



Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
an der Universität für Bodenkultur Wien

Begrünung von Spritzbetonwänden am Standort Steinach am Brenner, Tirol

Betreuer:

Em. Univ. Prof. Dr. Florin Florineth

Beraterteam:

O. Univ. Prof. DDR. DI Konrad Bergmeister M.Sc., Ph.D.

Ao. Univ. Prof. Dr. Silvia Kikuta

Univ. Prof. Mag. Dr. Stefan Mayr

Priv. Doz. DI Dr. Hans Peter Rauch

Univ. Prof. DI Dr. Rosemarie Stangl

Eingereicht von

DI Alexandra Medl

Wien, Dezember 2017

Danksagung

Für die Ermöglichung dieser Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei o. Univ. Prof. Konrad Bergmeister bedanken, welcher in seiner Funktion als Vorstand der Brenner Basistunnel Gesellschaft (BBT-SE) die Voraussetzung für die Durchführung dieses Projektes geschaffen hat.

Mein ganz besonderer Dank gilt an dieser Stelle auch meinem Dissertationsbetreuer em. Univ. Prof. Florin Florineth für seine fachliche Unterstützung auf dem Weg zu meiner Dissertation, insbesondere auch für die Möglichkeit, meine eigenen Ideen umzusetzen und selbstständig zu forschen.

Bedanken möchte ich mich auch bei o. Univ. Prof. Dr. Dr. DI Konrad Bergmeister und Prof. Dr. Eva Hacker für ihre konstruktiven Anregungen und die gutachterliche Tätigkeit.

Ich danke auch Univ. Prof. Mag. Dr. Stefan Mayr, der durch seine konstruktive Kritik in fachlichen Fragen, anregende Diskussionen und die Bereitstellung der Geräte des Instituts für Botanik der Universität Innsbruck maßgeblich zur erfolgreichen Umsetzung dieser Dissertation beigetragen hat. Mein Dank gilt ebenso ao. Univ. Prof. Dr. Silvia Kikuta, die mich mit pflanzenphysiologischem Fachwissen versorgte und mir auch bei den Arbeiten im Freiland stets unterstützend zur Seite stand.

Ein weiteres großes Dankeschön gebührt meinen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau für die immerwährend freundschaftliche Zusammenarbeit. Hervorheben möchte ich die Institutsleiterin Univ. Prof. Dr. DI Rosemarie Stangl sowie meine lieben Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe Ingenieurbiologie, allen voran Gruppenleiter Priv. Doz. Dr. DI Hans Peter Rauch, für die stetige Unterstützung, die durchwegs guten Ratschläge und die unzähligen Gespräche, welche die Form dieser Arbeit wesentlich geprägt haben. Nicht zu vergessen sind dabei auch die Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe Vegetationstechnik, speziell Priv. Doz. Dr. DI Uli Pitha und DI Bernhard Scharf, die für meine Anliegen stets ein offenes Ohr hatten.

Weiters möchte ich mich bei den Technikern Hans Rutzenholzer und Fritz Zott bedanken, ohne die ein derartig reibungsloser Ablauf der Installation der Messinstrumente an den Versuchsflächen nicht möglich gewesen wäre.

Ganz spezieller Dank gilt meinen Eltern Gabriele und Michael Medl, die mir das Studium ermöglicht haben und mich stets bestärken, wenn Zweifel aufkommen.

Ein herzliches Dankeschön auch an meinen Freund Gerfrid Weissteiner, der mir während der Anfertigung der Dissertation immerzu liebevoll zur Seite stand.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen des von der Brenner Basistunnel Gesellschaft (BBT SE) finanzierten Projekts ‚BBT Green Wall‘ und wurde kumulativ verfasst. Sie basiert auf fünf Publikationen zum Thema *„Begrünung von Spritzbetonwänden am Standort Steinach am Brenner, Tirol“*. Publikation [5] ist die einzige zum derzeitigen Stand noch nicht veröffentlichte Publikation. Sie wurde im Oktober 2017 beim Journal *„Ecological Engineering“* eingereicht und befindet sich gegenwärtig im Gutachtungsprozess.

Die Dissertation gliedert sich in zwei Teile. Die Rahmenschicht gibt einen Überblick über den momentanen Stand der Technik im Forschungsfeld der Begrünung von Extremstandorten mit Fokus auf stark geneigte bis vertikale Flächen und fasst die Hauptergebnisse der Publikationen zusammen. Im anschließenden Kapitel werden für Wissenschaft und Praxis des Landschaftsbaus relevante Schlussfolgerungen gezogen. Die im Zuge der Dissertation erstellten Publikationen sind im zweiten Teil der Arbeit chronologisch nach Datum der Veröffentlichung bzw. Einreichung dargestellt und von [1] bis [5] nummeriert.

Zusammenfassung

Die Durchführung von Großinfrastrukturprojekten führt zu einer Zerschneidung von Lebensräumen und einer starken Beeinträchtigung der Landschaftsästhetik. Ökologische Ausgleichsmaßnahmen haben das Ziel, zerstörte, verletzte oder beschädigte Natur- und Landschaftssysteme wiederherzustellen und die landschaftliche Eingliederung zu unterstützen. Als ökologisch orientierte, nachhaltige Lösungen können ingenieurbiologische Maßnahmen einen Ersatz oder eine Ergänzung technischer Bauwerke darstellen. Besonders interessant ist dies im Hinblick auf Steilböschungen, welche im Zuge von Baumaßnahmen aus konstruktiven Gründen häufig notwendig werden, das Landschaftsbild jedoch erheblich beeinträchtigen. Die besondere Intensität der an diesen Bauwerken vorherrschenden Standortfaktoren macht sie zu Extremstandorten, die im Hinblick auf eventuelle Begrünungsmaßnahmen eine besondere Herausforderung hinsichtlich Planung, Instandhaltung und Pflege darstellen.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Evaluierung einer ‚Green Wall‘ – einer mittels Vertikalsystem begrünter Spritzbetonwand – hinsichtlich vegetationstechnischer und mikroklimatischer Parameter. Durch die Etablierung einer nachhaltigen Vegetationsdecke auf dem Begrünungssystem soll eine ökologische Aufwertung und Wiedereingliederung der Stützkonstruktion in das Landschaftsbild erfolgen. Die Schwierigkeit bei der Begrünung dieses Extremstandorts stellen dabei die extreme Neigung von fast 90° und der fehlende Anschluss an den natürlichen Boden dar.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Begrünung des Extremstandorts ‚Spritzbetonwand‘ durch Einsatz eines 3D-Stahlgittersystems als Trägersystem für das Bodensubstrat gut realisierbar ist. Im Hinblick auf eine optimale Vegetationsentwicklung ist die richtige Auswahl der Materialkomponenten von essentieller Bedeutung. In diesem Zusammenhang spielt der Einsatz eines hochqualitativen Bodensubstrats und die Verwendung netzartiger, zusätzlich stabilisierend wirkender Geotextilien zum Schutz des Saatguts eine zentrale Rolle. Werden die Anforderungen erfüllt, sind die Voraussetzungen für die Schaffung einer geschlossenen Vegetationsdecke gegeben und die Wiedereinbindung der Spritzbetonwand in die umliegende Landschaft gewährleistet. An der Spritzbetonwand selbst führt das Begrünungssystem zu positiven Auswirkungen auf das Mikroklima (Erhöhung der Luftfeuchtigkeit um 4,5%, Verringerung der Albedo (= Reflexionsstrahlung) von 29% auf 8%) und damit in weiterer Folge zu einer starken Reduktion der Temperaturschwankungen auf der Betonoberfläche (max. tägliche Schwankungsbreite auf Spritzbetonwand: 17,9°C, hinter dem Begrünungssystem: 2,9°C). Eine wesentliche Voraussetzung für den nachhaltigen Erhalt der Vegetation ist ein funktionierendes Bewässerungssystem, insbesondere während länger andauernder Trockenperioden.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass ‚Green Walls‘ durch erfolgreiche Einbettung von Spritzbetonwänden in die umgebende Landschaft als wertvolles Instrument zur Erhaltung und Wiederherstellung der Landschaftsästhetik angesehen werden können.

Schlüsselwörter:

Extremstandort; Begrünungssystem; Landschaftsästhetik; Vegetationsdecke; Mikroklima

Abstract

The increasing realization of large-scale infrastructure projects results in fragmentation of habitats and visual impairment of landscape. Damaged nature and landscape systems should be reconstructed by implementation of compensatory measures aiming at preservation and restoration of landscape aesthetics. Bioengineering techniques characterise ecologically oriented and sustainable alternatives or complements to technical structures, particularly with regard to steep slopes resulting from major road infrastructure construction and representing disagreeable disturbances in landscape aspects. But, due to extreme environmental conditions, the sustainable greening of steep slopes and thus re-integration in the surrounding landscape poses a particular challenge for bioengineering methods.

The objective of this thesis was to evaluate the performance of an innovative bioengineering method – a vertical 3D steel grid system used as carrier system for soil substrate to establish a vegetation cover – for greening shotcrete walls by the creation of a 'Green Wall' with respect to vegetation technological and microclimatic parameters. The sustainable establishment of a vegetation cover on the used greening system aims at the ecological upgrading and the embedding of the shotcrete wall in the surrounding landscape. The greening of shotcrete walls represents an enormous challenge due to the high inclination of almost 90° and the missing connection to natural ground.

The analyses show that 'Green Walls' are well suited to re-integrate shotcrete walls into the landscape by establishing a green vegetation cover. With regard to successful vegetation development, the choice of appropriate system materials is crucial. Thus, particular importance should be ascribed to the use of high-quality soil substrate. Due to better performance concerning vegetation cover, the use of net-like geotextiles is recommended in order to fulfil initial stabilization functions. Positive impacts on microclimate due to the used vertical greening system (4.5% increase of air humidity, reduction of albedo (= reflectance) from 29% to 8%) and thus reductions of temperature fluctuations on the shotcrete (max. daily temperature fluctuations on shotcrete: 17.9°C, behind der greening system: 2.9°C) were clearly detectable. It should be stressed that a functioning irrigation system is a prerequisite for sustainable preservation of vegetation, particularly during drought periods.

In conclusion, the 'Green wall' can be considered as a noteworthy tool to improve and maintain landscape aesthetics by covering shotcrete walls.

Key words:

Extreme site; Greening system; Landscape aesthetics; Vegetation cover; Microclimate

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	11
2. Forschungsfragen.....	14
3. Stand der Technik zu Begrünungsmaßnahmen an Extremstandorten.....	15
3.1. Extremstandort ‚Fassade‘ im Stadtgebiet	15
3.1.1. Typen vertikaler Begrünungssysteme im Stadtgebiet.....	15
3.1.2. Wirkung vertikaler Begrünungsmaßnahmen im Stadtgebiet	16
3.2. Extremstandort ‚Steilböschung‘ in ländlichen Regionen	17
3.2.1. Begrünung von Steilböschungen auf gewachsenem Boden	17
3.2.2. Begrünung von Steilböschungen ohne gewachsenen Boden	18
4. Im Zuge der Dissertation verfasste Publikationen.....	20
4.1. Kurzfassungen der Publikationen	20
4.2. Thematischer Zusammenhang der Publikationen.....	25
5. Analyse und Synthese der Ergebnisse	27
6. Schlussfolgerungen und Ausblick	38
6.1. Mehrwert der Ergebnisse für den Landschaftsbau.....	39
7. Literaturverzeichnis der Rahmenschrift.....	44
8. Publikationen.....	52
8.1. Publikation [1].....	53
8.2. Publikation [2].....	59
8.3. Publikation [3].....	69
8.4. Publikation [4].....	81
8.5. Publikation [5].....	97
9. Lebenslauf	110

1. Einleitung

Ein stabiler ökologischer Zustand der Erde bildet die wesentliche Grundlage einer lebensfreundlichen Existenz von Mensch, Tier und Pflanze auf diesem Planeten. Dass wir uns diesbezüglich mittlerweile in einem kritischen Bereich bewegen, zeigt ‚Planetary boundaries‘, ein im Jahr 2009 veröffentlichtes Konzept über die ökologischen Belastungsgrenzen der Erde. Darin wird eindrucksvoll dargestellt, wie sich die stark ressourcenverbrauchende Lebensweise der Menschen seit Beginn der Industriellen Revolution auf den bisher stabilen ökologischen Zustand der Erde ausgewirkt hat und mit welcher weitreichenden, teils irreversiblen Umweltveränderungen ein fortwährend unverändertes Handeln verbunden ist (Rockström et al., 2009). Ein aktuelles Beispiel für die nicht-nachhaltige Nutzung von natürlichen Ressourcen stellt die zunehmende Urbanisierung von Naturräumen dar. Der damit zusammenhängende Flächen- bzw. Bodenverbrauch führt zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit der Ökosysteme und ihrer Leistungen (Umweltbundesamt, 2016). Laut Umweltbundesamt (Stand: 12. Juni 2017) wurden in Österreich in der Periode 2013-2015 durchschnittlich 20 Hektar Boden pro Tag verbaut. Die aktuellen Werte für die Jahre 2014-2016 zeigen mit einem durchschnittlichen Bodenverbrauch von 14,7 Hektar zwar einen Rückgang von 9 Prozent, sind vom Zielwert der österreichischen Nachhaltigkeitsstrategie von maximal 2,5 Hektar pro Tag allerdings immer noch weit entfernt (Umweltbundesamt, 2017). Ein derartiger Ressourcenverbrauch durch den Ausbau von Infrastruktursystemen und die damit verbundene Fragmentierung der Landschaft führen zu einer zunehmenden Isolierung von Lebensräumen. Dies resultiert letztendlich auch in einem fehlenden genetischen Austausch zwischen den Populationen, was die Gefahr des lokalen Artenaussterbens erheblich erhöht (Schindler et al., 2016).

Aus diesem Grund wird in Österreich im Zuge der Durchführung von Großinfrastrukturprojekten die Leistung von Ausgleichsmaßnahmen für Eingriffe in geschützte Landschaften vorgeschrieben. Ziele sind Wiederherstellung oder Ersatz von zerstörten, verletzten oder beschädigten Natur- und Landschaftssystemen, möglichst in jenen Zustand, in welchem sie sich vor dem Eingriff befunden haben (Bergthaler & Sladek, 2014). Landschaftsplanerische Maßnahmen zur besseren ökologischen Vernetzung können in diesem Zusammenhang durch das Anlegen ökologischer Korridore und Trittsteine schon während des Bauprozesses die landschaftliche Einpassung unterstützen. In Österreich gibt die am 1. Oktober 2015 erschienene RVS 04.01.12 Umweltmaßnahmen (2015) durch eine Standardisierung der Planungsprozesse von Umweltmaßnahmen einen Rahmen für Straßen- und Bahnplanungen vor. Dadurch sollen erhebliche ökologische Beeinträchtigungen von Naturhaushalt und Landschaft bereits frühzeitig vermieden werden.

Eine Möglichkeit zur Herstellung ökologischer Ausgleichsmaßnahmen stellt die Anwendung ingenieurbioologischer Bauweisen dar. Als ökologisch orientierte, nachhaltige Lösungen dienen diese der Erhaltung und Schaffung natürlicher Lebensgrundlagen, einschließlich der Leistungsfähigkeit von Naturhaushalt und Naturgütern. Als Ersatz oder Ergänzung von technischen Bauwerken übernehmen ingenieurbioologische Bauweisen eine wertvolle Habitatfunktion für Flora und Fauna und tragen durch die Erhaltung von Vielfalt, Eigenart

und Schönheit von Natur und Landschaft wesentlich zur Erhöhung der Biodiversität bei (Begemann & Schiechtl, 1994; EFIB, 2015). Der technische Fortschritt der vergangenen Jahre ermöglicht die Anwendung ingenieurbioologischer Systeme bereits unter besonders extremen Bedingungen. Durch die Entwicklung innovativer technischer Systeme gibt es immer mehr Möglichkeiten, die naturräumlichen Gegebenheiten (Raumknappheit, geologische Bedingungen etc.) zu berücksichtigen und Maßnahmen vermehrt auch an steilen Standorten umzusetzen (Obriejetan, 2013). In Hinblick auf den stetig fortschreitenden Ausbau der Infrastruktursysteme – vor allem im alpinen Raum – ist dies insbesondere im Zusammenhang mit Steilböschungen interessant, welche im Zuge der Bauarbeiten immer häufiger umgesetzt werden. Dass derartige Böschungseingriffe zu einer erheblichen Beeinträchtigung des Landschaftsbildes führen, spielt bei den unbedingt notwendigen technischen Maßnahmen zum Zweck der Stabilitätssicherung an Verkehrsinfrastrukturen oftmals eine untergeordnete Rolle. Zunehmend ist jedoch auch die Erhaltung der Landschaftsästhetik und der ökologischen Funktionen von Bedeutung, weshalb an diesen Infrastrukturelementen Begrünungsmaßnahmen erfolgen sollen. Aufgrund der charakteristischen und besonderen Intensität der vorherrschenden Standortfaktoren bedarf es diesbezüglich einer sorgfältigen Planung für diese Extremstandorte. Als entscheidende Kriterien für das Wachstum und Überleben von Pflanzen sind dabei die Wasser- bzw. Nährstoffverfügbarkeit sowie Temperatur- und Strahlungseinflüsse hervorzuheben (Obriejetan, 2015). Extreme, stark schwankende Temperaturen und die oftmals nicht vorhandene Anbindung an den natürlich gewachsenen Boden in Kombination mit einer durch die starken Böschungsneigungen verbundenen unzureichenden Wasserversorgung machen Trockenstress zum am stärksten limitierenden Faktor für das Überleben von Pflanzen an extremen Standorten (Beikircher et al., 2010).

Die vorliegende Dissertation konzentriert sich auf die Begrünung des Extremstandorts ‚Spritzbetonwand‘ mit speziellem Fokus auf die Einbettung derartiger Infrastrukturelemente in den umliegenden Natur- und Landschaftsraum. Neben den angesprochenen Spritzbetonbauten schließt dies auch Böschungen und Steilhänge ohne zusätzlichen Spritzbetonauftrag sowie Felsböschungen mit ein. Die nachhaltige Etablierung einer geschlossenen Vegetationsdecke auf derlei störend wirkenden, vegetationsfreien Flächen stellt neben der damit verbundenen ästhetischen Aufwertung des Landschaftsbildes eine wichtige Maßnahme zum ökologischen Ausgleich dar und kann daher als geeignetes Mittel zur Erfüllung der im Zuge von Großprojekten vorgeschriebenen Auflagen angesehen werden. Vor allem an Felsböschungen können Begrünungsmaßnahmen außerdem zur Verminderung von Steinschlag beitragen.

Die Herausforderung hinsichtlich einer erfolgreichen Begrünung der oben genannten vegetations- und oft auch substratfreien Extremstandorte stellt ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren dar. Beim im Zuge der vorliegenden Dissertation zur Begrünung ausgewählten Extremstandort ‚Spritzbetonwand‘ handelt es sich konkret um eine Steilböschung mit einer Neigung von fast 90° ohne Anbindung an den natürlich gewachsenen Boden, welcher sich zusätzlich am Standort ‚Straße‘ befindet. Dieser ist neben den bereits erwähnten Faktoren Trockenheit, Hitze und geringer Wasserverfügbarkeit durch einen hohen Versiegelungsgrad der Umgebung sowie den Eintrag von Straßenabwässern, Streusalzen etc. gekennzeichnet (Pitha, 2014). Die Umsetzung einer erfolgreichen

Begrünungsmaßnahme an Steil- und Felsböschungen ohne Bodenkontakt erfordert daher eine sorgfältige Auswahl des Begrünungssystems sowie eine gewissenhafte Abstimmung der Systemkomponenten. Zu diesem Zweck wurde für die im Rahmen der Dissertation erforschte Begrünung der Spritzbetonwände ein speziell für derartige Standorte entwickeltes Vertikalbegrünungssystem ausgewählt und unter Berücksichtigung der Zusammenwirkung verschiedener Systemkomponenten (technische Komponente, Bodenkomponente, Vegetationskomponente) hinsichtlich seiner Eignung zur Etablierung einer nachhaltig geschlossenen Vegetationsdecke untersucht und analysiert.

2. Forschungsfragen

Nachfolgende Forschungsfragen (F1 – F3) wurden in den Publikationen [1] bis [5] behandelt.

- F1 Eignet sich das ausgewählte Vertikalsystem zur Begrünung von Spritzbetonwänden? In welcher Kombination führen verschiedene Systemkomponenten zu einer nachhaltig zufriedenstellenden Vegetationsentwicklung? [3, 1, 4]
- F2 Welche mikroklimatischen Unterschiede können zwischen einer ‚Green Wall‘ und einer ‚konventionellen‘ Spritzbetonwand festgestellt werden? Welche Auswirkungen auf das Bauwerk sind damit verbunden? [2, 1, 4]
- F3 Besteht die Notwendigkeit eines integrierten Bewässerungssystems? Welche Folgen hat ein potenzieller Ausfall des Bewässerungssystems auf die Vegetation des Begrünungssystems? [5, 4]

3. Stand der Technik zu Begrünungsmaßnahmen an Extremstandorten

Als Grundlage zur Beantwortung der Forschungsfragen werden nachfolgend die Ausgangslage und die wichtigsten bisher erlangten Kenntnisse im Hinblick auf Begrünungsmaßnahmen an Extremstandorten mit speziellem Fokus auf stark geneigte bis vertikale Flächen erläutert.

In diesem Zusammenhang ist insbesondere der Einsatz von Vertikalbegrünungssystemen hervorzuheben, welcher in jüngster Vergangenheit in Forschung und Praxis verstärkt in den Fokus rückte. Eingesetzt werden derartige Systeme bisher vorwiegend im Stadtgebiet zur Begrünung von Häuserfassaden, eine Anwendung in ländlichen Regionen an Baukonstruktionen findet nur selten statt und kann daher als innovativer Ansatz in der Begrünungstechnik angesehen werden.

3.1. Extremstandort ‚Fassade‘ im Stadtgebiet

In Anbetracht des Klimawandels und den damit einhergehenden steigenden Temperaturen ist das Bewusstsein für mehr ‚Grün‘ im Stadtbereich in den letzten Jahren stetig gewachsen. Das Prinzip des nachhaltigen Bauens als Maßnahme zur Optimierung von Energie- und Ressourcenverbrauch sowie eine gleichzeitige Minimierung von Umweltbelastungen gewinnt fortwährend an Bedeutung (Zuo & Zhao, 2014). Diese Strategie inkludiert jedoch nicht nur den Einsatz nachhaltiger Baumaterialien, sondern auch die Berücksichtigung ökologischer Faktoren, wie beispielsweise Abschattung durch Bäume, Dämmwirkung durch Gründächer und Fassadenbegrünungen sowie Kühlwirkung durch Evapotranspiration (Ottel , 2011). In diesem Zusammenhang beschäftigt sich die Forschung in letzter Zeit speziell mit dem Thema Gebudebegrunung und der Verwendung von Pflanzen zur Herstellung grüner Gebäudehüllen. Fassadenbegrünungen durch den Einsatz von vertikalen Begrunungssystemen spielen dabei eine zentrale Rolle, stellen durch die extremen Standortfaktoren allerdings auch enorme Herausforderungen dar. So handelt es sich beim Standort ‚Fassade‘ um einen Extremstandort, an welchem die Vegetation außergewöhnliche Bedingungen zu bewältigen hat. Durch ihre vertikale Ausrichtung und den fehlenden Bodenanschluss ist eine ausreichende Bewässerung der Fassadenbegrunungssysteme durch Niederschlagswasser nicht möglich, hohe Windgeschwindigkeiten speziell in oberen Geschossen führen zu verstärkter Austrocknung. Die zusätzliche, vor allem an südexponierten Fassaden extreme Einstrahlung sowie die damit verbundenen hohen Temperaturen erfordern eine sorgfältige Auswahl der für die Begrünungsmaßnahmen zu verwendenden Pflanzen und eine an die Gegebenheiten angepasste Bewasserungsintensitat (Hancvencl, 2013; Pitha et al., 2011).

3.1.1. Typen vertikaler Begrünungssysteme im Stadtgebiet

Vertikale Fassadenbegrunungssysteme werden abhängig von der Positionierung der Vegetation in zwei Haupttypen eingeteilt: die bodengebundene Begrünung und die wandgebundene Begrünung (Abbildung 1). Charakteristisch für bodengebundene Begrünungssysteme ist der Einsatz von Kletterpflanzen mit direktem Kontakt zum gewachsenen Erdreich, während ein Bodenanschluss bei wandgebundenen Begrünungsmaßnahmen aufgrund der direkten Pflanzung an der Fassade nicht benötigt

wird (Pitha et al., 2011; Florineth, 2012). Fassadenbegrünungsmaßnahmen mit Kletterpflanzen erfolgen entweder durch direkten Bewuchs oder durch das Bewachsen von künstlichen Kletterhilfen, welche sich in unmittelbarer Nähe zur Gebäudehülle befinden und vor der Fassade eine ‚zweite Haut‘ bilden (Manso & Castro-Gomes, 2015). Ein direkter Bewuchs der Fassade ist nur durch den Einsatz von Selbstklimmern möglich, welche die Fähigkeit haben sich mittels Haftorganen alleine an Oberflächen festhalten zu können (Isnard & Silk, 2009; Florineth, 2012). Kletterhilfen aus Holz, Edelstahlseilen, Gitter- oder Netzkonstruktionen unterstützen das Wachstum jener Kletterpflanzen, welche aufgrund fehlender Haftorgane (z.B. Schlingpflanzen) andernfalls für den Bewuchs vertikaler Flächen nicht geeignet wären (Manso & Castro-Gomes, 2015). Wandgebundene Begrünungen werden abhängig von der Ausführung des Vegetationsträgers in vollflächig und teilflächig eingeteilt, wobei bei Letzterem wiederum zwischen modular und linear unterschieden wird (Pitha et al., 2011).

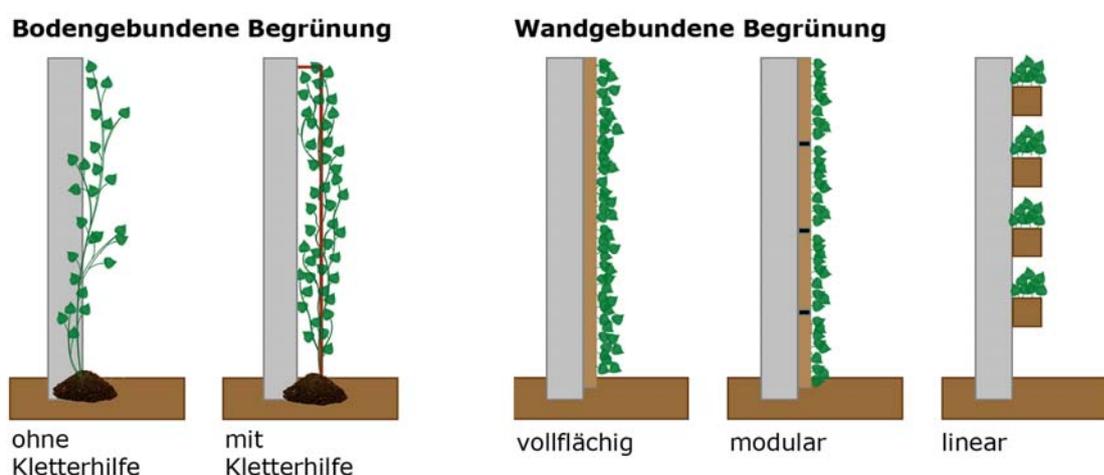


Abbildung 1: Haupttypen vertikaler Begrünungssysteme zur Fassadenbegrünung (basierend auf den Darstellungen von Safikhani et al. (2014) und Hunter et al. (2014), modifiziert und erweitert). Bodengebundene Begrünung mit und ohne Kletterhilfe sowie wandgebundene Begrünung mit vollflächigem und teilflächigem (modular und linear) Vegetationsträger.

3.1.2. Wirkung vertikaler Begrünungsmaßnahmen im Stadtgebiet

Der Verlust von Grünflächen in Kombination mit einem immer größer werdenden Anteil an versiegelten Flächen führt zu einem deutlichen Anstieg der urbanen Temperaturen im Vergleich zum Umland. Bedingt wird diese ‚urbane Wärmeinsel‘ vor allem durch die höhere Wärmestrahlungsabsorption und –speicherung städtischer Oberflächen im Vergleich zum weniger verdichteten Umland (Thiele, 2015; Wong et al., 2010; Stec et al., 2005). Zudem steht das von den Oberflächen unmittelbar ins Kanalsystem abgeleitete Niederschlagswasser zur Evaporation nicht mehr zur Verfügung, weshalb der damit verbundene Kühleffekt verloren geht (Mitterboeck & Korjenic, 2017). Als Gegenmaßnahme zum Wärmeineffekt haben vertikale Begrünungssysteme an Häuserfassaden daher zunehmend an Bedeutung gewonnen, leisten sie doch durch ihre Beschattungs- und Verdunstungsleistung einen maßgeblichen Beitrag zur Reduktion von Oberflächentemperaturen an Häuserfassaden (Victorero et al., 2015). Gleichzeitig wird der durch den Wärmeineffekt vor allem tagsüber auf den Menschen wirkende Hitzestress vermindert, wodurch eine wesentliche Verbesserung von Gesundheit und menschlichem Wohlbefinden erreicht werden kann (Scharf et al., 2013). Durch Vegetation wird die Reflexion von

Sonneneinstrahlung an versiegelten Oberflächen reduziert und das von Blendeffekten ausgehende Gefährdungspotenzial im Straßenverkehr erheblich verringert (Coder, 1996). Es gilt zudem als wissenschaftlich erwiesen, dass der Anblick von und die Nähe zu Grünflächen eine positive psychologische Wirkung auf den Menschen haben und eine bessere Erholung von Stresssituationen ermöglicht (Gidlöf-Gunnarsson & Öhrström, 2007; Ulrich et al., 1991).

In Anbetracht mangelnder Grünflächen in Stadtgebieten bilden vertikale Begrünungssysteme in Form von Fassadenbegrünungen auf dicht besiedelten Flächen platzsparende, ressourcenschonende Maßnahmen zum ökologischen Ausgleich in urbanen Gebieten. Durch die Fähigkeit der Pflanzen zur Schadstofffilterung, Kohlenstoffbindung und Sauerstoffproduktion tragen sie wesentlich zur Luftverbesserung in dicht bebauter Umgebung bei (Ottel  et al., 2010; Sternberg et al., 2010; Perini et al., 2017; Charoenkit & Yiemwattana, 2017). Jede gewonnene Grünfläche bietet zusätzliche Rückzugsmöglichkeiten für Kleinsäuger, Vögel und Insekten und leistet dadurch einen wertvollen Beitrag zur Erhaltung der städtischen Biodiversität (Wolter, 2015; Madre et al., 2015).

Neben den bereits erläuterten sozialen und ökologischen Vorteilen wird vertikalen Begr nungssystemen im Stadtbereich auch eine Kostenersparnis durch die Verbesserung der Geb udethermik zugesprochen. Der durch die Anwendung von Fassadenbegr nungssystemen entstehende Dämm- bzw. Kühleffekt bewirkt eine verringerte Notwendigkeit des Einsatzes von Heizungssystemen und Klimaanlage, was zur Aufwertung der Energiebilanz eines Gebäudes beiträgt (Cheng et al., 2010; Wong et al., 2010; Coma et al., 2017).

3.2. Extremstandort ‚Steilböschung‘ in ländlichen Regionen

Begrünungsmaßnahmen an Steilböschungen in ländlichen Regionen dienen in erster Linie der Erhaltung der Landschaftsästhetik sowie als Gegenmaßnahme zur Landschaftsfragmentierung. Abhängig von Ausführung und Beschaffenheit der Böschung gewährleistet das Etablieren von Vegetation an Oberflächen von Erdböschungen einen wesentlichen Beitrag zur Stabilit tssicherung und zum Oberflächenschutz. Sicherungsmaßnahmen an Verkehrswegen werden häufig in Form von Spritzbetonwänden umgesetzt, auch Felsböschungen sind keine Seltenheit. In Anbetracht der Tatsache, dass bereits herkömmliche Erdböschungen mit starkem Neigungswinkel für Pflanzen schwierige Standort- bzw. Umweltbedingungen darstellen (Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit, Temperatur, Strahlung), ist die Begrünung von Extremstandorten, wie den bereits erwähnten Spritzbetonwänden und Felsböschungen, welche einen Neigungswinkel von bis zu 90  aufweisen können und keinen Anschluss zu gewachsenem Boden ermöglichen, mit besonderen Schwierigkeiten verbunden.

3.2.1. Begrünung von Steilböschungen auf gewachsenem Boden

Der Begriff ‚Böschung‘ beschreibt eine durch Bautätigkeit entstandene Neigung zwischen zwei verschieden hohen Ebenen (Begemann & Schiechtl, 1986). Tabelle 1 zeigt die Klassifizierung verschiedener B schungsklassen nach Neigungsgrad.

Tabelle 1: Klassifizierung von Böschungsneigungen an Infrastruktursystemen nach Krauter (2001)

Böschungsneigung [°]	Neigungsklasse
3 – 5	extrem flache Böschungen
5 – 15	Flachböschungen
15 – 40	mäßig steile Böschungen
40 – 90	Steilböschungen
> 90	übersteile (überhängende) Böschungen

Mit zunehmender Neigung steigt an Erdböschungen jedoch auch die Gefahr von Bodenerosion kontinuierlich an, welche aus einem hangabwärts gerichteten Transport von Bodenpartikeln und Bodenaggregaten resultiert und ohne den Einsatz von geeigneten Gegenmaßnahmen zu schweren Erosionsschäden (Hangrutschungen etc.) führen kann (Obriejetan, 2015; Bloemer, 2014). Eine Erhöhung der Oberflächenstabilität an betroffenen Standorten kann durch die Etablierung einer Vegetationsdecke mit einem Deckungsgrad von mindestens 70 – 80% erreicht werden. Um nachhaltig stabile Begrünungsergebnisse zu erreichen, ist dabei die Verwendung von Begrünungsmischungen mit standortgerechtem Saatgut zu bevorzugen (Graiss et al., 2008).

An besonders steilen Böschungen wird der Einsatz von Erosionsschutzmaßnahmen aus kombinierten Bauweisen als sinnvoll erachtet. So gelten aus einer technischen (Geotextilien) und einer biologischen (Vegetation) Komponente zusammengesetzte Erosionsschutzsysteme als adäquate Schutzmaßnahme zur Minimierung oberflächennaher Erosionsprozesse an Steilböschungen auf gewachsenem Boden (Obriejetan, 2015). Die Hydrosaat stellt durch eine hohe Flexibilität im Hinblick auf die Zusammensetzung der Mischungsbestandteile (Wasser als Trägermedium für Saatgut, Dünger, Bodenverbesserungsstoffe und Kleber) die am besten geeignete Begrünungstechnik für extreme und steilste Flächen dar (Krautzer, 1999).

3.2.2. Begrünung von Steilböschungen ohne gewachsenen Boden

Steilböschungen, welche eine Verbindung zwischen Vegetation und Erdreich nicht ermöglichen (z.B. Felsböschungen, Spritzbetonwände oder Baukonstruktionen wie Tunnelportale) und zusätzlich einen hohen Neigungsgrad aufweisen, sind hinsichtlich eventuell durchzuführender Begrünungsmaßnahmen besonders problematisch. Trotzdem konnten in den letzten Jahren bereits einige Lösungsvorschläge zur Begrünung derartiger Standorte entwickelt werden.

Eine kostenextensive Möglichkeit zur Begrünung von Steilböschungen ohne gewachsenen Boden stellt eine bodengebundene Begrünung mittels Kletterpflanzen dar. Diese Art der Begrünung ist mit einem geringen Kosten- und Pflegeaufwand verbunden, eine großflächige Vegetationsdecke ist allerdings erst nach einem Zeitraum zwischen drei und fünf Jahren zu erwarten (Manso & Castro-Gomes, 2015). Eine Art böschungsggebundene Begrünung an Felsböschungen mit Neigungswinkeln bis zu 80° ist durch die Herstellung künstlicher Bohrlöcher zu erreichen (Wang et al., 2009). Diese werden mit Bodensubstrat befüllt und mit Kletterpflanzen bepflanzt, wodurch bereits innerhalb einer kurzen Zeitperiode kleine Vegetationsinseln entstehen, welche wesentliche Verbesserungen von

Mikroökosystem und Mikroklima bewirken. Zur Bewässerung der Bohrlöcher ist eine künstliche Bewässerungsanlage notwendig. Eine weitere Möglichkeit zur Begrünung kahler Felsböschungen ist die Verwendung einer modifizierten Version der Hydrosaat (Gao et al., 2007). Zusätzlich zu den herkömmlichen Komponenten ist dabei das Aufspritzen von Bodensubstrat vorgesehen. Eine Anwendung dieser Technik ist an Neigungswinkeln bis zu 50° möglich.

In der vorliegenden Dissertation wird die Anwendung eines 3D-Stahlgittersystems an Spritzbetonwänden untersucht. Ein vorhergehendes Forschungsprojekt (TB-Protect, Obriejetan, 2013) beschäftigte sich bereits mit der Verwendung dieses Begrünungssystems zur Revitalisierung eines hart verbauten Kanals. Die zu begrünenden Asphaltschultern wiesen dabei eine Neigung von 30° auf.

4. Im Zuge der Dissertation verfasste Publikationen

Die nachfolgenden fünf Publikationen bilden die Bausteine der vorliegenden Dissertation. In diesem Kapitel werden Zielsetzung, Methode, Ergebnisse und Schlussfolgerung der einzelnen Publikationen kurz zusammengefasst und ihr thematischer Zusammenhang erläutert. Publikation [1] wurde bereits vor offiziellem Projektstart verfasst und diente der Vorstellung des Forschungskonzepts an ein breites Fachpublikum. Zu diesem Zeitpunkt waren die Versuchsstrecken noch nicht gebaut, Messungen konnten noch nicht durchgeführt werden. Nachfolgend findet sich aus diesem Grund nur eine kurze Zusammenfassung des Gesamtinhalts der Publikation.

SCI-Beiträge sind mit einem * markiert.

4.1. Kurzfassungen der Publikationen

Publikation [1]: Medl, A. (2015). Begrünung von senkrechten Spritzbetonmauern im Rahmen des Forschungsprojekts ‚Green Wall‘ in Tirol. Fachzeitschrift vom Verein für Ingenieurbioogie Nr. 1/2015, 67 – 70.

Zusammenfassung: Ziel dieser Publikation ist es, das Konzept des Forschungsprojekts ‚BBT Green Wall‘ mit Fokus auf der Begrünung vom ‚Extremstandort Spritzbetonwand‘ durch Anwendung eines vertikalen Begrünungssystems einem breiten Fachpublikum vorzustellen.

Spritzbetonwände gewährleisten bei möglichst geringem Platzbedarf eine ausreichende Hangstabilität an Verkehrsinfrastrukturen. Eine Kombination dieser technischen Bauwerke mit einer biologischen Komponente in Form einer vertikalen Begrünung ermöglicht bei optimaler Vegetationsentwicklung eine Wiedereingliederung in die das Bauwerk umgebende Landschaft. Vertikales Grün beherbergt zudem ein großes mikroklimatisches Potenzial, weshalb derartige Begrünungsmaßnahmen auch einen Beitrag zur Klimawandelanpassung leisten können. Die Problematik bei der Begrünung von Spritzbetonwänden stellen die extremen lokalen Klimabedingungen dar, welche die Initiierung geeigneter Vegetationsstrukturen und deren nachhaltige Etablierung wesentlich erschweren. Erklärtes Ziel des Forschungsprojekts ‚BBT Green Wall‘ ist neben der Begrünung des Bauwerks durch Einsatz eines 3D-Stahlgittersystems in einem angemessenen Zeitraum eine Analyse der Vegetationsentwicklung auf der zu diesem Zweck zu errichtenden Versuchsstrecke sowie die Quantifizierung mikroklimatischer Parameter durch den Vergleich der grünen mit einer konventionellen Spritzbetonwand.

Publikation [2]*: Medl, A., Mayr, S., Rauch, H.P., Weihs, P., Florineth, F. (2017). Microclimatic conditions of 'Green Walls', a new restoration technique for steep slopes based on a steel grid construction. *Ecological Engineering* 101, 39 – 45.

Ziel: Beurteilung der Leistungsfähigkeit des für die Begrünung einer Spritzbetonwand ausgewählten 3D-Stahlgittersystems hinsichtlich seiner mikroklimatischen Eigenschaften im Vergleich zu einer Spritzbetonwand ohne Begrünung.

Methode: Zur Gewährleistung realistischer Umfeldbedingungen wurde im Jahr 2015 eine Versuchsstrecke an einer ausgewählten Spritzbetonwand am Versuchsstandort Plon in Steinach am Brenner (Tirol, Österreich, 1048 m ü.A., 47° 6' N, 11° 28' O) errichtet. Dafür wurde ein doppellagiges 3D-Stahlgittersystem an einer südöstlich exponierten Spritzbetonwand befestigt, mit Bodensubstrat verfüllt und durch Hydrosaat begrünt. Um einen Vergleich zwischen einer grünen und einer konventionellen Spritzbetonwand zu ermöglichen, wurden jeweils vor dem Begrünungssystem und vor einem sich direkt daneben befindlichen unbegrünten Wandsegment Sensoren zur Messung des Mikroklimas (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, eingehende und reflektierte Solarstrahlung) montiert. Zusätzliche hinter bzw. in Begrünungssystem und in Spritzbetonwand installierte Sensoren lieferten Daten zur Temperatur vom Bodensubstrat im Begrünungssystem und von der Spritzbetonoberfläche der Wand hinter dem Begrünungssystem sowie der Spritzbetonwand ohne Begrünungssystem. Von einer sich direkt über der Versuchsstrecke befindlichen Klimastation wurden meteorologische Standarddaten (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Solarstrahlung, Niederschlag, Wind) aufgenommen. Die gewonnenen Daten wurden neben einer mikroklimatischen Analyse auch für die Kalkulation des Universal Thermal Climate Index (UTCI) verwendet.

Ergebnisse: Ein Vergleich der Daten zu Oberflächentemperatur der Spritzbetonwände ohne und hinter dem 3D-Stahlgitter zeigte eine deutliche Verringerung der Temperaturschwankungen durch eine auftretende Dämmwirkung des Begrünungssystems. Nachdem zwischen den Vegetationsperioden 2015 (ca. 30% Vegetationsdeckung) und 2016 (ca. 100% Vegetationsdeckung) keine wesentlichen Unterschiede festzustellen waren, ist davon auszugehen, dass die isolierende Wirkung weniger auf die Vegetation, als vielmehr bereits durch alleinige Montage des mit Bodensubstrat verfüllten Stahlgittersystems erreicht werden konnte. Eine Auswertung der Daten zu Oberflächentemperatur von Spritzbeton mit und ohne Begrünung sowie der Substrattemperaturen in den beiden Gitterlagen machte deutlich, dass dies eindeutig auf die dämmende Wirkung des Bodensubstrats zurückzuführen war. Festgestellt werden konnte zudem eine deutliche Reduktion der reflektierten Strahlung durch das Begrünungssystem im Vergleich zur Betonoberfläche. Die Kalkulation des UTCI zeigte eine Verminderung von auf den Menschen wirkenden Hitzestress vor der begrünten Spritzbetonwand.

Schlussfolgerung: Die Ergebnisse beweisen, dass durch das Begrünungssystem ein deutlicher Rückgang von Temperaturschwankungen an dem sich darunter befindlichen Bauwerk erreicht werden kann, was positive Auswirkungen auf die Materialeigenschaften hat (geringere Schäden durch Zusammenziehen und Ausdehnen des Materials). Zusätzlich

wird die vom Menschen empfundene Wärme vor dem Begrünungssystem reduziert, weshalb eine Verwendung im Stadtgebiet empfohlen werden kann.

Publikation [3]*: Medl, A., Stangl, R., Kikuta, S.B., Florineth, F. (2017). Vegetation establishment on ‘Green Walls’ : Integrating shotcrete walls from road construction into the landscape. Urban Forestry & Urban Greening 25, 26 – 35.

Ziel: Beurteilung der Leistungsfähigkeit des für die Begrünung einer Spritzbetonwand ausgewählten 3D-Stahlgittersystems und seiner Einzelkomponenten (Bodensubstrate, Geotextilien) im Hinblick auf eine nachhaltige Vegetationsentwicklung.

Methode: Die im Jahr 2015 gebaute Versuchsstrecke (siehe Publikation [2]) wurde zum Zweck des Vergleichs verschiedener Systemkomponenten im Zuge ihrer Errichtung durch Befüllung des 3D-Stahlgittersystems mit drei verschiedenen Bodensubstraten (Kombination der Gesteine Innsbrucker Quarzphyllit, Bündnerschiefer und Zentralgneis jeweils mit Kompost) in drei Versuchsfelder unterteilt. Im Anschluss wurden an der bereits durch Hydrosaat begrüneten Versuchsstrecke pro Versuchsfeld fünf unterschiedliche Geotextilien (Geogitter weitmaschig (9x10mm), Geogitter engmaschig (3x4mm), Kokosnetz, Kokosmatte, Geomatte) angebracht. Nach Fertigstellung der Versuchsstrecke fanden in den Vegetationsperioden 2015 und 2016 Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung statt. Dabei wurden Flächendeckungsgrad, Artenzusammensetzung und Biomasse erhoben und erste Messungen zu relativem Wassergehalt und Wassersättigungsdefizit ausgewählter Arten (*Phleum pratense*, *Trifolium pratense*) vorgenommen.

Ergebnisse: Die Analysen zeigten zufriedenstellende Ergebnisse im Hinblick auf Flächendeckungsgrad und Biomasse an den mit den Bodensubstraten Innsbrucker Quarzphyllit und Bündnerschiefer verfüllten Versuchsfeldern. Die schlechten Resultate am Versuchsfeld Zentralgneis wurden nach bodenchemischer Untersuchung der verwendeten Bodensubstrate auf eine besonders schlechte Qualität (hoher Salzgehalt) des in diesem Feld zur Anwendung gekommenen Kompostanteils zurückgeführt. Es ist davon auszugehen, dass der hohe Anteil an Schichtsilikaten in den Gesteinen Innsbrucker Quarzphyllit und Bündnerschiefer (bessere Nährstoffversorgung, höhere Wasserspeicherkapazität durch stärkere Verwitterung) zusätzlich zu einem besseren Pflanzenwachstum beitragen konnte. Vergleiche zwischen den Geotextilien zeigten eine deutlich bessere Funktionalität der netzartigen (engmaschiges Geogitter, weitmaschiges Geogitter, Kokosnetz) gegenüber den flächendeckenden Typen (Kokosmatte, Geomatte). Eine genauere Betrachtung der Artenzusammensetzung zeigte gute Erfolge hinsichtlich der Entwicklung von Gräsern und Leguminosen, während Kräuter auf der gesamten Versuchsstrecke nur in geringen Anteilen vertreten waren. Eine Überprüfung der Saatgutmischung ließ auf eine schlechtere Keimfähigkeit der enthaltenen Kräutersamen schließen. Die Messungen zu relativem Wassergehalt und Wassersättigungsdefizit von *Phleum pratense* und *Trifolium pratense* zeigten keine nennenswerten Auffälligkeiten,

weshalb von einer ausreichenden Wasserversorgung durch das eingebaute Bewässerungssystem auszugehen ist.

Schlussfolgerung: Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass eine gute Leistungsfähigkeit des für die Begrünung verwendeten 3D-Stahlgittersystems bei Verwendung von geeignetem Bodensubstrat in Kombination mit netzartigen Geotextilien gegeben ist. In diesem Fall kann die Verwendung der Gesteine Innsbrucker Quarzphyllit und Bünderschiefer mit beigemengtem Kompost von hoher Qualität empfohlen werden. Aufgrund der guten Ergebnisse kann außerdem die Anwendung eines weitmaschigen Geogitters positiv hervorgehoben werden.

Publikation [4]*: Medl, A., Stangl, R., Florineth, F. (2017). Vertical greening systems – a review on recent technologies and research advancement. Building & Environment 125, 227 – 239.

Ziel: Auf Basis einer fundierten Literaturrecherche soll ein Überblick über den derzeitigen Stand der Technik im Bereich vertikaler Begrünungssysteme gegeben werden. Im Zuge dessen werden aktuelle Forschungsprojekte miteinander verglichen und analysiert, um eventuelle Forschungslücken aufzudecken.

Ergebnisse: Die Literaturrecherche zeigte, dass sich viele Quellen zum Thema ‚Vertikale Begrünungssysteme‘ auf die Vorteile einer Anwendung im Stadtgebiet konzentrieren. Oft steht dabei der positive Einfluss von ‚grünen Fassaden‘ auf das thermische Verhalten der Gebäudehülle bewohnter Bauwerke im Mittelpunkt. Vertikale Begrünungssysteme haben aber auch abseits städtischer Bereiche in ländlicheren Regionen großes Potenzial positive Veränderungen zu bewirken. In diesem Zusammenhang können speziell ‚Landschaftsästhetik‘ und ‚Biodiversität‘ als Schlagwörter genannt werden. Vertikale Begrünungssysteme helfen künstliche Bauwerke wieder ins Landschaftsbild zu integrieren und leisten damit einen wertvollen Beitrag zur Wiederherstellung der Landschaftskonnektivität sowie zur Erhaltung der Artenvielfalt.

Die Analyse ausgewählter Studien zum Thema ‚Vertikale Begrünungssysteme‘ hat gezeigt, dass ein wissenschaftlich fundierter und aussagekräftiger Vergleich aufgrund der großen Spannweite an unterschiedlichen untersuchten Parametern (Klimazone, Exposition, Begrünungssystem, Vegetation, etc.) bisher nicht möglich ist.

Schlussfolgerung: Technische Infrastruktureinrichtungen in ländlichen Regionen bergen großes Forschungspotenzial hinsichtlich der Anwendung vertikaler Begrünungssysteme speziell betreffend einer vertiefenden Behandlung von Themen wie Regenwasserrückhalt, Biodiversität oder Wiederherstellung der Landschaftskonnektivität. Einheitlichere Forschungsansätze im Hinblick auf die Auswahl untersuchter Parameter würden zudem eine bessere Vergleichbarkeit nationaler wie internationaler Studien gewährleisten, wodurch wissenschaftlich begründete Aussagen über die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Systeme vereinfacht werden können.

Publikation [5]*: Medl, A., Florineth, F., Kikuta, S.B., Mayr, S. (submitted). Irrigation of 'Green Walls' is necessary to avoid drought stress of grass vegetation (*Phleum pratense* L.). Ecological Engineering.

Ziel: Aufgrund der starken Neigung der Spritzbetonwände wird bisher angenommen, dass das für die Begrünungszwecke in Steinach am Brenner verwendete 3D-Stahlgittersystem Niederschlag nur unzureichend aufnehmen kann. Angesichts dessen ist der Einbau einer künstlichen Bewässerung unumgänglich. Durch ein gezieltes Abschalten des Bewässerungssystems im Sommer 2017 sollen Notwendigkeit und Effizienz der Bewässerung bewiesen sowie das Verhalten der Vegetation (am Beispiel *Phleum pratense*) unter Trockenstress untersucht werden.

Methode: Zum Zweck des Trockenstressexperiments wurde unter Anwendung des 3D-Stahlgittersystems eine zweite Versuchsstrecke in Steinach am Brenner errichtet, welche mit zwei voneinander separat eingebauten Bewässerungskreisläufen (Kreislauf 1 und Kreislauf 2) ausgestattet worden ist. Kreislauf 1 wurde im Zuge des Trockenstressexperiments am 17. Juli 2017 für die Dauer der gesamten Vegetationsperiode abgedreht, während das Referenzfeld weiterhin vier Mal pro Tag für die Dauer von dreieinhalb Minuten bewässert wurde. Im Rahmen des Trockenstressexperiments wurden für einen Zeitraum von sechs Wochen sowohl (mikro-) klimatische als auch pflanzenphysiologische Daten erhoben. Eine sich in unmittelbarer Nähe befindliche Klimastation (siehe Publikation [2]) lieferte Daten zu Lufttemperatur und Niederschlag, von in die Versuchsstrecke eingebauten Bodensensoren wurde das Bodenwasserpotenzial sowohl in der Trockenstressfläche als auch in der Referenzfläche aufgenommen. An ausgewählten Tagen (trocken, sonnig) wurden außerdem Daten zur stomatären Leitfähigkeit, zum relativen Wassergehalt, Gesamtwasserpotenzial und osmotischen Potenzial von *Phleum pratense* erhoben.

Ergebnisse: Das längste Zeitfenster ohne erwähnenswerten Niederschlag während der gesamten Messperiode 2017 fand zwischen dem 25. Juli und dem 3. August statt. Zu dieser Zeit wurden die höchsten Lufttemperaturen aufgenommen, weshalb diese Periode in weiterer Folge als ‚Hitzeevent‘ bezeichnet wird. Unmittelbar danach folgten Tage (4. bis 11. August) mit starkem Regenfall. Das Bodenwasserpotenzial zeigte eine deutliche Austrocknung zwischen 25. Juli und 3. August in der Trockenstressfläche, während sich die bewässerte Referenzfläche in einem konstanten Sättigungszustand befand. Während der nachfolgenden niederschlagsreichen Tage konnte sich auch die Trockenstressfläche wieder voll aufsättigen. Die pflanzenphysiologischen Messungen an *Phleum pratense* zeigten während der Hitzetage signifikant niedrigere Werte für die stomatäre Leitfähigkeit und den relativen Wassergehalt auf der Trockenstressfläche im Vergleich zur Referenzfläche. Auch das Gesamtwasserpotenzial und das osmotische Potenzial von *Phleum pratense* waren ohne Bewässerung niedriger, wodurch eindeutig auf Trockenstress geschlossen werden konnte. Die unmittelbar nach dem Niederschlagsereignis aufgenommenen Daten wiesen allerdings auch auf eine gute Regenerationsfähigkeit von *Phleum pratense* hin.

Schlussfolgerung: Das Trockenstressexperiment zeigte deutlich, dass eine fehlende Bewässerung während mehrerer aufeinander folgender Hitzetage negative Auswirkungen

auf die physiologische Leistungsfähigkeit von *Phleum pratense* hat. Vor allem in Anbetracht des Klimawandels, der längere und intensivere Hitzeperioden erwarten lässt, ist ein integriertes Bewässerungssystem in ‚Green Walls‘ in niederschlagsarmen Regionen unbedingt zu empfehlen.

4.2. Thematischer Zusammenhang der Publikationen

Die im Rahmen der Dissertation veröffentlichten Publikationen beschäftigen sich mit der Begrünung von vertikalen Extremstandorten im Allgemeinen und im Speziellen und werden daher in weiterer Folge, wie in Abbildung 2 dargestellt, in ‚allgemein‘ ([4]) und ‚projektbezogen‘ ([1], [2], [3], [5]) unterteilt. Den Rahmen der Publikationen [1], [2], [3] und [5] bildet das in Steinach am Brenner/Tirol durchgeführte Forschungsprojekt. Im Zuge dessen wurden zwei Versuchsstrecken (Versuchsstrecke 1 zu den Themen Vegetation und Mikroklima und Versuchsstrecke 2 zum Thema Trockenstress) errichtet, wobei ein speziell für den Zweck der Begrünung vertikaler Spritzbetonwände ausgewähltes 3D-Stahlgittersystem zur Anwendung kam. Im Rahmen eines dreijährigen Monitorings wurde die Leistungsfähigkeit des Systems evaluiert. Während in Publikation [1] primär das den wissenschaftlichen Untersuchungen zugrundeliegende Forschungskonzept vorgestellt wird, stehen in den Publikationen [2], [3] und [5] die im Zuge der am Versuchsstandort durchgeführten Forschungsarbeiten erhaltenen Ergebnisse im Mittelpunkt. Untersucht wurden die mikroklimatischen Eigenschaften eines mit dem 3D-Stahlgittersystems begrünten Spritzbetonwandsegments im Vergleich zu einem unbegrünten Wandsegment ([2]), die Vegetationsentwicklung auf dem Begrünungssystem unter Anwendung unterschiedlicher Systemkomponenten ([3]) und die Notwendigkeit eines in das Begrünungssystem integrierten Bewässerungssystems ([5]).

Die durch experimentelle Forschung erhaltenen Ergebnisse wurden durch die Durchführung einer Reviewstudie ergänzt. Im Fokus dieser allgemein gehaltenen Publikation [4] steht die Erstellung eines detaillierten Überblicks über den derzeitigen Stand der Technik auf dem Gebiet vertikaler Begrünungssysteme. Nachdem die Publikation chronologisch nach Veröffentlichung der Publikationen [2] und [3] entstand, konnten diese bereits berücksichtigt und miteinbezogen werden.

Aus den im Zuge der Publikationen erhaltenen Erkenntnissen werden im Rahmen der Dissertation Schlussfolgerungen für Wissenschaft und Praxis im Landschaftsbau abgeleitet.

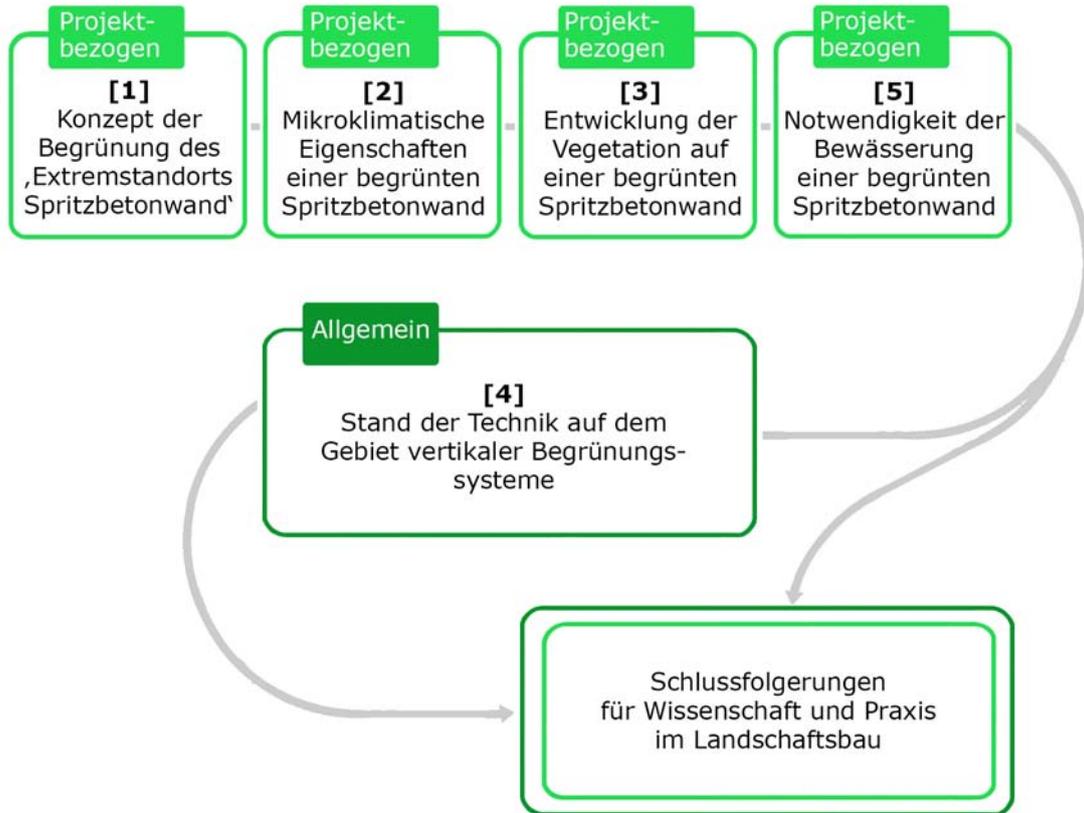


Abbildung 2: Struktur der vorliegenden Dissertation, aufgebaut auf fünf veröffentlichten Publikationen (nicht chronologisch).

5. Analyse und Synthese der Ergebnisse

Eine fundierte Literaturrecherche zum derzeitigen Stand der Technik im Bereich ‚Vertikale Begrünungssysteme‘ zeigte, dass das Hauptaugenmerk der Wissenschaft in jüngster Vergangenheit primär auf eine Anwendung im Stadtgebiet in Form von Fassadenbegrünungssystemen gelegt wurde. Eine wesentliche Forschungslücke bildet dabei der Ansatz, vertikale Begrünungssysteme auch für Maßnahmen in ländlichen Regionen zu nutzen. Durch den Einsatz vertikaler Begrünungssysteme können technisch notwendige Bauwerke wie Spritzbetonwände, Brückenkonstruktionen oder Tunnelportale wieder in die Landschaft integriert und Lebensraumverbindungen hergestellt werden [4, 1, 2, 3].

Um die Leistungsfähigkeit derartiger Systeme auch abseits urbaner Gebiete quantifizieren zu können, wurden in Steinach am Brenner zwei Versuchsstrecken (zu Vegetation/Mikroklima und Trockenstress) mit Fokus auf die Begrünung von Spritzbetonwänden errichtet. Zur Anwendung kam dabei ein speziell für solche Zwecke entwickeltes 3D-Stahlgittersystem, welches in Kombination mit Bodensubstrat, Vegetation und Geotextil gemeinsam mit der Spritzbetonwand eine so genannte ‚Green Wall‘ bildet und im Hinblick auf Vegetation (Deckungsgrad, Artenzusammensetzung) und Mikroklima untersucht wurde [1, 2, 3, 5]. Aus den durch die wissenschaftlichen Untersuchungen erhaltenen Ergebnissen lassen sich in weiterer Folge auch Empfehlungen für die Praxis ableiten.

Durch die erste Versuchsstrecke konnte das vertikale Begrünungssystem unter anderem bezüglich seiner Eignung zur Begrünung von Spritzbetonwänden hinsichtlich einer Wiedereinbindung in die umliegende Landschaft untersucht werden. Es wurde evaluiert, in welcher Kombination verschiedenartige Systemkomponenten (Bodensubstrat, Vegetation, Geotextil) zu einer nachhaltig zufriedenstellenden Vegetationsentwicklung und damit zu einer wesentlichen Verbesserung des Landschaftsbilds führen (**F1**). Den Feldversuchen vorausgehend wurden alle zur Herstellung der Bodensubstrate verwendeten Gesteinsmaterialien (Innsbrucker Quarzphyllit, Bündnerschiefer, Zentralgneis) im Labor der Universität für Bodenkultur einem Kressetest unterzogen. Die Samen der empfindlichen Gartenkresse (*Lepidium sativum*) dienten dabei als Bioindikator zum Nachweis einer Eignung als Bodensubstrat. Eine Belastung des untersuchten Materials (Versalzung, Überdüngung, vorhandene Schadstoffe) würde sich rasch negativ auf die Keimung der Gartenkresse auswirken. Nachdem die Ergebnisse der Untersuchungen auf keinerlei Beeinträchtigung der Gesteinsmaterialien schließen ließen, konnten die Analysen im Freiland unter den gegebenen Standortverhältnissen wie geplant umgesetzt werden. Die drei ausgewählten Gesteinsmaterialien setzen sich aus Grobmaterial (Korngröße 32/64 mm) und Feinmaterial (Korngröße 0/22 mm) zusammen und bilden jeweils in Kombination mit Kompost (2/3 Feinmaterial + 1/3 Kompost) die zur Befüllung des 3D-Stahlgittersystems verwendeten Bodensubstrate. Jedes der drei sich daraus ergebenden Versuchsfelder wurde zum Schutz des aufgebrauchten Saatguts vor Auswaschung oder Verwehung insbesondere in der Initialphase der Vegetationsentwicklung mit Geotextilien

abgedeckt. Für Vergleichszwecke wurden insgesamt fünf verschiedene Geotextilien (weitmaschiges Geogitter, engmaschiges Geogitter, Kokosnetz, Kokosmatte, Geomatte) zur Analyse ausgewählt. Untersuchungen zu Flächendeckungsgrad und Biomasse zeigten deutlich schlechtere Resultate auf der mit Zentralgneis (62%; 119,8 g/m²) verfüllten Testfläche, während sowohl Innsbrucker Quarzphyllit (91%; 159,7 g/m²) als auch Bündnerschiefer (85%, 151,1 g/m²) zufriedenstellende Ergebnisse erbrachten. Zurückgeführt werden kann dies zum einen auf die mineralische Zusammensetzung der Gesteine, zum anderen auf die bodenchemischen Eigenschaften des verwendeten Kompostanteils. Es konnte festgestellt werden, dass in der mit Zentralgneis verfüllten Fläche von der mit der Ausführung beauftragten Firma Kompost von schlechter Qualität verwendet worden ist. So ergaben chemische Analysen eine elektrische Leitfähigkeit von 1163 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Bodensubstrat Zentralgneis, was weit über der in der Literatur empfohlenen Obergrenze von 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Scheffer & Schachtschabel, 2009) liegt. Dieser Wert deutet auf einen sehr hohen Salzgehalt im Bodensubstrat hin (Bray & Reid, 2002; López-Aguilar et al., 2003), weshalb starke negative Beeinträchtigungen der Pflanze zu erwarten waren. Auch die Mineralzusammensetzungen von Innsbrucker Quarzphyllit und Bündnerschiefer bieten in Anbetracht einer Verwendung als Nährboden für Pflanzen wesentlich bessere Voraussetzungen als Zentralgneis. Während letztgenannter weitgehend nährstofffrei ist, haben die in Innsbrucker Quarzphyllit und Bündnerschiefer reichlich enthaltenen Schichtsilikate die Fähigkeit Kationen zu adsorbieren, diese als pflanzenverfügbare Nährstoffe zu speichern und sie im Zuge des Verwitterungsprozesses wieder abzugeben (Mengel & Kirkby, 2001). Durch die enthaltenen Schichtsilikate verwittern Innsbrucker Quarzphyllit und Bündnerschiefer schneller als Zentralgneis, wodurch ein höherer Anteil an Feinpartikeln entsteht. In diesem Zusammenhang ist davon auszugehen, dass die Wasserspeicherkapazität in den Bodensubstraten ‚Innsbrucker Quarzphyllit‘ und ‚Bündnerschiefer‘ höher ist als im Bodensubstrat ‚Zentralgneis‘, was in weiterer Folge eine bessere Wasserversorgung für die Pflanzen bedeutet [3].

Von den Geotextilien hat sich das weitmaschige Geogitter mit einer erreichten Vegetationsabdeckung von 94% (Vegetationsperiode 2016, vor dem Mähen) als für den Einsatz an ‚Green Walls‘ am besten geeignetes Material herauskristallisiert. Unmittelbar danach folgten das Kokosnetz (84%) und das engmaschige Geogitter (83%), während die Kokosmatte (69%) und die Geomatte (67%) betreffend der Vegetationsentwicklung deutlich schlechtere Resultate erzielten. Dies ist auf die Maschenweite der verwendeten Geotextilien zurückzuführen. Während es sich beim weitmaschigen Geogitter, dem Kokosnetz und dem engmaschigen Geogitter um netzartige Geotextilien handelt, sind Kokosmatte und Geomatte flächendeckend ausgeführt und stellen in der Initialphase der Vegetationsentwicklung eine mechanische Barriere dar (Obriejetan, 2015). Bezüglich der Materialkomponente (Kunststoff oder Naturfaser) konnten hinsichtlich der Vegetationsentwicklung keine Unterschiede festgestellt werden. Aus diesem Grund sollten die zu verwendenden Materialien bevorzugt nach Zweck ausgewählt werden. Im Zusammenhang mit ingenieurb biologischen Bauweisen ist grundsätzlich biologisch abbaubaren Materialien (Naturfasern) der Vorzug zu geben, an Standorten mit speziellen Stabilitätsanforderungen ist es jedoch empfehlenswert, auf dauerhaftere Materialien (Kunststoffe) zurück zu greifen (Obriejetan, 2015). Kunststoffe haben eine längere Lebensdauer und gewährleisten daher eine nachhaltigere Schutzfunktion. Im Hinblick auf

die starke Neigung der sich hinter dem Begrünungssystem befindlichen Spritzbetonwand und der unmittelbaren Nähe zur Straße bieten synthetische Geotextilien somit eine zusätzliche Sicherheit vor eventuell ausfallendem Bodensubstrat, insbesondere in den Phasen vor und während der Vegetationsentwicklung, wenn die festigende Wirkung der Wurzeln noch nicht vorhanden ist.

Das visuelle Erscheinungsbild von ‚Green Walls‘ wird primär vom Flächendeckungsgrad der anwachsenden Vegetation beeinflusst. Ein gutes Zusammenspiel geeigneter Materialien ermöglicht die Entstehung einer flächendeckenden vitalen Vegetation, weshalb eine Wiedereinbettung technischer Infrastrukturen in die umgebende Landschaft durch ‚Green Walls‘ nur durch ein optimales Zusammenwirken sorgfältig ausgewählter Systemkomponenten gewährleistet werden kann [3]. Eine gut etablierte Vegetationsdecke lässt in weiterer Folge außerdem positive Auswirkungen auf das Mikroklima erwarten.

Zur Feststellung der mikroklimatischen Unterschiede zwischen der ‚Green Wall‘ und einer ‚konventionellen‘ Spritzbetonwand (**F2**) wurde das Mikroklima auf der ersten Versuchsstrecke vor bzw. hinter dem begrünten 3D-Stahlgittersystem und vor einer nackten Spritzbetonwand gemessen und analysiert [2, 1].

Während die Daten zu Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit zwischen begrünter und unbegrünter Spritzbetonwand keine bedeutsamen Unterschiede erkennen ließen (Vergleich Spritzbetonwand – ‚Green Wall‘, Lufttemperatur: - 0,9°C, relative Luftfeuchtigkeit: + 4,5%), konnten im Zuge des Vergleichs der Albedo (= Reflexionsstrahlung) von ‚Green Wall‘ und nackter Spritzbetonwand deutlich geringere Reflexionen am Begrünungssystem festgestellt werden (mit Begrünungssystem: 8%, ohne Begrünungssystem: 29%). Diese Ergebnisse bestätigen die bereits eingangs erwähnte Reduktion von Blendeffekten durch Begrünungsmaßnahmen (Kap. 3.1.2), welche nicht nur in Stadtgebieten, sondern auch in ländlichen Bereichen wirksam werden und dadurch eine wesentliche Erhöhung der Verkehrssicherheit bewirken können [2]. So gilt es als wissenschaftlich erwiesen, dass sich die Begrünung von Tunnelportalen vorteilhaft auf die Dunkeladaptation des Auges bei Einfahrt in den Tunnel auswirkt (Peña-García et al., 2015), wodurch Unfälle unmittelbar hinter der Tunneleinfahrt vermieden werden können [4].

Auffallend war außerdem der durch das Begrünungssystem – sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf – erreichte Puffereffekt, welcher im Juli 2015, dem heißesten Monat (Ø 18,5°C) der Messperiode 2015/2016, zu einem maximalen Temperaturunterschied von 18,9°C zwischen der Spritzbetonwand ohne Begrünung (35,7°C) und der Spritzbetonwand hinter dem Begrünungssystem (16,8°C) führte. Während der Abendstunden kühlte die Wand unter dem Begrünungssystem merklich langsamer ab, wobei sie trotzdem konstant niedrigere Temperaturen aufwies als die Spritzbetonwand ohne Begrünungssystem. So betrug die maximale Temperaturspanne zwischen Tag und Nacht auf der nackten Spritzbetonwand 17,9°C, während der auf das 3D-Stahlgittersystem zurückzuführende Isolationseffekt den maximalen Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht der sich darunter befindlichen Wand auf 2,9°C reduzierte. Wesentlich geringer – aber dennoch vorhanden – war der Puffereffekt während der Winterzeit. Im Jänner 2016, dem kältesten Monat (Ø -1,5°C) während der Monitoringphase 2015/2016, lagen die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht auf der unbegrünten Spritzbetonwand bei 5,2°C, während sie auf der grünen Spritzbetonwand mit 0,7°C wesentlich geringer

ausfielen. Nachdem die Messungen im Sommer 2015 aufgrund des verspäteten Baus der Versuchsstrecke bereits in einer sehr frühen Entwicklungsphase der Vegetation mit dementsprechend geringem Flächendeckungsgrad durchgeführt werden mussten, wurden die Ergebnisse mit den Daten des darauffolgenden Sommers 2016 und einem höheren Deckungsgrad der Vegetation verglichen. Dieser Vergleich zeigte, dass keine nennenswert niedrigeren auf die Vegetation zurückzuführenden Wandtemperaturen oder Temperaturschwankungen gemessen wurden. Daraus wurde geschlossen, dass die Pufferwirkung bereits durch die mit Bodensubstrat verfüllten Stahlgitterlagen so stark ist, dass durch die Vegetation keine zusätzlichen Reduktionen zu erreichen sind [2].

Es ist bekannt, dass sowohl kurz- als auch langfristige Temperaturschwankungen zu inneren Spannungen führen und in weiterer Folge Rissbildungen in Materialien wie beispielsweise Beton hervorrufen (Weber, 2013). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Lebensdauer technischer Baukonstruktionen – wie den Spritzbetonwänden – durch Installation eines vertikalen Begrünungssystems verlängert wird und notwendige Instandhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen minimiert werden können. In diesem Zusammenhang ist außerdem zu erwähnen, dass Begrünungssysteme einen zusätzlichen und wirksamen Schutz vor einer eventuellen Chloridbelastung der Bauwerke durch Tausalz darstellen. Weitere konkrete Studien zu diesen Themen und zu eventuellen Auswirkungen der durch das Bewässerungssystem entstehenden Oberflächenfeuchtigkeit bzw. deren Verhinderung sind empfehlenswert.

Um eine für die Vegetation in ausreichendem Maß vorhandene Bodenfeuchtigkeit zu erhalten und auf Basis der Annahme, dass die Aufnahme von Niederschlag aufgrund der starken Neigung der ‚Green Wall‘ nicht möglich ist, wurde eine künstliche Bewässerung bisher als obligatorisch angesehen [2, 3]. Die Frage nach der tatsächlichen Effizienz und Notwendigkeit des Bewässerungssystems und was ein eventueller Ausfall für die Vegetation bedeutet, wurde im Zuge eines Trockenstressexperiments auf der zweiten Versuchsstrecke beantwortet [F3].

Ohne ausreichende Wasserversorgung sind eine gute Entwicklung und ein gesundes Wachstum der Pflanzen nicht möglich. Wasser wird daher zu einem wesentlichen Standortfaktor für Vegetationsstrukturen und ist ausschlaggebend für Erfolg und Misserfolg von Begrünungsmaßnahmen. Aufgrund der sowieso schon extremen Standortbedingungen ist eine den Umständen angepasste Wasserversorgung der ‚Green Walls‘ essentiell. Genauere pflanzenphysiologische Analysen (z.B. Untersuchung des relativen Wassergehalts) geben Information über den Vitalitätszustand der untersuchten Vegetation und können helfen Bewässerungsmaßnahmen optimal den Vegetationsbedürfnissen anzupassen [3].

Ein künstlich simulierter Ausfall des Bewässerungssystems im Sommer 2017 führte zu signifikanten physiologischen Reaktionen der Vegetation am Begrünungssystem auf einige aufeinanderfolgende Hitzetage. Für genauere physiologische Untersuchungen wurde die Gräserart *Phleum pratense* ausgewählt. Diese Gräserart verfügt über eine vergleichsweise breite Blattspreite, wodurch die Messungen der stomatären Leitfähigkeit mit dem Porometer wesentlich erleichtert werden. Messungen zum Bodenwasserpotenzial zeigten während dieser Tage deutlich negative Werte ($< -1,4$ MPa) und somit eine offensichtliche

Austrocknung des Bodensubstrats in der nicht bewässerten Testfläche, während sich die weiterhin bewässerte Referenzfläche konstant in voll gesättigtem Zustand befand. Dementsprechend unterschieden sich auch die Ergebnisse der gemessenen physiologischen Parameter (stomatäre Leitfähigkeit, relativer Wassergehalt, Blattwasserpotenzial, osmotisches Potenzial) auf Test- und Referenzfläche. Pflanzen reagieren auf Trockenstress unmittelbar mit einer Anpassung der stomatären Leitfähigkeit durch Schließen der Spaltöffnungen (Chaves et al, 2002; Farooq, 2009; Smith & Hollinger, 1991). Im Zuge des Trockenstressexperiments an der ‚Green Wall‘ konnte ein starker Zusammenhang zwischen sinkendem Bodenwasserpotenzial und reduzierter stomatärer Leitfähigkeit festgestellt werden. Ein Vergleich des relativen Wassergehalts von *Phleum pratense* auf Test- und Referenzfläche während der Hitzetage zeigte einen auf die fehlende Bewässerung zurückzuführenden deutlich geringeren relativen Wassergehalt auf der Testfläche ($-9,3 \pm 10,1\%$). Zudem konnten Reduktionen der stomatären Leitfähigkeit ($-148,6 \pm 118,8 \text{ mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$) und des Blattwasserpotenzials ($-0,3 \pm 0,5 \text{ MPa}$) im Vergleich zur Referenzfläche festgestellt werden.

Der unmittelbar auf die Hitzetage folgende andauernde Regenfall bewirkte eine vollständige Aufsättigung der Testfläche ($\sim 0 \text{ MPa}$) und eine schnelle Regeneration von *Phleum pratense* [5]. Anhand der im Zuge des Trockenstressexperiments gewonnenen Ergebnisse ließe sich also grundsätzlich schließen, dass bei einer ausreichenden Niederschlagsmenge und - Verteilung (wie sie im Sommer 2017 am Standort Steinach am Brenner gegeben war) eine Bewässerung nicht zwingend notwendig ist. Laut IPCC-Sonderbericht (*„Klimawandel und Land: Ein IPCC-Sonderbericht über Klimawandel, Wüstenbildung, Landdegradierung, nachhaltiges Landmanagement, Ernährungssicherheit und Treibhausgasflüsse in terrestrischen Ökosystemen“*; IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change) deuten Klimamodelle jedoch auf eine deutliche Erhöhung der extremen Temperaturen und längere, häufigere sowie intensivere Hitzeperioden hin (BMUB, 2012). Aufgrund der im Rahmen des Trockenstressexperiments erhaltenen Messergebnisse ist davon auszugehen, dass eine Regeneration der Pflanzen – wie am Beispiel *Phleum pratense* gezeigt – an einem Extremstandort wie der ‚Green Wall‘ in Zukunft nicht möglich sein wird. Auf ein integriertes, sensorgesteuertes und an die Wetterbedingungen anpassbares Bewässerungssystem sollte daher vor allem in niederschlagsärmeren Regionen zur Erhaltung einer nachhaltig vitalen Vegetationsdecke auch zukünftig nicht verzichtet werden.

Um die Aussagekraft der durch das Trockenstressexperiment gewonnenen Ergebnisse zu verstärken und sinnvoll zu ergänzen sind Untersuchungen über einen längeren Zeitpunkt sowie an einer größeren Auswahl verschiedener Arten notwendig. Anbieten würden sich trockenresistente Arten wie beispielsweise *Festuca ovina*, *Lotus corniculatus*, *Medicago lupulina*, *Achillea millefolium*, *Plantago lanceolata* und *Salvia pratensis*.

Eine Problematik die sich an den ‚Green Walls‘ durch das Zusammenwirken des Bodensubstrats (Grob- und Feinmaterial) mit dem integrierten Bewässerungssystem ergeben könnte, ist das Ausspülen von Feinmaterial. In der Vegetationsperiode 2015 wurden die ‚Green Walls‘ drei Mal täglich für eine Dauer von ca. 30 Minuten bewässert, wobei festgestellt wurde, dass erhebliche Wassermengen nicht vom Bodensubstrat aufgenommen werden, sondern auf direktem Wege durch das System durchfließen und

somit die angrenzende Straße ‚bewässern‘. Abgesehen von einem nicht nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser kommt es durch derartige Vorgänge zur Auswaschung von Feinmaterial, was gleichzeitig den Verlust von wasserspeicherndem Bodensubstrat bedeutet. Das Grobmaterial alleine verfügt nicht über die Fähigkeit Wasser zu speichern, weshalb der Schwund von Feinmaterial gleichzeitig eine erhebliche Verringerung von pflanzenverfügbarem Wasser bedeutet. Dies führt in weiterer Folge, trotz Bewässerung, zur Austrocknung des Vegetationsbestands. Um dem entgegenzuwirken wurden im Jahr 2017 die Bewässerungsintervalle auf vier Mal pro Tag erhöht, während die Bewässerungsdauer gleichzeitig auf dreieinhalb Minuten reduziert wurde. Ein Herausfließen des Wassers aus dem Begrünungssystem blieb daraufhin aus und das Bodensubstrat befand sich während der Vegetationsperiode 2017 in dauerhaft gesättigtem Zustand [5].

Im Laufe der gesamten über den Zeitraum von drei Vegetationsperioden dauernden Monitoringperiode hat sich gezeigt, dass eine Begrünung von Spritzbetonwänden mit dem 3D-Stahlgittersystem und geeignetem Bodensubstrat möglich ist. Trotzdem wurde noch einmal deutlich, welchen extremen Herausforderungen die an diesem Standort zu etablierenden Pflanzen ausgesetzt sind:

Das Begrünungssystem besteht aus zwei übereinander befestigten Stahlgitterlagen, die eine Tiefe von jeweils acht Zentimetern aufweisen. Nach Befüllung des Systems mit Bodensubstrat verfügen die Pflanzen mit einer Gesamttiefe von 16 Zentimetern demnach über einen stark eingeschränkten Wurzelraum. Aufgrund der dadurch entstehenden schnellen Austrocknungsgefahr während der Sommermonate ist eine Bewässerung daher – wie bereits beschrieben – als obligatorisch anzusehen [5]. Ein weiterer Nachteil, welcher sich durch das nur begrenzt zur Verfügung stehende Bodensubstrat ergibt, ist die dadurch limitierte Nährstoffverfügbarkeit. Die durch das Zufügen von Kompost [3, 2] erreichte Versorgung mit pflanzenverfügbaren Nährstoffen dürfte nach einer Vegetationsperiode erschöpft sein, weshalb zur weiteren Erhaltung eines vitalen Vegetationsbestands auf eine ausreichende Nährstoffzufuhr aus externen Quellen geachtet werden muss. Eine dieser externen Nährstoffquellen – die auf die Verrottung von Biomasse zurückzuführende Nährstoffzufuhr – fällt aufgrund der starken Neigung der mit dem 3D-Stahlgittersystem begrünten Spritzbetonwand aus, da das nach der Mahd anfallende Schnittmaterial nicht auf der Oberfläche liegen bleiben kann. Von einem externen Aufspritzen von Flüssigdünger ist im Fall der ‚Green Walls‘ abzusehen, da davon auszugehen ist, dass die Flüssigkeit an der Oberfläche abrinnt, anstatt vom Bodensubstrat aufgenommen zu werden. Für die mit dem Stahlgittersystem begrünten Spritzbetonwände wäre daher eine über die eingebaute Tröpfchenbewässerung durchgeführte Düngung in flüssiger Form zu erwägen. Zur Vermeidung einer Verstopfung der Tropflöcher durch Kristallisieren muss in unmittelbarem Anschluss an die erfolgte Düngung mit Wasser nachgespült werden.

Die Untersuchungen an den ‚Green Walls‘ [3] haben deutlich gezeigt, dass ein qualitativ hochwertiges Bodensubstrat maßgeblich zu einer guten Entwicklung des Vegetationsbestands beiträgt. Eine Versalzung des Bodens, wie es in der Versuchsfläche ‚Zentralgneis‘ der Fall war, führt in der Pflanze zur Beeinträchtigung verschiedener physiologischer und biochemischer Prozesse (Rehman et. al., 2008), die sich durch

Kleinwuchs, Hemmung des Wurzelwachstums und Nekrosenbildung bemerkbar macht (Larcher, 1994). Zu begründen ist dies mit der starken osmotischen Bindung des Bodenwassers, welches mit zunehmender Salzkonzentration immer schlechter für die Pflanzen verfügbar wird (Larcher, 1994; Brunold et al., 1996), weshalb Salzstress in Pflanzen zu ähnlichen Stresssymptomen führt wie Trockenstress. An der Versuchsfläche ‚Zentralgneis‘ hat sich das deutlich durch den im Vergleich zu den Versuchsflächen ‚Innsbrucker Quarzphyllit‘ und ‚Bündnerschiefer‘ stark verringerten Flächendeckungsgrad des Vegetationsbestands gezeigt. Diese verringerte Abdeckung des Bodens durch Vegetation führt infolgedessen zu einer weiteren Salzproblematik während der Wintermonate. Die unmittelbare Straßennähe der ‚Green Walls‘ bewirkt einen zusätzlichen, externen Salzeintrag durch Streusalze. Da durch Salzstress bedingte Symptome an heißen, trockenen und windigen Standorten – wie den ‚Green Walls‘ – besonders stark ausgeprägt sind (Fox et al., 2005; Niu et al., 2007; Wu et al., 2001), gilt es ein Eindringen gelöster Streusalze durch Spritzwasser ins Bodensubstrat durch eine möglichst geschlossene Vegetationsdecke auf ein Minimum zu beschränken. Es ist daher anzustreben besonders in den unteren ein bis zwei Metern der ‚Green Walls‘ einen hohen Vegetationsdeckungsgrad zu erreichen. Zusätzlich muss bei der Erstellung der Saatgutmischung auf eine Auswahl möglichst salzresistenter Arten geachtet werden.

Die Analysen zum Mikroklima an den begrünten und nicht begrünten Spritzbetonwänden [2] haben gezeigt, dass aufgrund der exponierten Lage vor allem in den Sommermonaten mit hohen Temperaturen durch starke Sonneneinstrahlung zu rechnen ist. Durch die tagsüber entstehenden Temperaturextreme von über 30°C besteht die Gefahr von auftretendem Hitzestress, die meisten weichlaubigen Landpflanzen werden bereits bei Temperaturen zwischen 30 und 40°C geschädigt (Larcher, 1994). Ist während der auftretenden Hitze eine gute Wasserversorgung gegeben, können mitteleuropäische Pflanzen durch Transpiration wesentliche Kühlwirkungen erzielen, die eine Überhitzung des Pflanzenkörpers bei starker Sonneneinstrahlung und hohen Temperaturen verhindert (Langhammer, 1980). Bei Wassermangel jedoch werden die Spaltöffnungen in den Blättern geschlossen, um weitere Wasserverluste durch Transpiration zu verhindern (Stöcklin, 2007). Das Aussetzen der Kühlleistung des Pflanzenapparats sowie die Beeinträchtigung der Photosynthese durch fehlende Aufnahme von CO₂ bedeutet für die Pflanze in weiterer Folge das Auftreten von Hitzestress (Stöcklin, 2007; Shabala, 2012). Bei geschlossenen Spaltöffnungen, starker Sonneneinstrahlung und gleichzeitig hohen Temperaturen können die Blatttemperaturen auf über 40°C ansteigen (Nover & Weiler, 2008), wodurch es zu irreversiblen Schädigungen des Photosyntheseapparats kommen kann (Shabala, 2012). Die Folgen einer typischen Multistresskombination (Hitze und gleichzeitiger Wassermangel) sind erhebliche Verminderungen des Wachstums und der Blüten- und Samenbildung (Nover & Weiler, 2008). Um Hitzeschäden an der Vegetation auf ‚Green Walls‘ zu vermeiden ist eine gewissenhafte Auswahl hitze- und trockenresistenter Pflanzenarten im Zuge der Zusammenstellung der Saatgutmischung sowie eine sorgfältige Überwachung und Steuerung des Bewässerungssystems notwendig.

Während des Untersuchungszeitraums stellte sich zudem heraus, dass die verwendete Saatgutmischung (Tabelle 2) hinsichtlich einer flächendeckenden Vegetationsentwicklung

zwar gut funktioniert, die Artenzusammensetzung auf den Versuchsflächen im Vergleich zur aufgebrauchten Saatgutmischung allerdings stark reduziert war und sich hauptsächlich auf Gräser und Leguminosen beschränkte. Analysen in den Vegetationsperioden 2015 und 2016 zeigten, dass sich vor allem *Festuca ovina*, *Festuca rubra*, *Phleum pratense*, *Lotus corniculatus*, *Medicago lupulina*, *Trifolium pratense*, *Trifolium repens* und *Achillea millefolium* auf den ‚Green Walls‘ etablieren konnten [3]. Entsprechend dieser Ergebnisse und mit dem Ziel auf ‚Green Walls‘ mit ähnlichen ökologischen Bedingungen wie in Steinach am Brenner auch künftig nachhaltig flächendeckende Vegetationsbestände zu erreichen, wurde die Saatgutmischung adaptiert. Ein Vorschlag dazu findet sich im Anschluss in Tabelle 3.

Die ursprüngliche Saatgutmischung enthielt eine Vielzahl an Arten mit großer ökologischer Amplitude (*Festuca ovina*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne*, *Phleum pratense*, *Poa pratensis*, *Anthyllis vulneraria*, *Lotus corniculatus*, *Medicago lupulina*, *Trifolium repens*, *Trifolium pratense*, *Achillea millefolium*) sowie einzelne, auf Trockenstandorte spezialisierte Arten. Zu diesen zählen *Dianthus carthusianorum*, *Galium verum*, *Hieracium pilosella*, *Petrorhagia saxifraga*, *Plantago lanceolata*, *Salvia pratensis*, *Sanguisorba minor* und *Thymus pulegioides*. Es handelt sich dabei um typische Schotterrasen-Arten, welche an trockenen, stark belasteten Standorten eingesetzt werden um eine widerstandsfähige und dauerhafte Begrünung zu erreichen. Gleichzeitig sind diese Arten – mit Ausnahme von *Plantago lanceolata* und *Salvia pratensis* – jedoch sehr konkurrenzschwach und können sich gegenüber schnellwachsenden Gräsern und dominanten Leguminosen nur schwer behaupten. Dies ist, neben einer im Vergleich zu den in der Saatgutmischung enthaltenen Gräsern und Leguminosen geringen Keimfähigkeit [3], der Hauptgrund für den minimalen Kräuteranteil an den ‚Green Walls‘ in Steinach am Brenner. In der neuen Saatgutmischung wurde die Anzahl an Kräuter-Arten daher von zehn auf die drei konkurrenzstärksten Arten (*Achillea millefolium*, *Plantago lanceolata*, *Salvia pratensis*) reduziert. Die Anzahl an Gräser- und Leguminosen-Arten blieb im Vergleich zur ursprünglichen Saatgutmischung und mit dem Ziel einer guten Flächendeckung weitgehend gleich, es wurden lediglich *Dactylis glomerata* (hohes Obergras und sehr dominant) und *Ononbrychis viciifolia* (hohe Leguminose und auf Wiesen beschränkt) durch *Agrostis capillaris* (niederes Gras mit großer ökologischer Amplitude) und *Medicago sativa* (konkurrenzstark und schnelle Bewurzelung) ersetzt. Der hohe Anteil an Leguminosen wird durch die Bindung von Luftstickstoff und dessen Weitergabe in den Boden gerechtfertigt. Bei *Festuca rubra* wurde zudem auf ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen der ausläuferbildenden und der hostbildenden Unterart geachtet.

Tabelle 2: Verwendete Saatgutmischung zur Begrünung der Spritzbetonwände in Steinach am Brenner.

Botanischer Name	Mischungsanteil in Gewichtsprozent	Deutscher Name
Gräser		
<i>Dactylis glomerata</i> *	3,00	Knäuelgras
<i>Festuca ovina</i>	28,00	Schafschwingel
<i>Festuca rubra</i>	32,00	Rotschwingel
<i>Lolium perenne</i>	4,00	Englisches Raygras
<i>Phleum pratense</i>	2,00	Lieschgras
<i>Poa pratensis</i>	5,00	Wiesenrispe
	74,00	
Leguminosen		
<i>Anthyllis vulneraria</i>	2,00	Wundklee
<i>Lotus corniculatus</i>	4,00	Hornschotenklee
<i>Medicago lupulina</i>	3,00	Gelbklee
<i>Onobrychis viciifolia</i> *	2,00	Espargette
<i>Trifolium repens</i>	5,00	Weißklee
<i>Trifolium pratense</i>	2,00	Rotklee
	18,00	
Kräuter		
<i>Achillea millefolium</i>	3,00	Schafgarbe
<i>Dianthus carthusianorum</i> *	0,50	Kartäusernelke
<i>Galium verum</i> *	0,25	Echtes Labkraut
<i>Hieracium pilosella</i> *	0,25	Kleines Habichtskraut
<i>Petrorhagia saxifraga</i> *	0,25	Felsennelke
<i>Plantago lanceolata</i>	0,50	Spitzwegerich
<i>Salvia pratensis</i>	1,00	Wiesensalbei
<i>Sanguisorba minor</i> *	1,00	Kleiner Wiesenknopf
<i>Silene vulgaris</i> *	0,50	Taubenkropf-Leimkraut
<i>Thymus pulegioides</i> *	0,75	Feld-Thymian
	8,00	

* in der adaptierten Version der Saatgutmischung nicht mehr vorhandene Arten

Tabelle 3: Vorschlag einer an die Standortverhältnisse von Steinach am Brenner angepassten Saatgutmischung für zukünftige Begrünungsprojekte an ‚Green Walls‘.

Botanischer Name	Mischungsanteil in Gewichtsprozent	Deutscher Name
Gräser		
<i>Agrostis capillaris</i> *	2,00	Rotes Straußgras
<i>Festuca ovina</i>	20,00	Schafschwingel
<i>Festuca rubra ssp. rubra</i> *	15,00	Rotschwingel ausläuferbildend
<i>Festuca rubra ssp. commutata</i> *	20,00	Rotschwingel horstbildend
<i>Lolium perenne</i>	5,00	Englisches Raygras
<i>Phleum pratense</i>	3,00	Lieschgras
<i>Poa pratensis</i>	8,00	Wiesenrispe
	73,00	
Leguminosen		
<i>Anthyllis vulneraria</i>	2,00	Wundklee
<i>Lotus corniculatus</i>	5,00	Hornschotenklee
<i>Medicago lupulina</i>	3,00	Gelbklee
<i>Medicago sativa</i> *	2,00	Luzerne
<i>Trifolium repens</i>	6,00	Weißklee
<i>Trifolium pratense</i>	2,00	Rotklee
	20,00	
Kräuter		
<i>Achillea millefolium</i>	5,00	Schafgarbe
<i>Plantago lanceolata</i>	1,00	Spitzwegerich
<i>Salvia pratensis</i>	1,00	Wiesensalbei
	7,00	

* in der adaptierten Version der Saatgutmischung ergänzte Arten und Unterarten

Abschließend wird auf das große Potenzial hinsichtlich ergänzender Projekte zur Erweiterung und Optimierung des Fachwissens im Bereich vertikaler Begrünungssysteme im ländlichen Raum hingewiesen. Literaturrecherchen – speziell jene zur Erstellung der Reviewstudie, aber auch die, welche zur Durchführung der einzelnen Versuche notwendig wurden – haben gezeigt, dass ergänzende Untersuchungen zu den Themen Wasserhaushalt [2, 5], Materialauswahl und –Zusammensetzung [3], Biodiversität [4, 3], Saatgutmischung [3], Fähigkeit zur Regenwasserretention [4] und Wiederherstellung von Lebensraumverbindungen/Biotopvernetzungen [4, 3] wesentlich zur Aufwertung des bisherigen Forschungsstands in diesem Wissenschaftsbereich beitragen würden.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus ingenieurbioologischer Sicht gelten ein erfolgreicher Anwuchs und die nachhaltige Etablierung der Zielvegetation als zentrale Erfolgskriterien für Begrünungsmaßnahmen (Obriejetan, 2015) und als Grundvoraussetzung für die Erfüllung verschiedener Funktionen. Hacker & Johannsen (2012) unterscheiden in diesem Zusammenhang nach technischer, ökologischer, ästhetischer und ökonomischer Wirkungsweise. Zusammengefasst kann eine ‚Green Wall‘ alle nachfolgend angeführten Kriterien erfüllen und daher zurecht als erfolgreich umgesetztes ingenieurbioologisches Bauwerk angesehen werden:

- **Technische Wirkungsweise:** ‚Green Walls‘ führen nachweislich zu einer starken Reduktion von Temperaturschwankungen an Spritzbetonwänden. Es ist daher davon auszugehen, dass die von dem Begrünungssystem ausgehende Dämmwirkung zu einer verlängerten Lebensdauer sowie vermindert notwendigen Instandhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen der zu begrünenden Stützbauwerke führt und sich somit positiv auf deren Haltbarkeit auswirkt. In diesem Zusammenhang zu erwähnen ist außerdem der durch die Installation eines Begrünungssystems zu erreichende Schutz vor Schäden durch Tausalzeinwirkung. Konkrete Untersuchungen dazu gibt es bisher nicht, weitere Forschungsarbeiten in diese Richtung sind wünschenswert. Vertikale Begrünungssysteme haben zudem einen positiven Einfluss auf Wasserrückhalt und Abflussverhalten an Bauwerken. Diese zusätzliche Kapazität der Wasserrückhaltung kann das Kanalnetz in Stadtgebieten insbesondere während Starkregenereignissen entlasten (Pitha et al., 2011). Es wird daher davon ausgegangen, dass diese Aussagen auch auf die ‚Green Walls‘ zutreffen. Vertiefende Studien zu diesem Thema sind bisher allerdings ausständig, was konkrete Forschungsarbeiten in diese Richtung notwendig macht.
- **Ökologische Wirkungsweise:** ‚Green Walls‘ haben einen positiven Einfluss auf das Mikroklima vor und hinter dem Begrünungssystem. Bodensubstrat und Vegetationsdecke bilden zudem wertvolle Lebensräume für Flora und Fauna, erfüllen damit wichtige Habitatfunktionen und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung und Erhaltung der Biodiversität.
- **Ästhetische Wirkungsweise:** Spritzbetonwände sind im Zuge von Infrastrukturprojekten entstandene Stützbauwerke, die technisch notwendig, aber nicht besonders ansehnlich sind. ‚Green Walls‘ ermöglichen die Wiederbegrünung derartiger, im Landschaftsbild störend wirkender vegetationsfreier Flächen. Sie können somit als wirkungsvolles Mittel zur landschaftsästhetischen Eingliederung derartiger Bauwerke in die umgebende Landschaft angesehen werden.
- **Ökonomische Wirkungsweise:** Attraktive Kultur- und Naturlandschaften haben als ‚touristisches Angebot‘ einen hohen Erlebniswert. Nach Kaspar (1986) beruht der Tourismus aus ökonomischer Sichtweise grundsätzlich auf dem Konsum derartiger Landschaftsgüter. Die Problematik dabei ist, dass Infrastrukturelemente wie Verkehrswege und Transportanlagen – welche einem Großteil der Touristen den

Landschaftskonsum überhaupt erst ermöglichen – einer Wertminderung gleichkommen, weil sie das ursprüngliche Landschaftsbild verändern oder gar zerstören (Blöchliger, 2002). Durch ihre landschaftsintegrierende Wirkung tragen ‚Green Walls‘ wesentlich zur Erhaltung der ästhetischen Wirkung und somit auch des Werts der Landschaft bei.

Wirtschaftliche Nachteile von ‚Green Walls‘ ergeben sich eventuell durch die hohen Anschaffungs- und Montagekosten sowie die lange, aber dennoch begrenzte Lebensdauer im Vergleich zu einer kostenextensiven Begrünung, wie beispielsweise Kletterpflanzen. Trotzdem sprechen der rasche Begrünungserfolg und die starke Verringerung von Temperaturschwankungen, welche sich lebensverlängernd auf das Bauwerk auswirken kann, für den Einsatz derartiger Begrünungssysteme.

6.1. Mehrwert der Ergebnisse für den Landschaftsbau

Wissenschaftliche Forschung ist durch arbeitsteilige Prozesse gekennzeichnet, welche eine Spezialisierung in einzelne Fächer zur Folge haben. Die Konsequenz ist eine Entwicklung von Sub-Disziplinen, welche sich aufgrund vielschichtiger und komplexer Zusammenhänge nicht komplett voneinander abgrenzen lassen. So verhält es sich auch bei Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik, die in der Praxis gemäß ÖNORM L 1100 (2016) dem Fachbereich Landschaftsbau zuzuordnen sind (*„Der Landschaftsbau umfasst vegetationstechnische Maßnahmen der Landschaftsgestaltung, Landschaftspflege und Landschaftssicherung [...] sowie bautechnische und ingenieurbiologische Maßnahmen unter Verwendung lebender und toter Baustoffe.“*) und sich in den letzten Jahren zu separaten, aber dennoch stark zusammenhängenden Bereichen der Wissenschaft entwickelt haben. Laut Klassifikationsdatenbank der Statistik Austria sind sowohl Ingenieurbiologie, als auch Vegetationstechnik den technischen Wissenschaften (Untergruppe: Bauwesen) zuzuordnen (Statistik Austria, 2017). Die deutsche Gesellschaft für Ingenieurbiologie definiert die Ingenieurbiologie als *„ein biologisch-technisches Fachgebiet, das sich mit dem Gebrauch von Pflanzen im Bauwesen befasst“*, und welches laut Florineth (2012) *„die Technik und Verwendung von Pflanzen für Sicherungsarbeiten an Fließgewässern, Hängen und Böschungen, Runsen und Gräben“* beschreibt. Die Vegetationstechnik erklärt *„die Technik und Verwendung von Pflanzen für Gestaltungsarbeiten, insbesondere die Anlage und Pflege von Grünflächen, Sportflächen und Wasserflächen (Florineth, 2012)“* und *„beschäftigt sich mit der Begrünung und Bepflanzung von Infrastruktur, Freiflächen und Bauwerken (Pitha & Scharf, 2011)“*.

Durch die vorliegende Dissertation wird der starke Zusammenhang dieser beiden Sub-Disziplinen einmal mehr deutlich gemacht. Eine eindeutige Zuordnung zu einem der Bereiche ist nicht möglich, sowohl für die Ingenieurbiologie als auch für die Vegetationstechnik sind die Ergebnisse der Untersuchungen zu den begrünten Spritzbetonwänden von großer Bedeutung. Gut vergleichen lassen sich die ‚Green Walls‘ mit den in der Praxis bereits etablierten Bauwerken „bewehrte Erde“ und „bepflanzte Gabione“ (Ingenieurbiologie) sowie der wandgebundenen Fassadenbegrünung (Vegetationstechnik). Bewehrte Erde wird primär zum Bau steiler Böschungen eingesetzt und kombiniert lebende Baustoffe (Gehölze) mit nicht lebenden Materialien (Substrate, Natur- und Kunststoff-Geotextilien, Drahtmatten, Bewehrungsbänder und -gitter; Zeh,

2007; Traninger-Smidt, 2012). Dabei werden in Geotextilien eingebettete Boden- und Substratschichten übereinander aufgebaut und durch Einlegen von Gehölzen bereits während des Aufbaus bzw. durch Hydrosaat im Anschluss an die Baumaßnahmen begrünt (Florineth, 2012). Ähnlich verhält es sich mit bepflanzten Gabionen, welche in der Ingenieurbiologie zur Ufersicherung und zur Abstützung labiler Böschungen eingesetzt werden (Zeh, 2007; Beikircher et al., 2010). Dafür werden vorgefertigte, verzinkte Drahtkörbe mit Steinen gefüllt, geschlossen und miteinander verbunden. Zwischen die einzelnen Elemente werden zur Bepflanzung Gehölze eingelegt, wodurch eine optimale Einpassung in die Landschaft angestrebt wird (Florineth, 2012). Gabionenwände wurden bereits erfolgreich als landschaftsgerechte, begrünte Lärmschutzsteilwände eingesetzt und haben im Vergleich zu konventionellen Schallschutzwänden zusätzlich den Vorteil eine bessere schalltechnische Wirkung aufzuweisen (Aschauer et al., 2007; Traninger-Smidt, 2012). Eine derartige Multifunktionalität ist charakteristisch für vegetationstechnische und ingenieurbiologische Bauweisen, welche neben ihrer primären Schutz- und Stützfunktion meist noch andere Funktionen (z.B. Einbettung in die Landschaft, Habitatfunktion, Dämpfung von klimatischen Extremen, etc. (Hacker & Johannsen, 2012)) erfüllen. Ähnlich verhält es sich auch bei den ‚Green Walls‘, die neben ihrer ursprünglichen Funktion der Wiederherstellung der Landschaftsästhetik auch eine Verbesserung des Mikroklimas bewirken und als zusätzlicher Lebensraum für Flora und Fauna dienen. Charakteristisch für wandgebundene Fassadenbegrünungen aus dem Bereich der Vegetationstechnik ist die Befestigung eines nicht mit gewachsenem Boden in Verbindung stehenden Vegetationsträgers, welcher unmittelbar an der Fassade montiert wird. Primäre Funktionen dieser Systeme sind der Schutz der Fassade, die Verbesserung des Mikroklimas, die Steigerung und Erhaltung der Biodiversität im Siedlungsgebiet sowie eine positive ästhetische Wirkung auf den Betrachter (Pitha et al., 2011).

Wie in Abbildung 3 dargestellt, vereinen die ‚Green Walls‘ einen Großteil der Funktionen der genannten Bauweisen und finden Anwendungsbereiche sowohl in der Ingenieurbiologie als auch in der Vegetationstechnik. In ländlichen Regionen bringen ‚Green Walls‘ einen Mehrwert insbesondere im Hinblick auf die Erhaltung und Wiederherstellung der Landschaftsästhetik in Form einer Begrünung von übersteilen Böschungen und Stützbauwerken. Auch im Siedlungsraum finden sich in ‚Green Walls‘ umzuwandelnde Infrastrukturen, welche zur Steigerung und Erhaltung der Biodiversität im Siedlungsraum beitragen können und zusätzliche Habitate für Flora und Fauna bieten.

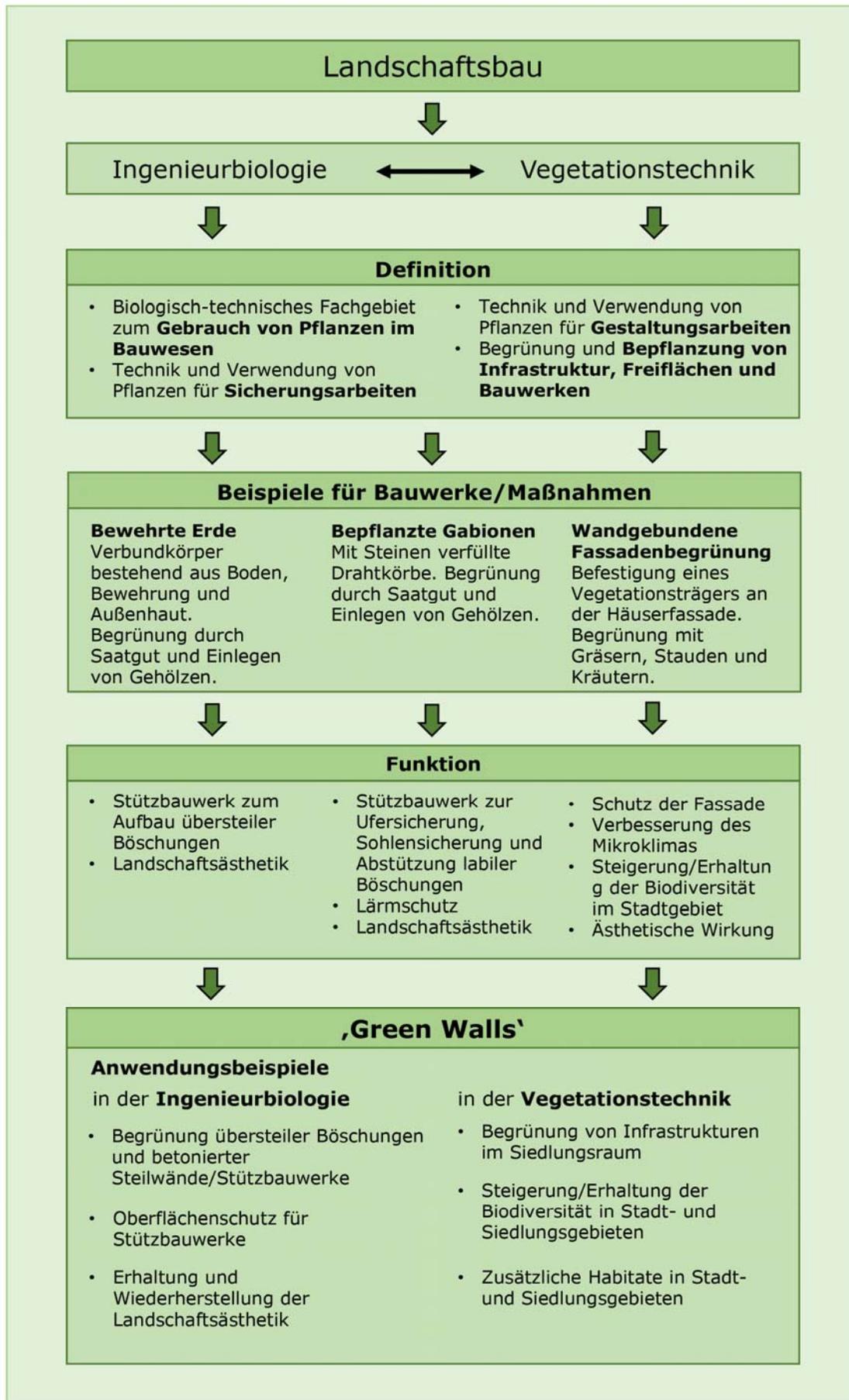


Abbildung 3: Verortung und Anwendungsbereiche der ‚Green Walls‘ im Landschaftsbau (Definition nach ÖNORM L 1100).

Zusammenfassend können folgenden Schlussfolgerungen getroffen werden:

Wissenschaftliche Aspekte

- Es konnte eine deutliche auf das verwendete Begrünungssystem zurückzuführende Verringerung von Temperaturschwankungen auf der Oberfläche der Spritzbetonwand festgestellt werden [2].
- Für eine Anwendung von ‚Green Walls‘ an Verkehrswegen – sowohl ländlich, als auch innerstädtisch – sprechen die nachgewiesene Verringerung von Reflexionen an versiegelten Oberflächen und dadurch reduzierte Blendeffekte [2].
- An der ‚Green Wall‘ konnten sowohl Trockenstress als zentraler Standortfaktor, als auch eine rasche physiologische Reaktion der Pflanzen auf fehlende Wasserversorgung nachgewiesen werden [5].
- Der Begrünung von Infrastrukturelementen in ländlichen Regionen wurde bisher nur wenig Beachtung geschenkt, in der Literatur konnten nur wenige Aufzeichnungen zur Begrünung vertikaler, nicht an gewachsenen Boden angebundener Steilwände gefunden werden. Es besteht daher ein genereller Forschungsbedarf zu vertikalen Begrünungsmaßnahmen außerhalb des Stadtbereiches [4].
- Spezieller Forschungsbedarf besteht hinsichtlich positiver Auswirkungen auf die Haltbarkeit begrünter Stützbauwerke [2], wobei auch allfällige Vor- und Nachteile hinsichtlich der Wartung begrünter und konventioneller Infrastrukturelemente genauer betrachtet werden sollten. Ebenfalls zum Gegenstand weiterer Forschung gemacht werden sollten die Themen Wasserhaushalt und Feuchtigkeitsverhalten [2], Materialauswahl und -Komposition [3], Zusammensetzung der Saatgutmischung [3], Biodiversität [3,4], Regenwasserretentionsfähigkeit [4] und Wiederherstellung von Lebensraumverbindungen [3,4].

Anwendungsorientierte Aspekte

- Im Hinblick auf eine nachhaltig zufriedenstellende Vegetationsentwicklung ist eine sorgfältige Auswahl der Systemkomponenten ausschlaggebend. Aufgrund des fehlenden Bodenanschlusses müssen ‚Green Walls‘ mit hochqualitativem Bodensubstrat verfüllt werden, um den Pflanzen eine ausreichende Nährstoffversorgung gewährleisten zu können. Zum Schutz der aufgespritzten Hydrosaat sollten weitmaschige Geotextilien verwendet werden, welche für die aufgehende Vegetation keine mechanische Barriere darstellen. In Anbetracht der starken Neigung der zu begrünenden Fläche erscheint es günstiger von natürlich abbaubaren Materialien abzusehen und dauerhaftere Kunststoffe zu verwenden. Diese übernehmen eine zusätzliche Schutzfunktion vor eventuell ausfallendem Material [3].
- Ein integriertes Bewässerungssystem wird zur Aufrechterhaltung einer vitalen Vegetationsdecke in niederschlagsarmen Regionen als empfehlenswert angesehen [5]. Diesbezüglich anzuführen ist, dass derzeit zu sensorgesteuerten und bedarfsangepassten Präzisionsbewässerungssystemen geforscht wird (z.B. im Rahmen der Projekte ProGreenCity, GREENskin), was eine zukünftig nachhaltigere und ressourcenschonendere Bewässerungstechnik erwarten lässt.

- Die Wiedereinbettung von Infrastrukturelementen ins Landschaftsbild und in natürliche Habitats ist durch den Einsatz von ‚Green Walls‘ sehr gut umsetzbar [1, 2,3].

7. Literaturverzeichnis der Rahmenschrift

Aschauer F., Wu W., Schön H., 2007. Wirtschaftliche Analysen über begrünte Lärmschutzsysteme. In: Ernst & Sohn, 1. Departmentkongress Bautechnik & Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien.

Begemann, W., Schiechl, H. M., 1986. Ingenieurbilogie: Handbuch zum naturnahen Wasser- und Erdbau. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin.

Begemann, W., Schiechl, H.M., 1994. Ingenieurbilogie. 2. Aufl., Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.

Beikircher, B., Florineth, F., Mayr, S., 2010. Restoration of rocky slopes based on planted gabions and use of drought-preconditioned woody species. Ecological Engineering 36, 421–426. doi - 10.1016/j.ecoleng.2009.11.008

Bergthaler, W., Sladek, B., 2014. Ausgleichsmaßnahmen und Ersatzleistungen: Überblick. In: Natur. Raum. Management. Das Fachjournal der Naturraummanagerinnen (Ausgabe 01/2015 – Nr. 19), Österreichische Bundesforste AG, Purkersdorf.

Blöchliger, H., 2002. Der Wert von Kulturlandschaften. In: Langer, G., Weiermair, K., Blöchliger, H., Corell, G., Hackl, F., Hofreither, M., Neunteufel, M.G., Pruckner, G., Rothenburger, W., Tschurtschenthaler, W., Witte, H., Wöhler, K., Zins, A., Tourismus und Landschaftsbild. Nutzen und Kosten der Landschaftspflege. Tagungsband zum Workshop „Methodik – Umwelt - Tourismus“. LAGO-Eigenverlag. Innsbruck, 131 – 144.

Bloemer, S., 2014. Vermeidung von Böschungsschäden durch Erosion im Erd- und Verkehrswegebau. Ein Leitfaden für Planer und ausführende Unternehmen. Straße + Autobahn 6, 427-436.

Brunold, C., Rügsegger, A., Brändle, R., 1996. Stress bei Pflanzen. Ökologie, Physiologie, Biochemie, Molekularbiologie. Haupt, Bern – Stuttgart - Wien.

EFIB – Europäische Föderation für Ingenieurbilogie, 2015. Europäische Richtlinie für Ingenieurbilogie.

BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2012. Kernaussagen des IPCC Sonderberichtes. Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel (SREX). <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/ipcc/kernaussagen-des-ipcc-sonderberichtes/> (zugegriffen am 28.09.2017)

Bray, S., Reid, D.M., 2002. The effect of salinity and CO₂ enrichment on the growth and anatomy of the second trifoliolate leaf of *Phaseolus vulgaris*. *Canadian Journal of Botany* 80, 349 – 359. doi - 10.1139/b02-018

Charoenkit, S., Yiemwattana, S., 2017. Role of specific plant characteristics on thermal and carbon sequestration properties of living walls in tropical climate. *Building and Environment* 115, 67 – 79. doi - 10.1016/j.buildenv.2017.01.017

Chaves, M.M., Pereira, J.S., Maroco, J., Rodrigues, M.L., Ricardo, C.P.P., Osório, M.L., Carvalho, I., Faria, T., Pinheiro, C., 2002. How plants cope with water stress in the field. *Photosynthesis and Growth. Annals of Botany* 89, 907 – 916. doi - 10.1093/aob/mcf/105

Cheng, C.Y., Cheung, K.K.S., Chu, L.M., 2010. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment* 45, 1779-1787. doi - 10.1016/j.buildenv.2010.02.005

Coder, K., 1996. Identified benefits of community trees and forests. Forest resources publication (FOR96-39). University of Georgia Cooperative Extension Service.

Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., Cabeza, L.F. 2017. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green façades. *Building and Environment* 111, 228 – 237. doi - doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 185 – 212. doi - 10.1051/agro:2008021

Florineth, F., 2012. Pflanzen statt Beton. Sichern und Gestalten mit Pflanzen. 2. Aufl., Patzer Verlag, Berlin - Hannover.

Fox, L.J., Grose, J.N., Appleton, B.L., Donohue, S.J., 2005. Evaluation of treated effluent as an irrigation source for landscape plants. *Journal of Environmental Horticulture* 23, 174 – 178.

Gao, G., Yuan, J., Han, R., Xin, G., Yang, Z., 2007. Characteristics of the optimum combination of synthetic soils by plant and soil properties used for rock slope restoration. *Ecological Engineering* 30, 303 – 311. doi - 10.1016/j.ecoleng.2007.01.011

Gidlöf-Gunnarsson, A., Öhrström, E., 2007. Noise and well-being in urban residential environments: The potential role of perceived availability to nearby green areas. *Landscape and Urban Planning* 83, 115–126. doi - 10.1016/j.landurbplan.2007.03.003

Graiss, W., Krautzer, B., Partl, C., 2008. The influence of recultivation techniques on erosion after restoration in high zones. *Interpraevent 2008, 11th Congress - Extended Abstracts*, 234-235.

Hacker, E., Johannsen, R., 2012. *Ingenieurbiologie*. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, Stuttgart.

Hancvencel, G., 2013. *Fassadengebundene Vertikalbegrünung. Untersuchungen des Mikroklimas Fassadengebundener Begrünungssysteme*. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien.

Hunter, A.M., Williams, N.S.G., Rayner, J.P., Aye, L., Hes, D., Livesley, S.J., 2014. Quantifying the thermal performance of green facades: A critical review. *Ecological Engineering* 63, 102-113. doi - 10.1016/j.ecoleng.2013.12.021

Isnard, S., Silk, W.K., 2009. Moving with climbing plants from Charles Darwin's time into the 21st century. *American Journal of Botany* 96, 1205-1221. doi - 10.3732/ajb.0900045

Kaspar, C., 1986. *Die Fremdenverkehrslehre im Grundriss*. Band 1 von St. Galler Beiträge zum Fremdenverkehr und zur Verkehrswirtschaft: Reihe Fremdenverkehr. 3. Aufl., Haupt. Bern.

Krauter, E., 2001. Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. In: Smoltczyk, U., *Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen*. 6. Aufl., Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin. 613 - 662.

Krautzer, B., 1999. Technik und Saatgutwahl bei der Begrünung von Forststraßen. Tagung für die Jägerschaft 1999. In: *Tagungsband, Äsungsflächen und Forststraßenbegrünung für Rotwild im Bergrevier*, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning. 13-20.

Larcher, W., 1994. *Ökophysiologie der Pflanzen. Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt*. 5. Aufl., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Langhammer, L., 1980. *Grundlagen der Pharmazeutischen Biologie: Begleittext zum Gegenstandskatalog GKP 1*, Springer, Heidelberg.

López-Aguilar, R., Orduño-Cruz, A., Lucero-Arce, A., Murillo-Amador, B., Troyo-Diéguez, E., 2003. Response to salinity of three grain legumes for potential cultivation in arid areas. *Soil Science & Plant Nutrition* 49, 329 - 336. doi - 10.1080/00380768.2003.10410017

Madre, F., Clergeau, P., Machon, N., Vergnes, A., 2015. Building biodiversity: Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages. *Global Ecology and Conservation* 3, 222 – 233.

Manso, M., Castro-Gomes, J., 2015. Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 863 – 871. doi – Green wall systems: A review of their characteristics.

Mengel, K., Kirkby, E.A., 2001. Principles of plant nutrition. 5. Aufl., Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Mitterboeck, M., Korjenic, A., 2017. Analysis for improving the passive cooling of building's surroundings through the creation of green spaces in the urban built-up area. *Energy and Buildings* 148, 166 – 181. doi – 10.1016/j.enbuild.2017.02.005

Niu, G., Rodriguez, D.S., Aguiniga, L., 2007. Growth and landscape performance of ten herbaceous species in response to saline water irrigation. *Journal of Environmental Horticulture* 25, 204–210.

Nover, L., Weiler, E.W., 2008. Allgemeine und molekulare Botanik. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.

Obriejetan, M., 2013. TB-Protect. Design und Entwicklung technisch-biologischer Erosionsschutzsysteme. Projektbericht, Universität für Bodenkultur Wien.

Obriejetan, M., 2015. Untersuchungen zur Effizienz und Gebrauchstauglichkeit von technisch-biologischen Erosionsschutzsystemen. Universität für Bodenkultur Wien, Dissertation.

ÖNORM L 1100, 2016. Landschaftsarchitektur und Landschaftsplanung. Definitionen und generelle Aufgabenbereiche. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Ottel , M., 2011. The Green Building Envelope. Vertical Greening. Habilitationsschrift, Technische Universität Delft.

Ottel , M., van Bohemen, H.D., Fraaij, A.L.A., 2010. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering* 36, 154–162. doi - 10.1016/j.ecoleng.2009.02.007

Peña-García, A., López, J.C., Grindlay, A.L., 2015. Decrease of energy demands of lighting installations in road tunnels based in the forestation of portal surroundings with climbing plants. *Tunnelling and Underground Space Technology* 46, 111-115. doi - 10.1016/j.tust.2014.11.010

Perini, K., Ottele, M., Giulini, S., Magliocco, A., Roccotiello, E., 2017. Quantification of fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system. *Ecological Engineering* 100, 268 – 276. doi - 10.1016/j.ecoleng.2016.12.032

Pitha, U., 2014. Blühende Stadtlandschaften. Vegetationstechnische Lösungen für lebenswerte und nachhaltige urbane Räume im Fokus von versickerungsfähigen Oberflächenbefestigungen und Bauwerksbegrünungen. Habilitationsschrift, Universität für Bodenkultur Wien.

Pitha, U., Scharf, B., 2011. Unveröffentlichte Definition des Fachbereichs ‚Vegetationstechnik‘ der Arbeitsgruppe Vegetationstechnik des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur Wien.

Pitha, U., Scharf, B., Enzi, V., Oberarzbacher, S., Hancvencl, G., Wenk, D., Steinbauer, G., Oberbichler, C., Lichtblau, A., Erker, G., Fricke, J., Haas, S., Preiss, J., 2011. Leitfaden Fassadenbegrünung. Magistrat der Stadt Wien.

Rehman, S., Khatoon, A., Iqbal, Z., Jamil, M., Ashraf, M., Harris, P.J.C., 2008. Prediction of salinity tolerance based on biological and chemical properties of *Acacia* seeds. In: *Tasks for Vegetation Sciences 44. Salinity and water stress. Improving crop efficiency.* Springer Science + Business Media B.V., Berlin.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schnellhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472 – 475. doi - 10.1038/461472a

RVS 04.01.12, 2015. Umweltmaßnahmen. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße- Schiene – Verkehr, Wien.

Safikhani, T., Abdullah, A.M., Ossen, D.R., Baharvand, M., 2014. A review of energy characteristic of vertical greenery systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, 450 – 462. doi - 10.1016/j.rser.2014.07.166

Scharf, B., Pitha, U., Trimmel, H., 2013. Resilience of Cityscapes. In: 50th IFLA World Congress, *Shard Wisdom in an Age of Change*, Auckland.

Scheffer, F., Schachtschabel, P., 2009. Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl., Springer Verlag, Heidelberg.

Schindler, S., Zulka, K.P., Sonderegger, G., Oberleitner, I., Peterseil, J., Essl, F., Eilmauer, T., Adam, M., Stejskal-Tiefenbach, M., 2016. Entwicklungen zur biologischen Vielfalt in Österreich. Schutz, Status, Gefährdung. Umweltbundesamt, Wien.

Smith, W.K., Hollinger, D.Y., 1991. Measuring stomatal behavior. In: Lassoie, J. P., Hinckley, T.M., Techniques and approaches in forest tree ecophysiology, CRC Press, United States. 141 – 174

Shabala, S., 2012. Plant stress physiology. Cabi, Oxfordshire - Cambridge.

Statistik Austria, 2017. Klassifikationsdatenbank – Österreichische Systematik der Wissenschaftszweige (ÖFOS) 2012. Version 4.2.1.
http://www.statistik.at/KDBWeb/kdb_KindelementeAnzeigen.do?KDBtoken=null&sprache=1DE&elementID=9911117 (Zugriff am 07.11.2017)

Stec, W.J., van Paassen, A.H.C., Maziarz, A., 2005. Modelling the double skin façade with plants. Energy and Buildings 37, 419 – 427. doi - 10.1016/j.enbuild.2004.08.008

Sternberg, T., Viles, H., Cathersides, A., Edwards, M., 2010. Dust particulate absorption by ivy (*Hedera helix* L) on historic walls in urban environments. Science of the Total Environment 409, 162 – 168. doi - 10.1016/j.scitotenv.2010.09.022

Stöcklin, J., 2007. Die Pflanze. Moderne Konzepte der Biologie. Bundesamt für Bauten und Logistik BBL, Bern.

Thiele, M., 2015. Klimaschutzpotenzialanalyse von Dach-, Fassaden- und Straßenbaumbegrünung. Ein Beitrag zum Klimaschutzmanagement Klausenerplatz, Berlin Charlottenburg. Masterarbeit, Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH).

Traninger-Smidt, R., 2012. Untersuchung der Wirksamkeit von bepflanzten Lärmschutzdämmen in Seebarn bei Krems/NÖ. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien.

Ulrich, R.S., Simons, R.F., Losito, B.D., Fiorito, E., Miles, M.A., Zelson, M., 1991. Stress recovery during exposure to natural and urban environments. Journal of Environmental Psychology 1, 201–230. doi - 10.1016/S0272-4944(05)80184-7

Umweltbundesamt, 2016. Elfter Umweltkontrollbericht. Umweltsituation in Österreich. Umweltbundesamt, Wien.

Umweltbundesamt, 2017. Bodenverbrauch gefährdet Lebensgrundlage der nächsten Generationen.http://www.umweltbundesamt.at/aktuell/presse/lastnews/news2017/news_170612/ (Zugriff am 11.07.2017)

Victorero, F., Vera, S., Bustamante, W., Tori, F., Bonilla, C., Gironás, J., Rojas, V., 2015. Experimental study of the thermal performance of living walls under semiarid climatic conditions. Building and Environment 46, 293-397. doi - 10.1016/j.egypro.2015.12.160

Wang, Z., Wu, L., Liu, T., 2009. Revegetation of steep rocky slopes: Planting climbing vegetation species in artificially drilled holes. *Ecological Engineering* 35, 1079 – 1084. doi - 10.1016/j.ecoleng.2009.03.021

Weber, S., 2013. Betoninstandsetzung. Baustoff – Schadensfeststellung – Instandsetzung. 2. Aufl., Springer Vieweg, Stuttgart.

Wolter, A., 2015. Untersuchungen zu einem mit *Hedera helix* ‘Woerner’ begrüntem, hydroponischen Nutzwandssystem: Evaluierung ertrags- und pflanzenphysiologischer Parameter unter Berücksichtigung der klimatischen Einflüsse zur Modellierung eines intelligenten Wasser- und Nährlösungsmanagements. Masterarbeit Technische Universität Bergakademie, Freiberg.

Wong, N.H., Kwan Tan, A.Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P.Y., Chand, D., Chiang, K., Wong, N.C., 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment* 45, 663–672. doi - 10.1016/j.buildenv.2009.08.005

Wu, L., Guo, X., Harivandi, A., 2001. Salt tolerance and salt accumulation of landscape plants irrigated by sprinkler and drip irrigation systems. *Journal of Plant Nutrition* 24, 1473–1490. doi – 10.1081/PLN-100106996

Zeh, H., 2007. Ingenieurbiologie. Handbuch Bautypen. Europäische Föderation für Ingenieurbiologie. Verein für Ingenieurbiologie. Vdf Hochschulverlag AG ETH Zürich.

Zuo, J., Zhao, Z., 2014. Green building research–current status and future agenda: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30, 271-281. doi - 10.1016/j.rser.2013.10.021

Projekte

TB-Protect: Entwicklung technisch-biologischer Erosionsschutzsysteme, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Laufzeit: 01.10.2010-31.12.2013, gefördert durch FFG.

ProGreenCity: mass-market suitable innovative façade-construction integrated living wall systems, Laufzeit: 01.10.2016-30.09.2019, gefördert durch FFG.

GREENskin: Untersuchung des Potentials von Gründachern und Grünfassaden zur Anpassung städtischer Räume an den Klimawandel und an zukünftige Herausforderungen, Laufzeit: 15.09.2011-30.04.2014, gefördert durch FFG.