstufen, während 35% diese nicht gefährlich finden. Die Akzeptanz hängt ebenso wie bei den zuvor genannten Studien maßgeblich von deren Nutzungszweck ab. So unterstützen 96% der Befragten Drohneneinsätze bei Naturkatastrophen. Ebenso befürwortet eine Mehrheit den Einsatz von Drohnen für die Überwachung von Industrieanlagen, in der Landwirtschaft, für die Wartung technischer Anlagen sowie für professionelle Foto- und Videoaufnahmen. Demgegenüber steht eine Mehrheit der Nutzung von Drohnen als Spielzeug oder Freizeitgerät skeptisch gegenüber: Mehr als 70% der befragten Personen lehnen dies tendenziell ab – 40% von ihnen sogar sehr entschieden. Um Risiken durch Drohnennutzung zu vermeiden (Schäden durch Absturz), seien klare Regeln für die Nutzung nötig, besonders in der Stadt, wo viele Menschen unterwegs sind. Verursacht eine Drohne einen Unfall, so übernimmt die Haftpflichtversicherung des/der Drohnenpiloten\*in die Kosten. Allerdings geht dies nur, wenn diese Person auch ausfindig gemacht wird. Daher fordern die Unfallforscher\*innen der AXA eine Kennzeichnungspflicht für Drohnen ab 250 g, damit allfällige Unfallopfer durch die Versicherung des Unfallverursachers entschädigt werden können. Auch in der AXA-Studie variiert die Zustimmung mit der Einsatzart (AXA 2018).

## **(2) Akzeptanz für die Verwendung von Robotik und KI:**

Um in Österreich eine Strategie für den Umgang mit Robotik und Künstliche Intelligenz (KI) zu entwickeln, wurde der Österreichische Rat für Robotik und Künstliche Intelligenz (Austrian Council on Robotics and Artificial Intelligence 2018) einberufen. Mitglieder\*innen des Rats sind Expert\*innen aus verschiedenen Bereichen und formen eine interdisziplinäre Gruppe. Im Jahr 2018 wurde das White Paper „Die Zukunft Österreichs mit Robotik und Künstlicher Intelligenz positiv gestalten“ herausgegeben, in dem erste prioritäre Handlungsfelder und Rahmenbedingungen für die Entwicklung einer smarten Robotik- und KI-Strategie definiert sind (Österreichischer Rat für Robotik und Künstliche Intelligenz 2018). Darin wird auch auf Instanzen innerhalb der EU verwiesen, die sich ebenfalls mit dem Umgang mit Robotik und KI beschäftigen (Europäische Kommission o.J., Europäische Kommission 2019).

Grundsätzlich sollen (wirtschaftliche) Stärkefelder, in denen sowohl der akademische Bereich (Wissensgenerierung), als auch der kommerzielle Bereich (Wissensverwertung) bereits sehr gut ausgeprägt sind, durch Robotik und KI gefestigt und konsequent weiterentwickelt werden (Austrian Council on Robotics and Artificial Intelligence 2018). Begründungstechnologie ist in Österreich ein Stärkefeld. Zukünftig sei nach dem Bericht zu erwarten, dass Robotik und KI in unterschiedlicher Ausprägung in nahezu allen Lebensbereichen Einzug halten werden.

Bezüglich Akzeptanz der neuen Technologien wird empfohlen, eine breite Beteiligung von Stakeholdern, inkl. Bürger\*innen, zu organisieren und Bedürfnisse und Ängste der Menschen ernst zu nehmen. Vier Handlungsfelder werden als prioritär für die Entwicklung einer smarten Strategie angesehen:

1. Technologie, F&E, Wirtschaft
2. Arbeitswelt, Qualifizierung
3. Gesellschaft, Recht
4. Bewusstseinsbildung, Kommunikation, Öffentlichkeitsarbeit

Die Technikfolgenabschätzung im Bereich Robotik und KI ist nach dem White Paper (Austrian Council on Robotics and Artificial Intelligence 2018) derzeit unklar, Erfahrungsberichte fehlen. Um schnelle Lernprozesse zu ermöglichen, sollen „use-cases“ identifiziert werden, die sich rasch umsetzen und realisieren lassen. Auf dem darauf aufbauenden Wissen müssen ethische und rechtliche Rahmen geprüft und gegebenenfalls angepasst, sowie geeignete Zertifizierungs- und Auditierungs- bzw. Compliance-Tools entwickelt werden.

Wichtig für Robotik und KI sei, dass sie im direkten Kontakt mit dem Menschen sicher interagieren und dabei einfach und intuitiv bedient werden können. Neben allgemeinen Sicherheits- und Entwicklungsstandards, wie sie von Standardisierungsbehörden und internationalen Expert\*innengruppen (z.B. „Institute of Electrical and Electronics Engineers“ – IEEE) empfohlen werden, sollen in der Ausarbeitung von Empfehlungen und Stellungnahmen auch die Grundsätze der „Responsible Innovation“ (verantwortungsbewusste Innovation) und des „Ethically Aligned Designs“ (ethisch angeglichenes Design) der internationalen IEEE-Initiative berücksichtigt werden.

Der Rat empfiehlt, KI-Systeme – soweit technisch möglich und soweit es zum Schutz von Nutzer\*innen und Betroffenen beiträgt – transparent zu gestalten und Entscheidungen der KI-Systeme nachvollziehbar zu machen („explainable AI“). Derzeit wird dazu unter Expert\*innen etwa die Implementierung einer „Ethical Black Box“ oder der Ansatz der „Counterfactual Explanations“ diskutiert (Austrian Council on Robotics and Artificial Intelligence 2018). Generell ist bei der Entwicklung und beim Einsatz neuer Technologien auf „allgemeine Grundsätze wie Gerechtigkeit und Fairness, Diversität und Inklusion, Berücksichtigung schutzbedürftiger Menschen und Solidarität“ zu achten. Robotik und KI-Technologien müssen sicher zu verwenden sein und den allgemeinen Entwicklungsstandards entsprechen. Wichtige Fragestellungen sind daher, ob es einen Anpassungsbedarf bestehender Standards gibt und ob neue Standards hinzugefügt werden müssen. Die Sicherheit der Technologien beinhaltet sowohl die Maschinensicherheit (Safety) als auch die IT-Sicherheit (Security) sowie die Integration beider Aspekte. Auch auf die Ermöglichung eines hohen subjektiven Sicherheitsempfindens im Umgang mit Robotern und künstlich intelligenten Systemen sollte geachtet werden.

Der Rat empfiehlt darüber hinaus die Frage zu diskutieren, wie in Zukunft Arbeit – bezahlt wie unbezahlt – auf Menschen und Maschinen aufgeteilt werden soll. Dies erfordere auch ein neues Verständnis dafür, was Arbeit sei. Derzeit sei noch unklar, welche Auswirkungen Robotik und KI auf die Zukunft der Arbeit haben werden. Die Prognosen betreffend potenzieller Arbeitsmarkteffekte der neuen Technologien gehen weit auseinander und reichen von Vorhersagen großer Arbeitsplatzverluste bis hin zu positiven Beschäftigungseffekten. Einfache körperliche Tätigkeiten werden innerhalb des wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmens und unter Berücksichtigung der kulturellen Akzeptanz von technischen Systemen übernommen werden. Gleichzeitig sieht der Rat für Robotik einen dringenden Qualifizierungsbedarf bei Beschäftigten. Es wird eine Vielzahl von Arbeitsplätzen geben, die einfache manuelle Tätigkeiten umfassen, die nicht automatisierbar sind oder für die sich eine Automatisierung wirtschaftlich nicht lohnt. Für eine Reihe von Systemen gibt es bereits eine beachtliche Nutzer\*innenzahl im Privatkundensegment: künstliche Assistenzsysteme wie Amazon Alexa, Google Assistant, etc. sowie Reinigungs- und Mähroboter (Österreichischer Rat für Robotik und Künstliche Intelligenz 2018).

Der Rat nimmt Forschungsergebnisse zur Akzeptanz unterschiedlicher „sozialer“, „emotionaler“ oder „humanoider“ Roboter und Hinweise auf öffentliche Vorbehalte gegenüber dem Einsatz solcher

Roboter in unterschiedlichen Tätigkeitsfeldern ernst und weist auf die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen zu ihren psychosozialen und gesellschaftlichen Implikationen hin.

Neben Ängsten vor dem „Ersetzt werden“ und insbesondere der Substitution sozial-emotionaler („menschlicher“) Kompetenzen durch Technologie, sind auch Vorbehalte gegenüber der Abhängigkeit von Maschinen, maschinell getroffenen Entscheidungen und einer damit verbundenen Dominanz algorithmischer Klassifikationsschemata bekannt (Fear of being categorized).

Insbesondere sind Haftungsfragen an die neuen Herausforderungen anzupassen. Auch wenn der Roboter autonom agiert, bedarf es der Zurechnung von rechtswidrigem Verhalten zu einer Person (Ausschluss der Übertragung von rechtlicher Verantwortung an ein autonomes System). Daher ist es gegebenenfalls notwendig, Vorschriften (Recht wie die „Maschinen-Richtlinie“ bzw. technische Standards) hinsichtlich Verantwortlichkeiten und Pflichten anzupassen. Hier ist es denkbar, die Pflichten für Wartung zu erhöhen bzw. verstärkt Instrumente der Gefährdungs- bzw. Produkthaftung einzusetzen.

Schließlich ändert sich durch den Einsatz von autonomen Systemen der strafrechtliche Sorgfaltsmaßstab. Die Nutzer\*innen werden entlastet, hingegen werden Hersteller\*innen bzw. Halter\*innen stärkere Sorgfaltspflichten aufgebürdet. Aus der Sicht des Rates gibt es auch hier Regulierungsbedarf. Der Rat empfiehlt die breite Beteiligung österreichischer Bürger\*innen bei der Entwicklung der österreichischen Robotik- und KI-Strategie zur Information, Aufklärung und Steigerung der Akzeptanz in der Bevölkerung. Als Referenzbeispiel kann etwa die „Montreal Declaration on Responsible AI“ (Université de Montréal, Fonds de recherche du Québec, 2018) herangezogen werden.

### **(3) Akzeptanz bezüglich des Einsatzes von Drohnen und Robotik im Bereich Gebäudebegrünung**

Zusätzlich zur Literaturrecherche ergab die Expert\*innenbefragung im Zuge der Datenerhebung bezüglich Pflege und Monitoring recht ähnliche Ergebnisse. Dabei wurde die Akzeptanz des Monitorings von Vertikalbegrünungen mit Drohnen von den Befragten relativ divers eingestuft, d.h. von großer Befürwortung bis Ablehnung, im Mittel jedoch unterdurchschnittlich bewertet. Dies entsteht vor allem dadurch, dass in keinem der erhobenen Beispiele Budget für Monitoring ausgegeben wird. Der Großteil der Befragten findet es spannend, empfindet jedoch aktuell keine Notwendigkeit dafür. Lediglich für Bereiche, die nicht zugänglich oder nur schwer einsehbar sind, wird großes Potenzial gesehen. Zudem wird es äußerst kritisch gesehen, Fotos von Fassaden zu machen, auf welchem Personen in den Fenstern der Gebäude zu sehen sein könnten.

Ähnlich verhält es sich mit Pflegerobotern, auch hier besteht eine gewisse Skepsis. Die Gründe dafür werden in der Komplexität der Pflegemaßnahmen gesehen. Des Weiteren ist es oft schwer vorstellbar, wie Roboter die unterschiedlichen Pflegeschritte durchführen sollen. Manuelle Aufgaben, wie das Schneiden von Trieben, werden dem Roboter noch zugetraut, für komplexere Tätigkeiten muss jedoch trotzdem eine Fachperson vor Ort sein. Somit kann der Pflegeroboter nur einen geringen Teil der Arbeit übernehmen. Die Befragung ergab auch für die Pflege mithilfe von Robotik eine unterdurchschnittliche Akzeptanz.

## 4. Schlussfolgerungen

### 4.1. Drohnen und Sensorik für das Monitoring von Gebäudebegrünung

Im Trockenstressversuch mit unterschiedlichen Pflanzenarten im Glashaus konnte gezeigt werden, dass gestresste Individuen von nicht gestressten mit unterschiedlichen Fernerkundungssensoren unterschieden werden können. Am raschesten sind Unterschiede mit Thermalsensoren (TIR) feststellbar, da Pflanzen, die Wasserstress ausgesetzt sind, ihre Photosyntheseleistung reduzieren. Bei der Photosynthese wird zeitgleich zur Aufnahme von Kohlendioxid Wasser verdunstet, wodurch die Temperatur der Blätter geringer ist als bei gestressten Pflanzen. Länger anhaltender Wasserstress führt in weiterer Folge auch zu Veränderungen im Blatt. Dies betrifft neben dem Wassergehalt vor allem auch die Zellstruktur aber auch die Konzentration von Blattinhaltsstoffen. Dadurch verändert sich das Reflexionsverhalten des Blattes in den verschiedenen Wellenlängen. Die Versuche zeigten, dass zuerst im Wellenlängenbereich des SWIR (Wassergehalt), später auch im NIR (Zellstruktur) und zuletzt auch VIS (Pigmente) Veränderungen im Reflexionsverhalten erkennbar sind. Während TIR, NIR und VIS mit handelsüblichen und für Drohnen geeignete Sensoren bereits sehr gut erfasst werden können, sind gute SWIR-Sensoren für Drohnen noch Mangelware.

Neben dem Stress der Pflanzen wurden die Multispektraldaten auch zur Quantifizierung der Biomasse verwendet. Die bekannten Zusammenhänge zwischen NDVI und Blattfläche bei senkrechter Betrachtung wurden in den Versuchen auch bei seitlicher Betrachtung gefunden. Für das Monitoring von Grünfassaden können die gewünschten Daten mit unterschiedlichen Sensoren aufgenommen werden. Für die detaillierte Datenaufnahme von vor allem größeren Wänden, bietet es sich an die Fassade mit einer Drohne abzufliegen. Um diese teilweise sehr geringen Unterschiede zwischen den Pflanzen zu erfassen, müssen die Daten bei optimalen Aufnahmebedingungen aufgenommen werden. Es zeigte sich, dass grundsätzlich Daten in guter Qualität von Fassadenwänden mit unterschiedlicher Wandausrichtung (Nord, Süd, West) aufgenommen werden können, wobei je nach Ausrichtung die Tageszeit der Datenaufnahme einen großen Einfluss auf die Datenqualität hat. Die Südausrichtung zeigte dabei konstant die beste Bildqualität. Durch die Bildung von Vegetationsindizes können Beleuchtungsunterschiede kompensiert und die Auswertbarkeit der Daten erhöht werden. Zusätzlich zu guter Beleuchtung der Pflanzen können spiegelnde Elemente in den Fassaden (Fenster) die Datenaufnahme erschweren. Die üblicherweise stark überlappende Aufnahme der Daten kann dieser Problematik aber entgegenwirken.

Tabelle 7 bietet einen Überblick über die Potenziale verschiedener Fernerkundungssensoren für die Erfassung unterschiedlicher, für das Monitoring von Gebäudebegrünung relevanter, Parameter. Aufgrund der unterschiedlichen Stärken der Sensoren wird die Verwendung mehrerer Sensoren zielführend sein. Dies wird nur mit Drohnen (uLFZ) der Klasse 1 und für urbane Gebiete Kategorie C möglich sein. Neben den rechtlichen Herausforderungen, wie z.B. die notwendige Genehmigung von Befliegungen im Wiener Stadtgebiet durch die Austro Control, sind auch technische Herausforderungen zu beachten, wie z.B. Stromleitungen für Beleuchtung oder Straßenbahnen. Daher werden Befliegungen nur dann sinnvoll sein, wenn diese für die Erfassung der gesamten Begrünung unumgänglich sind, also z.B. bei höheren Gebäuden bzw. Gründächern. Bei Fassadenbegrünungen mit geringer Höhe könnte die Datenaufnahme vom Boden aus bzw. mittels Stative eine Alternative darstellen. Unabhängig davon, wie die Aufnahme der Bilddaten erfolgt, sind datenschutzrechtliche Bestimmungen zu beachten. Dies betrifft vor allem auch die Abbildung von Personen.

Sensor	Biomasse-/ Deckungsgrad	3D-Modellierung	Vitalitätsanalyse	Früherkennung Wasserstress
RGB-Kamera	++	+++	+	-
Multispektralkamera VIS inkl. NIR	+++	+	+++	-
Multispektralkamera VIS inkl. NIR+SWIR*	+++	+	+++	+
Thermalkamera TIR	-	-	+++	+++

*Tabelle 7: Zusammenfassende Bewertung unterschiedlicher für den Einsatz auf Drohnen geeigneter Fernerkundungssensoren basierend auf den im Zuge von DROB gewonnenen Erkenntnissen (+++ sehr hohes Potenzial, ++ hohes Potenzial, + geringes Potenzial, - kein Potenzial, \* derzeit noch keine marktfähigen Lösungen für den Einsatz mit Drohnen vorhanden)*

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dieser Studie wurden die Stärken und Schwächen eines Monitorings von Fassadenbegrünung mittels Drohnen im Vergleich zu rein visueller Begutachtung vor Ort evaluiert und nachfolgend zusammengefasst:

### Stärken

- Objektivität – z.B. exakte Beurteilung des Deckungsgrad von Fassaden oder Dachbegrünungen, Quantifizierung des Begrünungserfolges oder Überprüfung maximaler Bedeckungsgrade von Fassaden
- Dokumentation und Vergleichbarkeit der Beurteilung durch Bildmaterial besser als rein verbale Beschreibung
- 3D-Daten über Pflanzen und Montagesysteme bieten zusätzliche Informationen, z.B. für eine BIM-Integration
- Datenaufnahme auch bei schwer zugänglichen oder nicht einsehbaren Bereichen möglich, z.B. sehr hohe Gebäude
- Detailliertere Daten über Pflanzen als Entscheidungsgrundlage für Pflegeeingriffe
- Bildmaterial ermöglicht ortsungebundene Entscheidungen (Vergleich mit anderen Wänden, Aufnahmen anderer Jahre usw.)
- Kostenersparnis, wenn visuelle Begutachtung nur mittels Hubsteiger oder Fassadenkletterer\*innen möglich wäre
- Datenmaterial aus unterschiedlichsten Perspektiven möglich und so z.B. auch für Werbe- und Präsentationszwecke nutzbar

### Schwächen

- Befliegen mit größeren Drohnen im urbanen Umfeld herausfordernd: physische Barrieren, wie Stromleitungen bzw. rechtliche Barrieren (Genehmigungen)
- Datenschutzproblematik (Fenster, Personen im Umkreis)
- Nicht alle Arbeitsschritte der Standardbegutachtung sind mittels Drohne möglich, z.B. Zustandsüberprüfung der Kletterhilfen oder Zustand der Bewässerungsanlage
- Aufwand der Datenerhebung bei kleinen Projekten ev. höher als herkömmliche Begutachtung
- Zusätzliches Equipment (Sensoren, Drohnen) und Knowhow wird benötigt, ev. Vergabe an Expert\*innen notwendig

Aktuell steigt auch die Nachfrage der Begrünung von Hochhäusern. Gerade bei diesen kostenintensiveren Projekten wird ein objektives Monitoring der Bepflanzung notwendig sein (Mohammadi und Calautit 2019). Vor allem bei höheren Häusern wird eine Drohnenbefliegung oft die einzige effektive Methode darstellen, um ein objektives Monitoring sicherzustellen.

## 4.2. Robotik für die Pflege von Gebäudebegrünung

In DRoB gewonnene Erkenntnisse in Bezug auf Robotik für die Pflege von begrünten Fassaden betreffen vor allem die Vielfalt der eingesetzten Begrünungssysteme, welche für eine Konzeptionierung eines Roboters herausfordernd sind. Eine automatisierte Pflege muss auf das verwendete System zugeschnitten sein.

Für einen optimalen Einsatz des Roboters auf der Begrenzungsleiste für *Parthenocissus tricuspidata* ist eine Adaptierung ebenjener Leiste notwendig, damit der Roboter besser daran anhaften kann. Für Anwendungen, die über eine Pflege von einer mit *Parthenocissus tricuspidata* begrünten Wand inklusive Begrenzungsleiste hinausgehen, sind weitere Sensoren bzw. Schienen oder Seile notwendig, um eine Fortbewegung zu ermöglichen. Sensorik, um den Abstand zwischen Roboter bzw. Schneidmittel und den zu pflegenden Pflanzen einhalten zu können, könnte mit Ultraschall oder einem LiDAR ähnlichen System verwirklicht werden. Strategisches Zukunftsziel ist es, einen Roboter zu entwickeln, der zwischen den Arten, dem Wachstum, der Positionierung, dem Zustand und den Pflegebedürfnissen der Pflanzen unterscheiden und danach handeln kann.

Für eine gleichmäßig bewachsene, vertikale Wand, welche nur einen groben Schnitt benötigt, wird ein Trimmesser voraussichtlich funktionieren. Die meisten begrünten Wände haben jedoch eine breite Varietät an Pflanzen, welche unterschiedliche Pflegeansprüche haben und benötigen ein feineres Schneidmittel anstatt einer großflächigen Sense.

In Rasenrobotern verwendete Motoren und Regelungssysteme sind auch in vertikal agierenden Robotern einsetzbar. Die Akkulauf- und Ladezeiten von Haushaltsrobotern sind mittlerweile beachtlich. Ein System mit Akku und Ladestation ist auf einer vertikalen Wand ebenfalls denkbar.

Wenngleich die Verwertungschancen als relativ hoch eingeschätzt werden können, ist eine Roboterentwicklung mit hohen Entwicklungskosten verbunden. Laut dem deutschen Online-Portal für Statistik (Statista 2018) wird der Umsatz mit Servicerobotern weltweit (2018-2025) als stetig steigend eingeschätzt. Für „professionelle Serviceroboter“ waren zum Zeitpunkt der Berichtslegung keine Daten vorhanden, die Trendentwicklung ist aber ähnlich einzuschätzen.

Die IFR (International Federation of Robotics 2019) zählte 2019 mehr als 750 Unternehmen, die professionelle Serviceroboter herstellen oder kommerzielle Forschung für vermarktbar Produkte betreiben. Die Anzahl verkaufter professioneller Serviceroboter stieg von 168.000 im Jahr 2017 auf 271.000 im Jahr 2018 an (Steigerungsrate 61%). Der Verkaufswert stieg 2018 auf 9,2 Mrd. USD an. Alleine für den Hausgebrauch wurden 2018 16,3 Mio. Serviceroboter im Wert von 3,66 Mrd. USD verkauft. Diese Art Roboter wird mittlerweile in beinahe jeder Art von Handelsgeschäft bzw. Fachgeschäften wie Gartencenter vertrieben, wodurch die Konsument\*innen leichten Zugang haben. Laut IFR ist das Marktpotenzial zwar limitiert, weil diese Roboter nicht auf jedem Untergrund arbeiten können und ihre Laufzeit an die Batteriekapazität gebunden ist. Dennoch wird mit einem starken Anstieg von Verkaufszahlen für Haushaltsroboter gerechnet.

Das Projektteam wird mit den gewonnenen Daten weitere Forschung in Richtung professioneller Serviceroboter für die automatisierte Pflege von begrünten Wänden anstreben. Schwerpunkte werden die Applikation auf möglichst viele verschiedene Begrünungssysteme sein, sowie die Datenverwaltung mithilfe von Clouds und selbstlernenden Algorithmen.

Folgende Übersicht soll, basierend auf den Ergebnissen dieser Studie, die Stärken und Schwächen eines Robotereinsatzes zur Pflege von Fassadenbegrünung im Vergleich zu manueller Pflege zusammenfassen:

### **Stärken**

- Keine Hubsteiger oder Fassadenkletterer\*innen notwendig, wodurch vor allem bei hohen Gebäuden der Roboter eine effiziente Alternative darstellen könnte
- Möglichkeit, die Pflegeeingriffe zu standardisieren, wodurch die Pflege mit gleichmäßiger Qualität durchgeführt werden kann
- Möglichkeit von regelmäßige Pflegeeingriffe, sofern der Roboter fix an der Wand verbleibt

### **Schwächen**

- Pflegemaßnahmen sind vor allem bei wandgebundenen Begrünungen sehr komplex und daher nur schwer durch Roboter durchzuführen, z.B. gezielter Rückschnitt, Nachpflanzung von ausgefallenen Pflanzen und Austausch von technischen Systemkomponenten im Zuge eines Pflegeeinsatzes.
- Bauliche Gegebenheiten können hinderlich für den Einsatz von Robotern sein, z.B. Stromleitungen, Licht etc.
- Notwendigkeit eines schienengeführten Roboters bei bodengebundenen Fassadenbegrünungen eventuell obsolet, wenn die Pflanzenbegrenzungsleiste ihren Zweck voll erfüllt.
- Notwendigkeit von unterschiedlichen Roboterfähigkeiten bei gleichzeitig hohen Entwicklungskosten bis zur Marktreife

In weiterer Folge sollten weitere Untersuchungen bezüglich eines Robotereinsatzes abgeklärt werden. So ist z.B. die Haftungsfrage oder ob der Roboter auch unbeobachtet eingesetzt werden darf noch nicht vollständig geklärt. Kristallisieren sich sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten von Robotern heraus, könnten Contracting-Modelle Abhilfe schaffen, um hohe Investitionskosten einzusparen.

### **4.3. Marktpotenzial und Status-Quo im Bereich Pflege und Monitoring von Gebäudebegrünung**

Die DRoB Projektergebnisse sind vor allem für Unternehmen interessant, welche in der Pflege von Fassadenbegrünungen tätig sind, aber auch für Entwickler\*innen zukünftiger Begrünungssysteme, da die derzeitige Praxis und Hemmnisse als auch Potenziale und Innovationserfordernisse klar ablesbar sind.

Aus Sicht des Projektteams haben die Erhebungen im Bereich Pflege von Fassadenbegrünungen deutlich gezeigt, dass die Akzeptanz für den Einsatz von Robotern und Drohnen in der derzeitigen Pflegebranche noch nicht gegeben ist. Derzeit bestehen noch viele Herausforderung am Weg zu einem stabilen Pflegemarktsegment, diese sind u.a.:

- Die Steigerung der Akzeptanz und der Notwendigkeit von Pflegemaßnahmen von Fassadenbegrünungen
- Das Aufzeigen der Pflege als Wertschöpfung und Arbeitsplatzschaffung
- Aus- und Weiterbildung von auf Pflege fokussierten Betrieben und ihrer MitarbeiterInnen, auch hinsichtlich der zukünftigen ÖNORM L1136 Vertikalbegrünung, um fachgerechte Pflegemaßnahmen gewährleisten zu können.
- Faire und nachvollziehbare Preisgestaltung bei der Pflege
- Bildung von Pflegenetzwerken (ev. auch zur gemeinsamen Investition/Nutzung von Maschinen und der Wirtschaftlichkeit) forcieren
- Entwicklung von wartungsärmeren und weniger pflegeintensiven Begrünungssystemen

Positiv zu sehen ist, dass Pflege zusammenhängend mit Förderungen und Vorgaben für Begrünungen zunehmend von öffentlicher Seite eingefordert wird. In Summe ergibt sich mit einem generell wachsenden Markt in der Fassadenbegrünung auch mehr Pflegevolumen. Es ist daher künftig von einer Spezialisierung der Betriebe auszugehen, wodurch auch die Akzeptanz und Notwendigkeit für effizientere Arbeitsvorgänge, z.B. durch den Einsatz von Robotern und Drohnen steigen wird. Bis dahin gilt es jedoch, einerseits an Lösungen bis zu deren Marktreife weiterzuarbeiten, andererseits die vorhandenen und zukünftigen Wertschöpfungsträger\*innen darauf optimal vorzubereiten.

## 5. Ausblick und Empfehlungen

Für die beiden in DRoB behandelten Themenbereiche Monitoring und automatisierte Pflege besteht weiterer Forschungsbedarf, wobei vor allem ein Fokus auf unterschiedliche Begrünungssysteme gelegt und mögliche Applikationen ausgearbeitet werden sollten.

Für Demonstrationsvorhaben eröffnen sich große Chancen, die automatisierte Pflege tatsächlich durchzuführen und die Kompatibilität zu verschiedenen Begrünungssystemen zu testen, sowie eine Weiterentwicklung der Kombination von Vegetationsbegrenzungsleiste und Schneidroboter für *Parthenocissus tricuspidata* zu realisieren und in einen Testbetrieb zu bringen. Für eine erfolgreiche Durchführung müssen relevante Stakeholder\*innen unbedingt miteinbezogen werden (Anbieter\*innen von Begrünungslösungen, Pflegeunternehmen, Gebäudeeigentümer\*innen, Versicherungsanbieter\*innen, Personen der öffentlichen Verwaltung sowie Standardisierung). Bei einem potenziellen Demonstrationsvorhaben sollten jedenfalls verschiedene Ansätze von Robotersystemen für verschiedene Fassadenbegrünungssysteme im Vergleich getestet werden.

Durch technische Hilfsmittel lässt sich die Pflege der Grünanlagen einerseits stark vereinfachen, aber auch teilweise automatisieren. So können durch automatische Bewässerungsanlagen große Flächen an Pflanzen je nach Bedarf mit Wasser versorgt werden. Diese Anlagen tragen zur Ressourceneffizienz bei und ermöglichen einen sparenden Umgang mit Wasser. Durch geregelte Belichtungsanlagen können Pflanzen auch in Innenräumen mit nahezu natürlichen Lichtverhältnissen und Tageszyklen versorgt werden. Mit Hilfe dieser computergestützten Anlagen können Lebensdauer, Gesundheit und somit der Ertrag der Pflanzen maximiert werden. Auch Roboter können die Pflege maßgeblich verbessern. So können etwa Schnittroboter dazu eingesetzt werden, um die Pflanzenhöhe auf Flachdächern zu regulieren. Dies bietet sich vor allem auf großflächigen Hallen oder Anlagen, die in Kombination mit Photovoltaikmodulen umgesetzt werden, an.

Eine weitere Empfehlung ist, den Bereich Robotereinsatz auch auf die Dachbegrünung, speziell in Kombinationsbauweise mit Photovoltaikanlagen, auszuweiten (Rückschnitt, Nährstoffgabe, Kontrolltätigkeiten). Speziell eng stehende und tief oder flach aufgeständerte Solaranlagen sind durch den Menschen schwer für Pflegearbeiten von darunterliegenden Begrünungen zugänglich. Deren Durchführung ist jedoch aus Flächeneffizienzgründen und auch aufgrund baulicher Grundgegebenheiten notwendig.

Im Bereich Sensorik und Drohneneinsatz für das Monitoring von Gebäudebegrünung besteht weiterer Forschungsbedarf, sowohl bezüglich der grundlegenden Eignung als auch der möglichen Anwendungsfälle. Zusätzliche Tests der Sensorik im Feld wären wünschenswert. Dabei sollten auch längere Testszenarien mit mehrmaliger Datenaufnahme angestrebt werden. Die unterschiedliche Sensorik sollte dabei auch im Zusammenhang mit unterschiedlichen Fassadentypen untersucht werden. Ein weiterführendes DRoB-Demovorhaben sollte demnach eine Testumgebung für unterschiedliche Systemkombinationen unter aktiver Einbindung aller relevanten Stakeholder\*innen umsetzen und die Variabilität der Gebäudebegrünung möglichst vollständig abdecken. Neben der Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten sollte dabei auch ein Fokus auf die wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten gelegt werden.

Für eine standardisierte Erfassung des Vegetationszustandes eignet sich der Einsatz von Drohnen. Diese betrifft die Erfassung des Vegetationsdeckungsgrades von Flachdächern und

Fassadenbegrünungen mithilfe von RGB-Fotos, sowie Vitalitätserhebungen mit Thermal- und Multispektralsensoren. Die Aufnahme von Bilddaten könnte auch die laufende Fernüberwachung durch Pflegebeauftragte maßgeblich unterstützen. Die Möglichkeiten der Inspektionstätigkeit mittels Bilddatengenerierung und -auswertung, verbunden mit der besseren Dokumentierung, legen das aktive Heranführen dieser Möglichkeiten an die Pflegebranche im Zuge eines zukünftigen Demovorhabens nahe.

Abseits der Vegetationserfassung und -bewertung besteht die Möglichkeit des Drohneneinsatzes für die Ausbringung von Pflanzenschutzmittel bzw. Nährstoffe. Vergleichbare Systeme wurden in landwirtschaftlichen Sonderkulturen bereits erfolgreich getestet. Dabei ist zu beachten, dass neben den herkömmlichen Herausforderungen bezüglich des Drohneneinsatzes noch zusätzlich Aspekte, vor allem im Bereich der Sicherheit, betrachtet werden müssen. Damit wird in diesen Einsatzszenarien derzeit noch eher wenig Potenzial gesehen.

## 6. Verzeichnisse

### 6.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus von oben. Die Buchstaben A-D stehen für die vier verschiedenen Arten (A: <i>Brunnera macrophylla</i> , B: <i>Geranium sanguineum</i> , C: <i>Bergenia cordifolia</i> , D: <i>Heuchera x cultorum</i> ), welche durch die gestrichelte Linie in die unterschiedlichen Bewässerungsregime eingeteilt sind. P1 – G bis P5 – S kennzeichnen die Bodenfeuchtesensoren.....	17
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Sensorerhebung des Trockenstressversuchs im Glashaus der Universität für Bodenkultur Wien.....	18
Abbildung 3: Mittlere Spektralsignaturen der vier getesteten Pflanzenarten zum Beginn des Versuches mit dem Spektro-radiometer gemessen und schematische Hervorhebung des Aufnahmebereiches des Multispektralsensors (farbige Balken). ....	19
Abbildung 4: DJI Mavic 2 Enterprise (Dual edition) im Flug (Immitzer, 2019) .....	22
Abbildung 5: DJI M600pro (modifiziert) in Draufsicht (linkes Bild) und Seitenansicht (rechtes Bild) (Lederbauer, 2019).....	22
Abbildung 6: Klappbare Halterung für multispektrale bzw. thermale Sensorik an DJI M600pro (linkes Bild); Sony A7r auf DJI Zenmuse (rechtes Bild) (Lederbauer 2019).....	23
Abbildung 7: Beispielobjekt zur Ermittlung der Pflegekosten von bodengebundenen Fassadenbegrünung in Wien (Pfeiffer 2018).....	34
Abbildung 8: Diagramm der Bodenfeuchtemessung in den Töpfen der unterschiedlichen Bewässerungsstufen innerhalb der Versuchslaufzeit, die horizontale Achse gibt die Versuchslaufzeit an und die vertikale Achse den volumetrischen Wassergehalt kalibriert nach der TOPP Formel (1980) .....	40
Abbildung 9: Messungen der stomatären Leitfähigkeit der vier verschiedenen Arten <i>Bergenia cordifolia</i> , <i>Brunnera macrophylla</i> , <i>Geranium sanguineum</i> und <i>Heuchera x cultorum</i> , unter den verschiedenen Bewässerungsstufen von 03.05.2019 bis zum 24.05.2019.....	41
Abbildung 10: RGB Aufnahme der Zeitrafferkamera des Trockenstressversuchsaufbaues zum Versuchsende (06.09.2019). Die künstlichen Targets in unterschiedlicher Farbe dienten als Referenz für die Multispektralkamera.....	42
Abbildung 11: Multispektralaufnahme in Falschfarbendarstellung (R=NIR, G=Rot, B=Grün) des Trockenstressversuchsaufbaues am 13.05.2019. Die künstlichen Targets in unterschiedlicher Farbe dienten als Referenz für die Umrechnung von digital numbers (DN) auf Reflexionsgrad. ....	42
Abbildung 12: Spektrale Signaturen aus der Gruppe der Pflanzen ohne Wasserversorgung; in grün jeweils die letzte Messung, bei der keine Veränderung zu den vorherigen Messungen feststellbar war, dunkler werdende Rottöne kennzeichnen die zunehmende Veränderung. Die sechs Balken charakterisieren schematisch den Aufnahmebereich des Multispektralsensors. ....	43
Abbildung 13: Änderung des NDWI 2130 der einzelnen Bewässerungsregime über die Zeit getrennt nach den vier untersuchten Pflanzenarten.....	44
Abbildung 14: Thermalaufnahmen des Wasserstressversuchs vom 13.05.2019 in einer Gesamtaufnahme.....	45

Abbildung 15: Detailaufnahmen der Gruppen keine (linker Teil der Detailaufnahmen) und optimale Wasserversorgung (rechter Teil der Detailaufnahmen) zu unterschiedlichen Tageszeiten (13.05.2019). .....	45
Abbildung 16: Vergleich der Strahlungstemperatur gemessen mit der Thermalkamera auf Pflanzenbereichen der vier untersuchten Arten aus den Gruppen keine (rot) bzw. optimale (blau) Wasserversorgung und der Glashaustemperatur (schwarz) an zwei warmen Tagen.....	46
Abbildung 17: Dokumentationsschritte des Blattschnittversuchs in Falschfarbendarstellung (R=NIR, G= Rot, B= Grün) am Beispiel <i>Bergenia cordifolia</i> .....	47
Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Blattfläche von <i>Bergenia cordifolia</i> und dem Vegetationsindex NDVI (links) und Beispiele des berechneten NDVI von drei verschiedenen Schnittstufen wobei die Blattfläche (grün dargestellt) von oben nach unten abnimmt (rechts). .....	48
Abbildung 19: Veranschaulichung der Belichtungszustände in Falschfarbendarstellung der Multispektralaufnahmen unterschiedlicher Fassaden mit ähnlicher Bepflanzung (F1-F4) bei Nord, West und Süd-Ausrichtung der Fassade.....	49
Abbildung 20: Orthophotos der drei unterschiedlich ausgerichteten Fassaden des Bepflanzungstyps F 1 zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten in Falschfarbendarstellung (R=NIR, G=Rot, B=Grün).....	50
Abbildung 21: Vergleich von RGB-Aufnahme, Multispektralaufnahme (zeitversetzt aufgenommen) in Falschfarbendarstellung „CIR“ (R=NIR, G=Rot, B=Grün) und Thermalaufnahme (TIR) der drei begrünten Seiten des Fassadentyps 4 zur Mittagszeit.....	51
Abbildung 22: Falschfarbendarstellung (CIR, R=NIR, G=Rot, B=Grün) eines Orthophotos und der daraus berechnete NDVI der Westseite des Fassadentyps 4 bei der morgendlichen Datenerfassung.	52
Abbildung 23: Visualisierung des Oberflächenmodells als 3D-Mesh einer Fassadenbegrünung von vorne und von der Seite. ....	53
Abbildung 24: Mittels terrestrischem Laserscanner erfasste Punktwolke (Grünfassade MA 48, Wien) .....	54
Abbildung 25: Aus der Punktwolke und Farbinformation abgeleitete Orthofotos (MA 48 Zentrale, Detail) .....	54
Abbildung 26: Unbearbeitete Punktwolke der Grünfassade (Hackengasse 18, 1150 Wien).....	55
Abbildung 27: Orthofoto der zurückgeworfenen Signalstärke (Hackengasse 18, 1150 Wien).....	55
Abbildung 28: Schematische Darstellung des schienengeführten Roboters für den Pflegeschnitt: (a) schematische Darstellung des Roboters, (b) Übersichtsansicht zur Beurteilung des Größenverhältnisses, (c) Seitenansicht, (d) Draufsicht (alchemia-nova 2019). .....	62

## 6.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der vier verschiedenen Bewässerungsgruppen: keine Wasserversorgung, geringe Bewässerung, ideale Bewässerung und Staunässe.....	16
Tabelle 2: Einteilung der Pflege von Living Wall Systemen nach Giardano in Routine- und Spezialmaßnahmen.....	30
Tabelle 3: Pflegekostenaufstellung für unterschiedliche Arten von Fassadenbegrünungen, die Preise beziehen sich auf Quadratmeter Pflege pro Jahr. *Mittelwert von vier unterschiedlichen Living Wall Systemen.....	31
Tabelle 4: Pflegekosten von vier verschiedenen Living Wall Systemen, ermittelt an einer 6 m <sup>2</sup> großen Versuchsfläche über zwei Jahre (Eppel 2016) .....	32
Tabelle 5: Pflegekosten unterschiedlicher Beispielobjekte, die Preise sind € pro Quadratmeter pro Jahr. + steht für Kombination mehrerer Begrünungsmaßnahmen. (*der Herstellungskosten) Quellen der Tabelle sind (GRÜNSTATTGRAU Forschungs- und Innovations-GmbH 2019) und durchgeführte Erhebungen von Objekten.....	33
Tabelle 6: Arbeitspositionen der Angebote mit entsprechendem Endpreis inklusive Umsatzsteuer. .	35
Tabelle 7: Zusammenfassende Bewertung unterschiedlicher für den Einsatz auf Drohnen geeigneter Fernerkundungssensoren basierend auf den im Zuge von DRoB gewonnenen Erkenntnissen (+++ sehr hohes Potenzial, ++ hohes Potenzial, + geringes Potential, - kein Potential, * derzeit noch keine marktfähigen Lösungen für den Einsatz mit Drohnen vorhanden).....	69

### 6.3. Literaturverzeichnis

Agrobot, o.J. Online verfügbar unter <http://agrobot.com/> (abgerufen am 16.06.2019, 8:30)

Ampatzidis Y., De Bellis L., Luvisi A.: iPathology: Robotic Applications and Management of Plants and Plant Diseases. *Sustainability* 9, 1010, 2017.

AXA: Drohnen: so steht's um ihre Akzeptanz, 2018. Online verfügbar unter <https://www.axa.ch/de/ueber-axa/blog/trend/drohnen-akzeptanz-umfrage-tipps.html>, abgerufen am 09.09.2019)

Austrian Council on Robotics and Artificial Intelligence: Die Zukunft Österreichs mit Robotik und Künstlicher Intelligenz positiv gestalten, 2018. Online verfügbar unter [https://www.acrai.at/wp-content/uploads/2019/04/ACRAI\\_whitebook\\_online\\_2018.pdf](https://www.acrai.at/wp-content/uploads/2019/04/ACRAI_whitebook_online_2018.pdf) (abgerufen am 15.12.2019, 9:30)

Herrmann Eva Maria, Westphal Tim: *Building Information Modelling I Management*, Band 2, Detail Research, 2017.

BioTehna, 2020. Green Wall. Online verfügbar unter: <https://biotehna.org/en/projects/green-wall/> (abgerufen am 12.6.2019, 9:15)

Blue River, o.J. Online verfügbar unter <http://about.bluerivertechnology.com/> (abgerufen am 16.06.2019, 9:00)

Bulgakov Alexey, Emelianov Sergey, Schach Rainer, Sayfeddine Daher, Erofeev Vladimir: Maintaining vertical gardens using quadrotor aerial inspection. Presented at the International Construction Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Vancouver, BC 2015.

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Entwicklung: *Digitalisierung in der Landwirtschaft*, S.18ff. Wien, 2018.

Bundesverband GebäudeGrün e.V.: *Grüne Innovation Fassadenbegrünung. Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung*, 2018. Online verfügbar unter <https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Fassadenbegrueung/FBB-Fassadenbegrueung.pdf> (abgerufen am 11.11.2019, 11:34)

Chew Michael Y.L., Conejos Sheila, Azril Fikril Hakim Bin: Design for maintainability of high-rise vertical green facades. In: *Building Research & Information* 47 (4), S. 453–467, 2019.

Darvishzadeh Roshanak, Skidmore Andrew, Atzberger Clement, van Wieren Sip: Estimation of vegetation LAI from hyperspectral reflectance data: Effects of soil type and plant architecture. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10, 358–373. 2008.

Der Standard: Efeu stürzte von Grazer Hauswand auf Gehsteig und Radweg, 2017. Online verfügbar unter <https://www.derstandard.at/story/2000056572923/efeu-stuerzte-von-grazer-hauswand-auf-gehsteig-und-radweg> (abgerufen am 21.01.2020, 16:40)

- DLR - Deutsches Zentrum für Raum- und Luftfahrt, 2018. Studie Akzeptanz unbemannter Luftfahrzeuge. Online verfügbar unter [https://www.dlr.de/content/de/downloads/2018/akzeptanz-unbemannter-luftfahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.dlr.de/content/de/downloads/2018/akzeptanz-unbemannter-luftfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile&v=10) (abgerufen am 10.12.2019, 10:32)
- Ecorobotix, o.J. Online verfügbar unter <https://www.ecorobotix.com/de/> (abgerufen am 15.6.2019, 09:45)
- Energid, o.J. Online verfügbar unter <https://www.energid.com/industries/agricultural-robotics> (abgerufen am 15.06.2019, 12:35)
- Eppel Jürgen: Vertikalbegrünungssysteme im Begrünungsvergleich. Bayrische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau Veitshöchheim. In: Gartenpraxis (06/2016), S. 44–51, 2016. Online verfügbar unter [https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflge/dateien/vertikales\\_gruen\\_zukunft\\_in.pdf](https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflge/dateien/vertikales_gruen_zukunft_in.pdf) (abgerufen am 11.11.2019, 11:32)
- Erylon, o.J. Online verfügbar unter <https://www.erylon.com/> (abgerufen am 14.5.2019, 11:30)
- Europäische Kommission: The European AI Alliance, o.J. Online verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/european-ai-alliance> (abgerufen am 15.12.2019, 8:45)
- European Federation Green Roofs and Walls: White Paper, 2015. Online verfügbar unter [https://efb-greenroof.eu/wp-content/uploads/2016/12/efb\\_whitepaper\\_2015.pdf](https://efb-greenroof.eu/wp-content/uploads/2016/12/efb_whitepaper_2015.pdf) (abgerufen am 11.11.2019)
- Europäische Kommission: High Level Expert Group on Artificial Intelligence, 2019. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/high-level-expert-group-artificial-intelligence> (online abgerufen am 15.12.2019, 9:00)
- Farmbot: Open-Source CNC Farming, o.J. Online verfügbar unter <https://farm.bot/> (abgerufen am 06.05.2019, 8:30)
- Feng Quaniong, Liu Jiantao, Gong Jianhua: UAV Remote Sensing for Urban Vegetation Mapping Using Random Forest and Texture Analysis. In: Remote Sens. 7, S. 1074–1094, 2015.
- Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V.: 7. FBB-Symposium Fassadenbegrünung, 2014. Vortragsreihe zu Themen der Fassadenbegrünung. Online verfügbar unter [https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-symposiumen/Fassadenbegruenungssymposium/7\\_FBB-Fassadenbegruenungssymposium\\_2014.pdf](https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-symposiumen/Fassadenbegruenungssymposium/7_FBB-Fassadenbegruenungssymposium_2014.pdf) (abgerufen am 11.11.2019)
- Forschungsgesellschaft Landesentwicklung Landschaftsbau e.V.: FLL - Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanzen, 2018.
- Forschungsplattform BAU.KUNST.ERFINDEN: PLOTBOT/CRAWLER. Universität Kassel, Kassel o.J. Online verfügbar unter <http://www.baukunstfinden.org/en/research/projects/h1168h1/> (abgerufen am 06.07.2019, 10:45)

- Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung: Roboter SIRIUS, o.J. Online verfügbar unter <https://www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/robotic-systems/facade-cleaning-sirius.html> (abgerufen am 06.07.2019, 11:15)
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung: Green Wall Robot, 2018a. Online verfügbar unter <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/mobiler-roboter-pflegt-fassadenbegruenung.html> (abgerufen am 7.5.2019, 10:37)
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung: Handout Green Wall Robot, Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Department Robot and Assistive Systems, University of Stuttgart 2018b
- Galler: Persönliche Kommunikation mit Niklas Galler, Design Director, Managing Partner bei nr21 Design, 25.11.2019
- Gamon John A., Peñuelas Josep, Field Christopher B.: A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. In: *Remote Sens. Environ.* 41, S. 35–44, 1992.
- Gao Bo-Cai: NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* 58, S. 257–266, 1996.
- Giordano Roberto, Montacchini Elena, Tedesco Silvia, Perone Alessandra: Living Wall Systems: A Technical Standard Proposal. In: *Energy Procedia* 111, S. 298–307. 1980.
- GRÜNSTATTGRAU Forschungs- und Innovations-GmbH: Fassaden & Vertikalbegrünung - Internationale & nationale Best-Practice-Beispiele. In: *Magistrat der Stadt Wien MA 19 - Architektur und Stadtgestaltung*, 2019. Online verfügbar unter <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/e000037.pdf> (abgerufen am 03.03.2020)
- Hoelscher Marie-Therese, Nehls Thomas, Jänicke Britta, Wessolek Gerd: Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. In: *Energy and Buildings* 114, S. 283–290, 2016.
- Hollands Jutta, Korjenic Azra: Ansätze zur ökonomischen Bewertung vertikaler Begrünungssysteme. In: *Bauphysik* 41 (1), S. 38–54, 2019.
- International Federation of Robotics, 2019. Online verfügbar unter [https://ifr.org/img/office/Sales\\_Flyer\\_World\\_Robotics\\_2019\\_web.pdf](https://ifr.org/img/office/Sales_Flyer_World_Robotics_2019_web.pdf) (abgerufen am 19.12.2019, 13:15)
- Jones Hamlyn G., Vaughan Robin A.: *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford University Press, U.S.A., New York, NY, USA 2010.
- Kampen Max, Lederbauer Stefan, Mund Jan-Peter, Immitzer Markus: UAV-Based Multispectral Data for Tree Species Classification and Tree Vitality Analysis. Presented at the Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF, DGPF, S. 18, Wien 2019.
- Kaneko Korehisa, Nohara Seiich: Review of Effective Vegetation Mapping Using the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Method. *J. Geogr. Inf. Syst.* 06 (733), 2014.

KITE Robotics, o.J. Online verfügbar unter <https://www.kiterobotics.com/> (abgerufen am 5.7.2019, 10:30)

Klussmann: Persönliche Kommunikation mit Univ.-Prof. Dr. Heike Klussmann, Universität Kassel, 12.12.2019.

Kraus: Persönliche Kommunikation per E-Mail mit Dr.-Ing. Werner Kraus, Abteilungsleiter Roboter- und Assistenzsysteme, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, 11.12.2019.

Ländliches Fortbildungsinstitut: "Precision Farming" auf dem Vormarsch, 2018. Online verfügbar unter <https://oe.lfi.at/precision-farming-auf-dem-vormarsch+2500+1682111> (abgerufen am 22.01.2020, 18:12)

Luftfahrtgesetz (LFG): BGBl. Nr. 253/1957.

MA 22 – Wiener Umweltschutzabteilung (2019): Leitfaden Fassadenbegrünung. Herausgeber: Magistrat der Stadt Wien, Programm für umweltgerechte Leistungen „ÖkoKauf Wien“.

Manntech, o.J. Online verfügbar unter <https://www.manntech.com/products/> (abgerufen am 05.07.2019, 9:00)

Mohammadi Murtaza, Calautit John Kaiser: Numerical Investigation of the Wind and Thermal Conditions in Sky Gardens in High-Rise Buildings. In: *Energies* 12 (7), S. 1380, 2019.

Mumford Jim, Madarash Michael, Daniels Melissa: Sustainable Living Walls: It's All About Maintenance. In: American Society of landscape architects, 2019. Online verfügbar unter [https://www.asla.org/uploadedFiles/CMS/Meetings\\_and\\_Events/2013\\_Annual\\_Meeting\\_Handouts/FRI-D05\\_SustainableLivingWallsIt%27sAllAboutMaintenance.pdf](https://www.asla.org/uploadedFiles/CMS/Meetings_and_Events/2013_Annual_Meeting_Handouts/FRI-D05_SustainableLivingWallsIt%27sAllAboutMaintenance.pdf) (abgerufen am 11.11.2019)

Naio Technologies, o.J. Online verfügbar unter <https://www.naio-technologies.com/> (abgerufen am 15.06.2019, 8:10)

nr21 DESIGN GmbH: C-BOT. Online verfügbar unter <https://nr21.com/de/c-bot-de/> (abgerufen am 10.6.2019, 10:15)

Online Browsing Platform ISO: ISO 8373:2012, 2012. Online verfügbar unter: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en> (abgerufen am 12.12.2019, 8:45)

ÖVE/ÖNORM EN 50636-2-107:2014: Roboter und Robotikgeräte: Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter. In: ÖVE/Austrian Standards Institute. Online verfügbar unter [https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/529999/OENORM\\_EN\\_ISO\\_13482\\_2014\\_11\\_15](https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/529999/OENORM_EN_ISO_13482_2014_11_15) (abgerufen am 10.12.2019)

ÖNORM L1136: Vertikalbegrünung im Außenraum. In ÖVE/Austrian Standards Institute. Online verfügbar unter [https://committees.austrian-standards.at/national\\_workprogramme/project/605356?locale=de](https://committees.austrian-standards.at/national_workprogramme/project/605356?locale=de) (12.12.2019, 10:30). Geplante Veröffentlichung: 1.12.2020

- Österreichischer Rat für Robotik und Künstliche Intelligenz: Die Zukunft Österreichs mit Robotik und Künstlicher Intelligenz positiv gestalten White Paper des Österreichischen Rats für Robotik und Künstliche Intelligenz. Wien 2018, <https://www.bmk.gv.at/themen/innovation/forschungspolitik/robotikrat.html> (abgerufen am 10.9.2019)
- Perini Katia, Ottelé Marc, Fraaij Alex L.A, Haas E. M., Raiteri Rossana: Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. In: Building and Environment 46 (11), S. 2287–2294, 2011a.
- Perini Katia, Ottelé Marc, Haas E. M.; Raiteri Rossana: Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. In: OJE 01 (01), S. 1–8, 2011b.
- Perini Katia, Ottelé Marc: Designing green façades and living wall systems for sustainable constructions. In: Int. J. DNE 9 (1), S. 31–46, 2014.
- Perini Katia, Rosasco Paolo: Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. In: Building and Environment 70, S. 110–121, 2013.
- Peritsch Manfred: Chancen report Urbane Grünflächen. Baden, 2017.
- Pfoser Nicole, Jenner Nathalie, Henrich Johanna: Gebäude Begrünung Energie – Potenziale und Wechselwirkungen. Abschlussbericht. In: Interdisziplinärer Leitfaden als Planungshilfe zur Nutzung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potenziale sowie zu den Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld. Wien August 2013. Online verfügbar unter <http://www.irbnet.de/daten/rswb/13109006683.pdf> (abgerufen am 11.11.2019)
- Rath J., Kiessl K., Gertis K.A.: Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf den Wärme- und Feuchtehaushalt von Aussenwänden und Schadensrisiko. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 1989. Online verfügbar unter <https://www.irbnet.de/daten/rswb/89009501418.pdf> (abgerufen am 12.11.2019)
- Riley B.: The state of the art of living walls\_ Lessons learned. In: Building and Environment, 2017.
- RobotXperience: Plattform für Roboter und Anwendungen mit Robotern, 2019. Online verfügbar unter <https://robots.nu/de/kategorien> (abgerufen am 12.12.2019, 9:15)
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: NASA Special Publication. Presented at the Third EERTS Symposium, pp. 309–317, 1974.
- Serbot: Gecko Façade Robot, o.J. Online verfügbar unter <https://www.serbot.ch/en/facades-surfaces-cleaning/gekko-facade-robot> (abgerufen am 05.07.2019, 8:45)
- Skyline Robotics, o.J. Online verfügbar unter <https://skylinerobotics.com/> (abgerufen am 06.07.2019, 8:15)
- Small Robot Company, o.J. Online verfügbar unter <https://www.smallrobotcompany.com/> (abgerufen am 15.06.2019, 11:30)

- Statista. Umsatz mit Servicerobotern weltweit in den Jahren 2018 bis 2025 (in Mrd. US Dollar). <https://de-statista-com.wn.idm.oclc.org/statistik/daten/studie/870594/umfrage/umsatz-mit-servicerobotern-weltweit/> (17.12.2019, 14:30)
- Still Christopher, Powell Rebecca, Aubrecht Donald, Kim Youngil, Helliker Brent, Roberts Dar, Richardson Andrew D., Goulden Michael: Thermal imaging in plant and ecosystem ecology: applications and challenges. *Ecosphere*, 10(6), 2768, 2019.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.: Electromagnetic determination of soil water content Measurements in coaxial transmission lines. DOI: 10.1029/WR016i003p00574. (1980)
- Towercraft, o.J. Online verfügbar unter <http://www.towercraft.com.tr/> (abgerufen am 6.7.2019, 10:15)
- Université de Montréal, Fonds de recherche du Québec: Montréal Declaration for Responsible Development of Artificial intelligence. 2018. [https://ai.quebec/wp-content/uploads/sites/2/2018/12/News-release\\_Launch\\_Montreal\\_Declaration\\_AI-04\\_12\\_18.pdf](https://ai.quebec/wp-content/uploads/sites/2/2018/12/News-release_Launch_Montreal_Declaration_AI-04_12_18.pdf) (online abgerufen am 10.12.2019, 10:00)
- van Renterghem Timothy, Hornikx Maarten, Forssen Jens, Botteldooren Dick: The potential of building envelope greening to achieve quietness. In: *Building and Environment* 61, S. 34–44, 2013.
- Verband Unbemannte Luftfahrt: Akzeptanzumfrage 2017 <https://www.verband-unbemannte-luftfahrt.de/umfrage-2017/> (abgerufen am 09.09.2019)
- Wiener Umweltschutzabteilung, ÖkoKauf Wien: Leitfaden Fassadenbegrünung. In: Arbeitsgruppe 25, Grün- und Freiräume. Wien 2019.

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a horizontal top edge, with a diagonal line connecting the top-left corner to the bottom-right corner.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)