

Bauwerksbegrünung als Maßnahme zur Gesundheitsförderung

Bindung von Luftschadstoffen durch
wandgebundene Fassadenbegrünungen

vom Fachbereich Architektur der Technischen Universität Darmstadt genehmigte Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

**Dissertation
von Kilian van Lier**

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Dettmar
Zweitgutachterin: Prof. Dr.-Ing. Nicole Pfoser

Darmstadt 2024

van Lier, Kilian: Bauwerksbegrünung als Maßnahme zur
Gesundheitsförderung - Bindung von Luftschadstoffen durch
wandgebundene Begrünungen, Technische Universität Darmstadt,
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2024
Tag der mündlichen Prüfung: 27.06.2024

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

Haftungsausschluss

Der Ersteller der Dissertationsschrift übernimmt keinerlei Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit oder Qualität der bereitgestellten Informationen. Die bildlichen, grafischen und textlichen Inhalte vorliegender Dissertationsschrift wurden mit Sorgfalt und bestem Wissen in möglicher Aktualität aus eigener Forschung und fremden Quellen zusammengestellt. Haftungsansprüche gegen den Ersteller, die sich auf Schäden materieller oder ideeller Art beziehen, die durch die Nutzung oder Nichtnutzung der dargebotenen Informationen bzw. durch die Nutzung fehlerhafter und unvollständiger Informationen verursacht wurden, sind grundsätzlich ausgeschlossen.

Verfassserklärung

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Dissertation „Bauwerksbegrünung als Maßnahme zur Gesundheitsförderung – Bindung von Luftschadstoffen durch wandgebundene Fassadenbegrünungen“, soweit nicht anders gekennzeichnet, das Ergebnis meiner eigenständigen Arbeit ist, und von mir an keiner anderen Hochschule und zu keinem anderen Zeitpunkt vorgelegt wurde.

Ort

Datum

Unterschrift

„Der Vorgang der Entdeckung besteht nicht darin, Neuland zu finden, sondern das Vorhandene mit anderen Augen zu sehen.“

Marcel Proust

Vorwort

Die vorliegende Dissertation behandelt die Bauweise der wandgebundenen Begrünung und die Bindung von Luftschadstoffen durch diese Form der Begrünung. Zentraler Ausgangspunkt ist die Gesundheit im urbanen Raum und die Gesundheitsförderung bezogen auf die Luftreinhaltung durch Fassadenbegrünungen. Mit der empirischen Untersuchung von Praxisprojekten soll der Versuch unternommen werden, einen Nachweis zum Einfluss von Bauwerksbegrünungen, im Speziellen der wandgebundenen Fassadenbegrünungen, zur Luftreinhaltung und Gesundheitsförderung zu führen.

Die vorliegende Dissertation entstand über einen Zeitraum von fünf Jahren neben meinen beruflichen Tätigkeiten, zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter und anschließend in der Forschung und Entwicklung, bei einem Systemanbieter für Fassadenbegrünungen. Die Thematik der Bauwerksbegrünung gewann im Laufe meines Studiums und meiner beruflichen Tätigkeiten zunehmend an Bedeutung. Die praktische Tätigkeit veranschaulichte mir zum einen den großen Entwicklungsbedarf in der Zuverlässigkeit und Anwendungsbreite der wandgebundenen Begrünungsbauweisen. Zum anderen wurde mir in der Beratung zu diesen Systemen die Notwendigkeit klarer Argumentationsgrundlagen hinsichtlich der Leistungen gegenüber Architekten, Bauherren und ausführenden Unternehmen bewusst. Die Teilleistung zur praktischen Forschung und Erarbeitung des Themenfeldes „Luftreinhaltung durch Fassadenbegrünungen“ beruht auf meiner Überzeugung, mit Pflanzen und technisch ausgereiften, grünen Lösungen einen wertvollen Beitrag zur Entwicklung von lebenswerten, gesunden Städten leisten zu können.

In der vorliegenden Dissertation wurden im Wesentlichen zwei Praxisprojekte in Essen und Darmstadt messtechnisch analysiert. Der Umfang und die Durchführung dieser Messungen hätten ohne entsprechende Förderungen nicht durchgeführt werden können.

Mein großer Dank gilt daher dem Umweltamt der *Stadt Darmstadt* für die großzügige finanzielle Unterstützung der messtechnischen Analyse im Citytunnel Darmstadt sowie für die ständige Bereitschaft zur Unterstützung in organisatorischen Fragen und bei Durchführungen rund um den Citytunnel. Ein persönlicher Dank gilt an dieser Stelle Herrn Lion Roßbach für die schnellen und unkomplizierten Abstimmungen. Ein weiterer besonderer Dank gilt der *Emscher Genossenschaft*, die dieses Vorhaben über das Förderprogramm „Klimaresiliente Region mit internationaler Strahlkraft“ unterstützt hat. Weiterhin gilt mein Dank der Forschungsge-

sellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), besonders Herrn Rohrbach und Herrn von der Osten für die finanzielle Unterstützung und die Möglichkeit zur Umsetzung der umfangreichen Untersuchungen.

Mein tiefster Dank gilt Frau Prof. Dr. Nicole Pfoser und Herrn Prof. Dr. Jörg Dettmar für ihre fachliche Betreuung meiner Arbeit und die persönliche Unterstützung während der Promotionszeit. Zusätzlich danke ich Herrn Prof. Dr. Felix Möhring, der mich in der Anfangszeit der Promotion persönlich sehr unterstützt hat.

Ein weiterer Dank gilt Frau Dr. Olga Gorbachevskaya, für den fachlichen Austausch und die Möglichkeit zur Leihgabe einer Messkammer für die Laborversuche. Zudem danke ich dem Team von *Hawa Dawa* für die Bereitstellung der IoT-Messgeräte zur Messung von Echtzeit-Umweltdaten. Mit diesen Geräten wurde die Langzeituntersuchung der Vergleichsmessungen ermöglicht.

Frau Dr. Juanita Rausch und dem Team von *Particle Vision* danke ich für die Bereitstellung von Sigma-2-Passivsammlern sowie die gemeinsam durchgeführten Staubklassifizierungen und -untersuchungen in ihrem Labor in der Schweiz.

Des Weiteren danke ich Philipp Neher, für den fachlichen Austausch unter Promovierenden im angrenzenden Themenfeld der Bauwerksbegrünung und Luftschadstoffe.

Danken möchte ich zudem dem Team der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe für die Bereitstellung von Räumlichkeiten zur Durchführung von Laboruntersuchungen.

Ein weiterer Dank gilt Herrn Telöken für die Unterstützung bei den Untersuchungen an der Gladbecker Straße in Essen und die Zugänglichkeit zur Gebäudetechnik.

Ein großer Dank gilt dem gesamten Team von *Vertiko*, das mich während meiner Tätigkeit mit seinen Erfahrungen und Kenntnissen unterstützt hat. Zudem bedanke ich mich für die Möglichkeit zur Durchführung der Dissertation neben meiner beruflichen Tätigkeit. Ein besonderer Dank gilt Kilian Lingen für den fachlichen und persönlichen Austausch während der Erstellung dieser Arbeit.

Nicht zuletzt gilt auch meinen Eltern, meiner gesamten Familie und meinen Freunden ein großes Dankeschön für die uneingeschränkte mentale Unterstützung während der Bearbeitungszeit. Auch möchte ich euch um Nachsicht für die zeitliche Vernachlässigung während der vergangenen Jahre bitten. Eure Geduld war mir in der vergangenen Zeit eine große Hilfe.

Zu guter Letzt gilt mein Dank meiner Partnerin Lia, die mich während dieser fordernden Zeit mental und persönlich sehr unterstützt hat.

Zusammenfassung

Die Gesundheit in städtischen Gebieten ist aufgrund steigender negativer Umwelteinflüsse gefährdet. Die Folgen des Klimawandels und die Luftverschmutzung sind dabei nur zwei Themenkomplexe, die einen Einfluss auf die menschliche Gesundheit im urbanen Raum ausüben. Nach der WHO sind neun von zehn Menschen weltweit verschmutzter Atemluft ausgesetzt. Luftschadstoffe stellen insbesondere für Kinder und ältere Menschen ein erhöhtes gesundheitliches Risiko dar. Neben den global zunehmenden Urbanisierungsprozessen kommt in Deutschland, bedingt durch den demografischen Wandel, die potenziell stärker gefährdete Bevölkerungsgruppe älteren Menschen hinzu.

Damit stehen die Städte vor großen Herausforderungen, um die Lebensqualität zu halten, Maßnahmen zur Gesundheitsförderung einzuleiten und Anpassungen an den Klimawandel vorzunehmen.

Die Gebäudebegrünung wird als ein Baustein betrachtet, um den negativen Folgen als sekundäre Maßnahme entgegenzuwirken. Sie übt verschiedene Einflüsse auf das Gebäude und den umgebenden Stadtraum aus und kann zudem platzsparend eingesetzt werden.

Diese Promotion untersucht speziell die Bindung von Luftschadstoffen durch wandgebundene Fassadenbegrünung, um Erkenntnisse über ihre Wirksamkeit im Stadtraum zu gewinnen.

Nach einer umfangreichen Literaturrecherche werden Praxisversuche zur Bindung von Luftschadstoffen durch wandgebundene Begrünungen messtechnisch begleitet. Der Fokus der Betrachtung liegt auf der Bindung von partikulären Grob- und Feinstäuben. Hierbei werden unterschiedliche Methoden, aktive und passive Messverfahren zur Beurteilung der Stäube in der Umgebungsluft und auf Oberflächen angewendet.

Damit soll eine Annäherung an die Leistungsfähigkeit zur Bindung von Luftschadstoffen durch Pflanzen in wandgebundenen Begrünungen erfolgen und Ansätze zur Betrachtung der Gesamthematik „Feinstaub – Pflanze – Gesundheit“ geschaffen werden.

Durch die Auswertung der Messergebnisse wurden signifikante Effekte bei der Reduzierung der Luftschadstoffe Stickstoffdioxid und Feinstaub in der unmittelbaren Umgebung der Begrünung festgestellt.

Durch die bis zu achtfache Oberflächenvergrößerung bei Stauden und die 20- bis 30-fache Oberflächenvergrößerung bei Moosen bieten diese Pflanzen eine vergleichsweise große Fläche zur Abscheidung von luftgetragener Feinstaub. Zudem wird die lokale Luftfeuchtigkeit erhöht, was ebenfalls zur Bindung von Feinstaub in der Luft beiträgt.

Wandgebundene Begrünungssysteme können daher zur Verringerung der gesundheitlichen Belastungen in städtischen Gebieten beitragen und somit die städtische Luftqualität verbessern.

Abstract

Health in urban areas is at risk due to increasing negative environmental influences. The consequences of climate change and air pollution are just two of the issues that have an impact on human health in urban areas.

According to the World Health Organization, nine out of ten people worldwide are exposed to polluted air. Air pollutants pose an increased health risk for children and older people in particular. In addition to the globally increasing urbanization processes, a potentially more vulnerable population group is also being added in Germany due to demographic change.

This means that cities are facing major challenges in terms of maintaining quality of life, introducing measures to promote health and adapting to climate change.

The greening of buildings is seen as a building block to counteract the negative consequences as a secondary measure. It exerts various influences on the building and the surrounding urban space and can also be used to save space.

This doctorate specifically investigates the binding of air pollutants by wall-bound façade greening in order to gain insights into its effectiveness in the urban space.

Following extensive literature research, practical trials on the binding of air pollutants by wall-mounted greenery are accompanied by measurements. The focus is on the binding of particulate coarse and fine dust. Different methods, active and passive measurement procedures are used to assess the dusts in the ambient air and on surfaces.

This is intended to provide an approximation of the capacity for binding air pollutants by plants in wall-mounted greenery and to create approaches for considering the overall topic of „particulate matter - plant - health“.

By analysing the measurement results, significant effects in the reduction of the air pollutants nitrogen dioxide and particulate matter in the immediate vicinity of the greening were identified. With up to eight times the surface area of shrubs and 20 to 30 times the surface area of mosses, these plants offer a comparatively large surface area for the separation of airborne particulate matter. In addition, the local humidity is increased, which also contributes to the binding of particulate matter in the air. Wall-mounted greening systems can therefore help to reduce health pollution in urban areas and thus improve urban air quality.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	16
1.1	Anlass der Arbeit	18
1.2	Zielsetzung der Arbeit	20
1.3	Abgrenzung	22
1.4	Aufbau und Methodik der Arbeit	23
2	Sachstand	26
2.1	Einführung in die Gebäudebegrünung	26
2.1.1	Bestandteile wandgebundener Fassaden begrünungssysteme	28
2.1.1.1	Befestigung und Unterkonstruktion	29
2.1.1.2	Technische Versorgung	29
2.1.1.3	Be- und Entwässerungsleitungen	30
2.1.1.4	Trägermaterial für die Pflanzen	31
2.1.1.5	Substrate	32
2.1.1.6	Angepasste Pflanzenauswahl	33
2.1.2	Verschiedene Bauweisen wandgebundener Begrünung	34
2.1.2.1	Regalsysteme	34
2.1.2.2	Modulare Systeme	35
2.1.2.3	Flächige Systeme	35
2.1.3	Systematisierung und Gegenüberstellung der Unterschiede	36
2.2	Potenziale und Leistungsfaktoren von Fassadenbegrünungen	38
2.2.1	Potenziale zur Gebäudeoptimierung	38
2.2.2	Potenziale zur Umfeldverbesserung	39
2.3	Umwelteinflüsse im urbanen Raum und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	40
2.3.1	Der ideale Gesundheitszustand eines Menschen	41
2.3.2	Einflussfaktor Temperatur	42
2.3.3	Einflussfaktor Strahlung	43
2.3.4	Einflussfaktor Niederschlag	43
2.3.5	Einflussfaktor Lärm	43
2.3.6	Einflussfaktor Luftschadstoffe	44
2.3.7	Wie sieht ein für den Menschen gesunder Stadtzustand aus?	47
2.4	Luftschadstoffbelastungen im urbanen Raum	48
2.4.1	Bestandteile von Luft und städtischer Lufthaushalt	48
2.4.2	Feinstaubbelastung und Deposition im urbanen Raum	50

2.4.3	Weitere Luftschadstoffbelastungen im urbanen Raum	52
2.4.4	Luftreinhaltung und Grenzwerte zu Feinstaub in Deutschland	53
2.4.5	Debatten um die Luftschadstoffproblematik	53
2.5	Feinstaubbindung durch Vegetation	54
2.5.1	Feinstaubbindungsvermögen von Pflanzen an der Oberfläche	54
2.5.2	Aufnahme von Staubfraktionen	57
2.5.3	Unterscheidung von verschiedenen Vegetationselementen	58
2.5.3.1	Stadtbäume	59
2.5.3.2	Dachbegrünung	60
2.5.3.3	Fassadenbegrünung	61
2.6	Zusammenfassung	62
3	Methodik	64
3.1	Methodik zur Untersuchung von Umgebungsparametern	64
3.1.1	Messmethoden zur Ermittlung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit	64
3.1.2	Messmethoden zur Ermittlung von Stickoxidkonzentrationen in der Umgebungsluft	65
3.1.3	Messmethoden zur Ermittlung von Staubkonzentrationen in der Umgebungsluft	67
3.1.3.1	Aktive Verfahren	67
3.1.3.2	Passive Verfahren	69
3.2	Methodik zur Untersuchung von Stäuben auf Oberflächen	70
3.2.1	Quantitative Bestimmung von Stäuben auf Oberflächen	70
3.2.2	Qualitative Bestimmung von Stäuben auf Oberflächen	72
3.3	Methodik zur Untersuchung der Vitalität ausgewählter Vegetationsträger	72
3.3.1	Vitalitätsbetrachtung von Vegetationsträgern mit Stauden	73
3.3.2	Vitalitätsbetrachtung von Vegetationsträgern mit Moosen	74
3.4	Modellversuch zur Feinstaubbindung von wandgebundenen Fassadenbegrünungssystemen	75
3.5	Zusammenfassung	76

4	Beschreibung der Versuchseinrichtungen	78
4.1	Beschreibung der Messtechnik und Versuchsgeräte	78
4.1.1	Hobo Datenlogger zur Ermittlung von Temperatur und relativer Feuchte	78
4.1.2	Sigma-2-Sammler zur passiven Probennahme mit unterschiedlichen Akzeptor-oberflächen	79
4.1.3	Hawa Dawa Sentience Messgeräte zur Messung von Echtzeit-Umweltdaten	79
4.1.4	Kamerasysteme zur Wachstumsüberwachung von Stauden	80
4.1.5	Technische Konstruktion zur Wachstumsmessung bei Moosen nach der Cranked-Wires-Methode	81
4.1.6	Modellversuch zur Feinstaubbindung in einer Messzelle	81
4.2	Beschreibung der ausgewählten Versuchsflächen	82
4.2.1	Wandgebundene Begrünung Citytunnel Darmstadt	83
4.2.1.1	Räumliche Einordnung	83
4.2.1.2	Konstruktion und Technik	84
4.2.1.3	Erläuterung der Begrünungsbauweisen und Bepflanzung	85
4.2.1.4	Feinstaubproblematik am Standort	86
4.2.1.5	Anordnung der Messgeräte	88
4.2.2	Wandgebundene Begrünung Wohnbebauung Gladbecker Straße Essen	91
4.2.2.1	Räumliche Einordnung	91
4.2.2.2	Konstruktion und Technik	92
4.2.2.3	Erläuterung der Bepflanzung	93
4.2.2.4	Feinstaubproblematik am Standort	94
4.2.2.5	Anordnung der Messgeräte	95
4.2.3	Versuchsaufbau Laborversuch Bestäubung	97
4.2.3.1	Konstruktion, Technik und Prüfgegenstände	97
4.2.3.2	Anordnung der Messgeräte	98
4.3	Zusammenfassung	98
5	Versuchsdurchführung	100
5.1	Untersuchung von Parametern in der Umgebungsluft	100
5.2	Untersuchung der Staubkonzentrationen auf Oberflächen	101
5.2.1	Quantitative Untersuchung auf Glasoberflächen	102

5.2.2	Qualitative Untersuchung auf Kohlenstoff- oberflächen (C-Pad)	102
5.3	Untersuchung der Vitalität der ausgewählten Vegetationssysteme und Pflanzen	104
5.3.1	Vitalitätsuntersuchung Stauden	104
5.3.2	Vitalitätsuntersuchung Moosmatten	104
5.4	Versuchsdurchführung Laborversuch Bestäubung	105
5.5	Zusammenfassung	106
6	Ergebnisbetrachtung	108
6.1	Messung von Parametern in der Umgebungsluft	108
6.1.1	Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit	108
6.1.1.1	Standort Darmstadt	109
6.1.1.2	Standort Essen	110
6.1.2	Messung der Stickstoffdioxidkonzentration in der Umgebungsluft	112
6.1.2.1	Standort Darmstadt	112
6.1.2.2	Standort Essen	113
6.1.3	Messung der Staubkonzentration in der Umgebungsluft	114
6.1.3.1	Standort Darmstadt	114
6.1.3.2	Standort Essen	116
6.2	Messung der Staubkonzentration auf Oberflächen	118
6.2.1	Quantitative Untersuchung auf Glasoberflächen	118
6.2.1.1	Standort Darmstadt	118
6.2.1.2	Standort Essen	120
6.2.2	Qualitative Untersuchung auf Kohlenstoff- oberflächen (C-Pad) und Bor-Substraten	121
6.2.2.1	Standort Darmstadt	122
6.2.2.2	Standort Essen	126
6.2.3	Betrachtung von Blattoberflächen in gewaschenem und ungewaschenem Zustand	128
6.3	Vitalitätsmessung der ausgewählten Vegetationssysteme	131
6.3.1	Vitalitätsuntersuchung der flächigen und modularen Bauweise mit Stauden	131
6.3.2	Vitalitätsuntersuchung der Moosflächen	139
6.4	Ergebnisse Bestäubung von wandgebundenen Vegetationssystemen	145
6.5	Zusammenfassung	146

7	Diskussion	148
7.1	Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit	148
7.2	Messung der Stickstoffdioxidkonzentration in der Umgebungsluft	149
7.3	Messung der Staubkonzentration in der Umgebungsluft	151
7.4	Messung der Staubkonzentration auf Oberflächen	154
7.5	Messung der Staubkonzentration in der Messzelle	156
7.6	Vitalitätsmessung der ausgewählten Vegetationssysteme	157
8	Zusammenfassung	160
8.1	Schlussfolgerung	160
8.2	Weiterführende Anregungen	162
9	Anhang	164
9.1	Glossar	164
9.2	Abkürzungsverzeichnis	165
9.3	Literatur- und Internetverzeichnis	166
9.4	Abbildungsverzeichnis	176
9.5	Tabellenverzeichnis	183
9.6	Anlagen	184

Einleitung

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Gesundheitsförderung im urbanen Raum, speziell der Bindung von Luftschadstoffen durch wandgebundene Fassadenbegrünungen. Begrünte Gebäude haben eine Vielzahl positiver Effekte auf den urbanen Raum. Viele dieser Effekte wurden wissenschaftlich noch nicht umfassend untersucht, sodass zu den Leistungsfaktoren urbaner Begrünungen einige Parameter nicht eindeutig erschlossen sind. Einzelne Untersuchungen beschäftigten sich bereits mit der Wertigkeit von Gehölzen und Kletterpflanzen zur Luftverbesserung. Jedoch können diese Ergebnisse nicht ohne weiteres auf Begrünungsbauweisen am Gebäude übertragen werden. Hinsichtlich der Potenziale von wandgebundenen Begrünungen fehlen daher noch Daten zur Einschätzung der Wirksamkeit.

Diese Arbeit untersucht auf Basis einer umfangreichen thematischen Aufbereitung der Themenfelder „wandgebundene Begrünungen“, „Gesundheit im urbanen Raum“, „Luftschadstoffe“ und „Bindung der Luftschadstoffe durch Begrünungen“ sowie verschiedener Labor- und Praxisuntersuchungen den Einfluss wandgebundener Begrünungen auf Luftschadstoffe, insbesondere Feinstaub.

Fassadenbegrünungen als Chance

Die größten Effekte in der Gesundheitsförderung und Luftreinhaltung werden mit sogenannten primären Maßnahmen erzielt. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, die Entstehung der Emissionen zu reduzieren. Da die Reduzierung von verkehrsbedingten Emissionen nicht immer möglich ist, können sekundäre Maßnahmen zur Filterung der freigesetzten Luftschadstoffe eingesetzt werden. Eine Möglichkeit, um platzsparend Feinstäube und andere Luftschadstoffe aus der Luft zu binden, könnten daher Bauwerksbegrünungen, insbesondere Fassadenbegrünungen, sein. In der räumlichen Nähe zu Emissionsquellen wird ihnen eine besonders hohe Wirksamkeit zur Luftfilterung zugesprochen. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen haben den positiven Einfluss von urbanen Grünstrukturen auf die Luftqualität bestätigt [Lin et al. 2016, S. 372ff.].



Abbildung 1: Versuchswand wandgebundene Begrünung im Citytunnel in Darmstadt.

1.1 Anlass der Arbeit

Die Notwendigkeit, unsere Städte lebenswert zu gestalten und gesundheitsförderlich anzupassen, findet heute eine breite Zustimmung in der Bevölkerung. Die Bauwerksbegrünung und die Umgestaltung der äußeren Gebäudehülle haben dabei zahlreiche positive Effekte auf das Gebäude, den umliegenden Raum und die menschliche Gesundheit. Die Städte stehen heute vor großen Herausforderungen, um die Lebensqualität bei steigender Bevölkerungszahl zu halten, Anpassungen an den Klimawandel vorzunehmen und gleichzeitig Maßnahmen zur Gesundheitsförderung und zur Reduzierung von Luftschadstoffen einzuleiten.

Steigende Urbanisierung

Die Bedeutung der Luftreinhaltung in Städten nimmt mit steigender Urbanisierung zu. Aktuellen Zahlen zufolge, leben etwa 55 % der Weltbevölkerung in Städten. Einige Prognosen beschreiben ein Wachstum von bis zu 70 % bis zum Jahr 2050 [Statista 2022, o.S.]. Mit einer steigenden Anzahl von Menschen, die in dichten urbanen Räumen leben, gewinnen Faktoren der urbanen Gesundheit und Luftreinhaltung an Bedeutung. Durch das Bevölkerungswachstum in den Städten steigen gleichzeitig das Interesse und die Nachfrage zur Umnutzung bestehender Grün- und Freiflächen. Die Bedeutung dieser Freiflächen als Kaltluftschneisen und damit zum Luftaustausch sowie zur Naherholung ist dabei erheblich. Neben dem fortlaufenden Urbanisierungsprozess nimmt auch der Prozess des demografischen Wandels zu. Damit steigt die Anzahl derer, die potenziell anfälliger auf eine schlechte Luftqualität reagieren.

Urbanes Klima

Unsere Städte sind aufgrund klimatischer Veränderungen und der Verwendung von wärmespeichernden Materialien in Architektur und Infrastruktur zunehmend größerer Hitze ausgesetzt. Seit Beginn der Wetteraufzeichnun-

gen waren die zehn wärmsten Jahre alle nach dem Jahr 1998 [DWD 2019, o.S.]. Im Mittel ist die Temperatur in Deutschland zwischen 1881 und 2021 um 1,6 °C angestiegen. In städtischen Gebieten kann die Temperatur im Vergleich zum Umland um bis zu 10 °C höher liegen [DWD 2024, o.S.]. Durch eintretende Hitzeinseleffekte (engl. Urban Heat Island) und zunehmend trockenere Luftmassen verstärken sich die Auswirkungen von Luftschadstoffen und Hitze auf die menschliche Gesundheit.

Feinstaub in der Stadt

Insbesondere bei trockenen Luftmassen gelangen partikuläre Luftschadstoffe wie Feinstaub tiefer in die Atemwege. Zunehmende Urbanisierung bedeutet auch eine Zunahme von Bewegungen und Verkehrsströmen im urbanen Raum. Wengleich in einigen Städten der Umstieg auf klimafreundliche Verkehrsmittel wie das Fahrrad oder ÖPNV zunimmt, stieg die Zahl der Autos im bundesweiten Durchschnitt ebenfalls kontinuierlich. Ein Großteil der städtischen Feinstaubemissionen stammt mit etwa 40 % aus dem Autoverkehr. Auch wenn die Konzentrationen vieler Luftschadstoffe aufgrund von Abgasreinigungsverfahren und Umweltnormen landesweit zurückgegangen ist, können lokal auftretende hohe Konzentrationen zu gesundheitlichen Belastungen führen [Abhijith et al. 2017, S. 71ff.] Eine Studie zur Einschätzung der Gesundheitsgefährdung und Grenzwertverschiebung für Luftschadstoffe hat ergeben, dass 91 % der befragten Pneumologen für eine Herabsetzung der Luftbelastung zum Schutz der Gesamtbevölkerung plädiert [Tomik 2019, o.S.]. Verschiedene Luftschadstoffe haben auch unterschiedliche Auswirkungen auf den menschlichen Körper. Feinstäube können in verschiedenen Größenfraktionen, Expositionen und Konzentrationen zu unterschiedlichen Erkrankungen führen. Besonders gefährdet sind dabei die Atemwege und das Herz-Kreislauf-System.

Potenzialflächen an der Fassade

Während die Dachbegrünung eine seit vielen Jahrzehnten anerkannte Form der Bauwerksbegrünung ist, gewinnt die Fassadenbegrünung erst in den vergangenen Jahren signifikant an Bedeutung. Im Jahr 2022 wurden laut dem BuGG-Marktreport etwa 146.000 m² Fassadenfläche mit bodengebundenen Fassadenbegrünungen umgesetzt. Die wandgebundenen Bauweisen nehmen dabei eine Flächengröße von etwa 30.200 m² ein. Damit ist die umgesetzte Fläche an wandgebundenen Systemen mehr als doppelt so hoch wie noch im Vorjahr mit 13.300 m² umgesetzter Fläche. Ein Grund für den Zuwachs liegt vor allem in den Richtlinien und Festsetzungen der Bebauungspläne. Zudem stieg die Anzahl an Förderprogrammen zur Umsetzung von Fassadenbegrünung in Städten deutlich. Ein weiterer Grund für den Anstieg ist die zunehmende Präsenz von Unternehmen, die Systeme für wandgebundene Bauweisen anbieten. In der Begrünung von Neubauten, sowie der nachträglichen Begrünung von Bestandsgebäuden liegt ein erhebliches Potenzial, das aus heutiger Sicht weitgehend unerschlossen ist.

Bindung von Feinstäuben durch Pflanzen

Fassadenbegrünungen können platzsparend am Gebäude eingesetzt werden und dabei eine Vielzahl positiver Effekte auf das Stadtumfeld auslösen. Zahlreiche Studien belegen die Bindung von Stäuben an der Oberfläche von Begrünungen. Die Wirksamkeit hängt dabei von vielen Faktoren und Parametern der Einflussnahme aus dem urbanen Raum ab. Die Pflanzen können aufgrund ihrer verschiedenen Oberflächenstruktur in Akkumulierer und Selbstreiniger eingeteilt werden. Akkumulatoren besitzen mit ihrer rauen Oberfläche gute Eigenschaften für die Feinstaubfilterung und Partikelhaftung [Gorbachevskaya et al. 2012, S. 8]. Wegen der Pflanzenoberfläche können

lungengängige Feinstäube in der Luft ab- und adsorbiert werden [Kuttler, 2010, o.S.]. Moosen wird in der Bindung von Feinstäuben eine besondere Rolle zugesprochen. Neben ihrer großen Oberfläche können sie Stoffe aus der Luft elektrostatisch binden und einige Bestandteile aufnehmen oder durch Bakterien an der Oberfläche umwandeln.

Für einen weiteren Ausbau und die Umstrukturierung unserer Städte mit grünen Gebäuden ist es notwendig, die Wirksamkeit von Fassadenbegrünungen und den Einfluss auf den urbanen Raum weiter zu untersuchen. Die wenigen und zum Teil widersprüchlichen Aussagen der Leistungsfähigkeit von Fassadenbegrünungen zur Luftreinhaltung machen weitere wissenschaftliche Untersuchungen notwendig. Die zentralen Fragestellungen und die Zielsetzung dieser Arbeit werden daher nachfolgend ausgeführt.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die grundlegenden Fragestellungen dieser Arbeit ergeben sich aus den lückenhaften Untersuchungen zur Bindung von Luftschadstoffen durch Fassadenbegrünungen. Daher besteht das Hauptziel dieser Arbeit in der Aufbereitung bisheriger wissenschaftlicher Erkenntnisse zu dieser Thematik und einer anschließenden umfangreichen empirischen Forschung anhand zweier Praxisprojekte, sowie weiterer aufbauender Laboruntersuchungen. Bisher wurden nur wenige empirische Langzeituntersuchungen vorgenommen. Durch den interdisziplinären Ansatz der Forschungsarbeit werden Themenfelder der Bautechnik, der technischen Anwendung von Fassadenbegrünungen, der Botanik, sowie Bereiche der Verfahrenstechnik (mit Schwerpunkt Partikeltechnologie) bearbeitet.

Diese Arbeit legt den Schwerpunkt auf die Betrachtung wandgebundener Bauweisen in unterschiedlichen Ausführungen. Zudem wird bei den Emissionen die Bindung von Feinstaub in unterschiedlichen Größenfraktionen fokussiert betrachtet. Basierend auf den umfangreichen Möglichkeiten der Messmethodik werden weitere Luftschadstoffe aufgenommen, jedoch nicht in den Mittelpunkt gestellt. Aus dem zentralen Themenfeld zum Einfluss wandgebundener Begrünungen auf die Feinstaubbelastungen ergeben sich weitere, vertiefende Fragestellungen:

- Kann ein messtechnischer Nachweis zur Reduktion von Feinstaubkonzentrationen vor den Begrünungen geführt werden?
- Von welchen Parametern in der Systematik und dem Aufbau von Begrünungen hängt die Leistungsfähigkeit zur Luftfilterungsleistung ab?
- Hat eine hohe Luftschadstoffkonzentration, im Speziellen eine hohe Feinstaubkonzentration, einen Einfluss auf die Vitalität der in den Versuchen eingesetzten Pflanzen und auf den optischen Eindruck

der eingesetzten wandgebundenen Bauweisen?

- Können aus den Untersuchungen Rückschlüsse auf die Verwendung von speziellen Pflanzenarten gewonnen werden?
- Besteht ein messtechnischer Unterschied im Verlauf der untersuchten Vegetationsperiode?
- Wie verändern sich die Feinstaubwerte in einem Abstand zur Fassadenbegrünung und können Begrünungen im direkten Umfeld des fußläufigen Verkehrs zu einer Verbesserung der Luftqualität und damit einer Gesundheitsförderung beitragen?

Aus den Forschungsfragen ergeben sich eine Reihe von Forschungsinhalten, die in dieser Forschungsarbeit empirisch untersucht werden:

Eine umfangreiche Recherche soll den aktuellen Wissensstand zur Begrünung mit wandgebundenen Bauweisen, zu den Potenzialen von Fassadenbegrünungen, zu gesundheitlichen Einflüssen im urbanen Raum, zu Luftschadstoffbelastungen sowie zur Bindung von Feinstaub durch Vegetation aufzeigen.

Vergleichsmessungen zwischen unbegrüntem und begrüntem Fassaden an mehreren Standorten sollen Aufschluss über den Einfluss dieser Bauweisen zur Minderung von Luftschadstoffkonzentrationen im urbanen Raum geben. Die Messung von Umweltparametern wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit soll den Zusammenhang dieser Parameter mit der Schadstoffkonzentration und der Bindung von Luftschadstoffen durch Pflanzen aufzeigen.

Qualitative Untersuchungen zur Zusammensetzung von Feinstaubpartikeln auf Oberflächen sollen Rückschlüsse auf die Herkunft von Stäuben an den jeweiligen Standorten ermöglichen.

Vitalitäts- und Wachstumsuntersuchungen der ausgewählten Vegetationsträger zeigen die Entwicklung der

eingesetzten Systeme unter dem Einfluss hoher Luftschadstoffemissionen und unter Extrembedingungen, insbesondere bei der Tunnelbegrünung. Parallel laufende Laboruntersuchungen sollen Einschätzungen zur Effektivität bei der Reduzierung von Feinstäuben ermöglichen.

Die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse können in der Diskussion einen Beitrag zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit von Gebäudebegrünung zur Luftschadstoffreduzierung leisten.

Mit den beiden Praxisprojekten an der Glasbecker Straße in Essen und am Citytunnel in Darmstadt soll die zentrale Fragestellung dieser Forschungsarbeit beantwortet werden:

Können wandgebundene Begrünungen zu einer Reduzierung von Feinstaubbelastungen und damit zu einer Reduzierung der gesundheitlichen Belastungen im urbanen Raum führen?

1.3 Abgrenzung

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Untersuchung des potenziellen Beitrags von wandgebundenen Fassadenbegrünungen zur Reduzierung von Luftschadstoffen, insbesondere von Feinstaub im urbanen Raum. Dabei liegt der Fokus auf der Feinstaubfilterung durch unterschiedliche Systeme. Um eine klare Abgrenzung zu gewährleisten, werden im Folgenden die zentralen Aspekte dieser Untersuchung dargelegt:

Art der Begrünung

Im Fokus stehen wandgebundene Begrünungen. Andere Formen der Gebäudebegrünung wie bodengebundene Begrünungen oder Dachbegrünungen werden nicht in die Analysen einbezogen.

Luftschadstoffe

Bei der Reduzierung von Luftschadstoffen werden insbesondere Feinstäube in urbanen Umgebungen betrachtet. Andere Luftschadstoffe wie Stickoxide oder Ozon werden nur bedingt berücksichtigt.

Aufbau der untersuchten Begrünungsbauweisen

Es werden verschiedene Bauweisen der wandgebundenen Fassadenbegrünung analysiert, wobei insbesondere die Unterschiede in der Konstruktion, im Pflanzenaufbau und in der Struktur der Begrünungen betrachtet werden.

Messmethoden

Für die Untersuchungen werden aktive und passive Messverfahren im urbanen Umfeld eingesetzt. Neben Passivsammeln kommen auch Geräte zur Messung von Echtzeit-Umweltdaten zum Einsatz. Zusätzliche Laboruntersuchungen sollen Ansätze zur Differenzierung der Leistungsfähigkeit von Fassadenbegrünungen als Feinstaubfilter liefern.

Vergleich mit nicht begrünten Fassaden

Der Fokus liegt auf Vergleichsmessungen zwischen begrünten und nicht begrünten Flächen hinsichtlich ihrer Feinstaubfilterungsleistung, um den spezifischen Beitrag der Begrünung zu ermitteln.

Geografischer Fokus

Die Untersuchung konzentriert sich auf zwei Forschungsprojekte mit einer hohen Grundbelastung an Luftschadstoffen. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit für den Nachweis einer Reduzierung durch ein pflanzliches Medium.

Zeitlicher Rahmen

In dem Zeitraum einer Vegetationsperiode können saisonale Unterschiede in der Filterleistung durch vegetative Veränderungen berücksichtigen und langfristige Effekte erfasst werden.

1.4 Aufbau und Methodik der Arbeit

Diese Untersuchung analysiert die Wirksamkeit wandgebundener Fassadenbegrünungen zur Verbesserung der Luftqualität in städtischen Gebieten. Dabei wird ein umfassender methodischer Ansatz verfolgt, der verschiedene Aspekte der Begrünungsbauweisen sowie deren Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit untersucht. Um die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit zu erreichen, wird die folgende Gliederung zur methodischen Bearbeitung des Themenfeldes angewendet (*Abbildung 2*).

Im ersten Kapitel wird eine Einführung in den Themenkomplex der Bauwerksbegrünung gegeben. Weiterhin werden die Problemstellungen im Hinblick auf die Luftschadstoffbelastungen und die Bindung von Luftschadstoffen durch Pflanzen betrachtet.

Im zweiten Kapitel folgt eine umfassende Betrachtung der Gebäudebegrünung, im Speziellen der wandgebundenen Begrünungen. Dabei wird ein fundiertes Verständnis für die Gebäudebegrünung und deren Potenziale vermittelt. Es werden verschiedene Bauweisen von wandgebundenen Begrünungen erläutert sowie Anforderungen an diese Systeme diskutiert. Zudem werden die Umwelteinflüsse im urbanen Raum und deren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit beleuchtet, insbesondere im Hinblick auf Luftschadstoffbelastungen und Feinstaubbindung durch Vegetation.

Das dritte Kapitel legt den methodischen Rahmen für die Untersuchung fest. Es werden verschiedene Methoden zur Erfassung von Umgebungsparametern wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Stickoxidkonzentration und Staubkonzentration vorgestellt. Zudem werden Ansätze zur Untersuchung von Stäuben auf Oberflächen sowie zur Bewertung der Vitalität ausgewählter Vegetationsträger erläutert. Ein Modellversuch zur Feinstaubbindung von wandgebundenen Fassadenbegrünungssystemen wird ebenfalls beschrieben.

Im vierten Kapitel folgt eine detaillierte Beschreibung der eingesetzten Messtechnik und Versuchsgeräte sowie der ausgewählten Versuchsflächen.

Die verschiedenen Instrumente zur Messung von Umweltparametern werden vorgestellt sowie die spezifischen Merkmale der untersuchten wandgebundenen Begrünungen an den Standorten in Darmstadt, Essen und Höxter beschrieben.

Im fünften Kapitel wird die praktische Umsetzung der Untersuchungsschritte beschrieben, einschließlich der Untersuchung von Umgebungsparametern, Staubkonzentrationen auf Oberflächen und der Vitalität der Vegetationssysteme. Die Durchführung des Modellversuchs zur Feinstaubbindung wird ebenfalls erläutert.

Im sechsten Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt. Die gemessenen Umweltparameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Stickoxidkonzentration und Staubkonzentration werden analysiert sowie die Vitalität der untersuchten Vegetationssysteme bewertet.

Das siebte Kapitel setzt die Ergebnisse der Untersuchung in den Kontext bisheriger Forschungen. Mögliche Erklärungen für beobachtete Ergebnisse werden diskutiert und die Relevanz für die Praxis sowie für zukünftige Forschungsvorhaben erörtert.

Im achten Kapitel folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der gesamten Arbeit. Zudem werden die Limitationen der Studie und mögliche Verbesserungsansätze aufgezeigt.

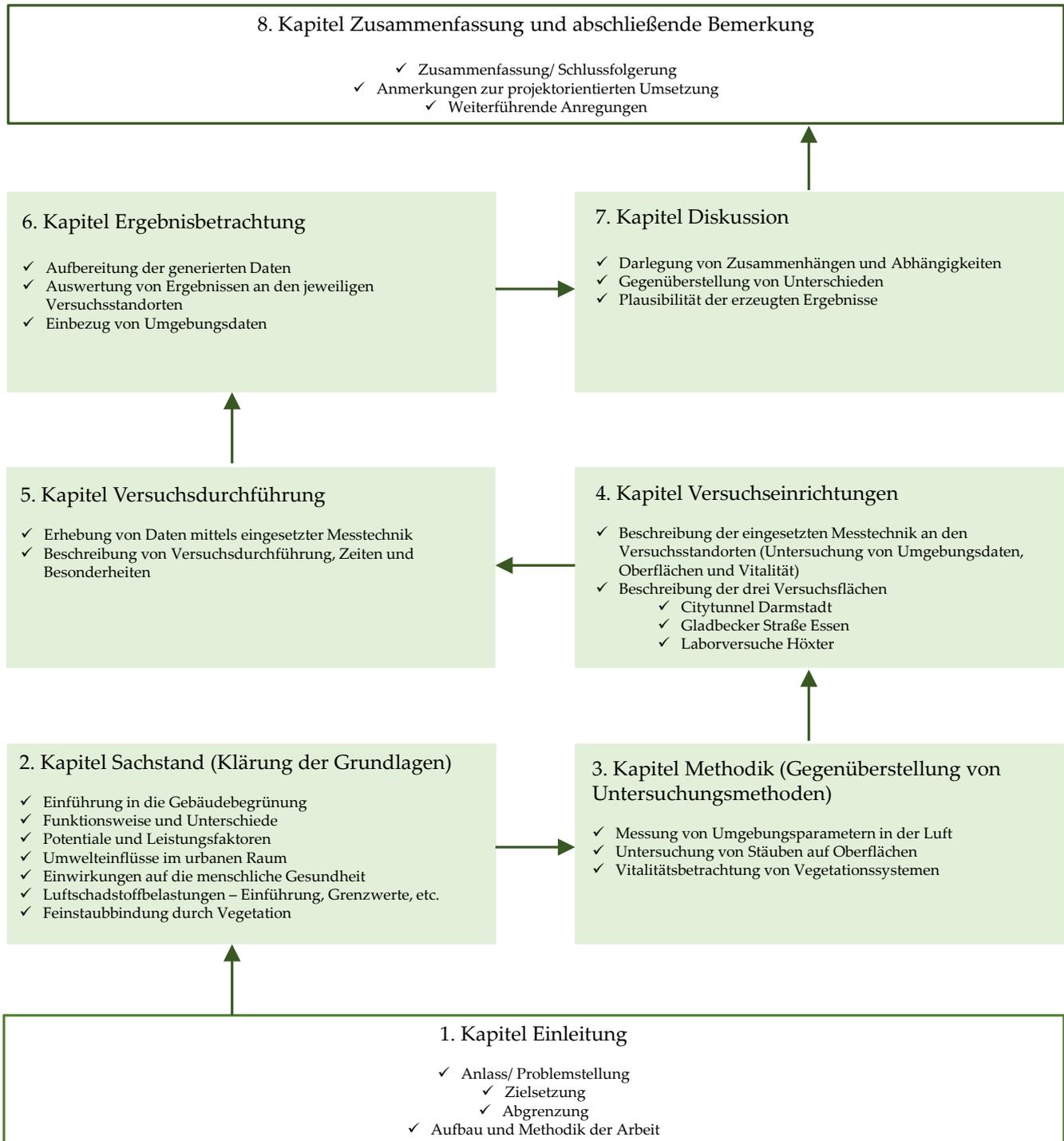


Abbildung 2: Aufbau und Inhalt der Arbeit.

Sachstand

2. Sachstand

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen wandgebundener Begrünungen beschrieben. Zudem wird eine systematische Einordnung in die Gebäudebegrünung vorgenommen und die Unterschiede zwischen verschiedenen Bauweisen aufgezeigt. Auf Basis der Literatur werden die bestehenden Potenziale und Leistungsfaktoren dargelegt. Anschließend folgt

eine Betrachtung der Umwelteinwirkungen in urbanen Räumen und der Effekte auf den menschlichen Körper und die Gesundheit. Darauf aufbauend wird das Themenfeld der Luftschadstoffbelastungen mit einem Fokus auf Feinstaub näher betrachtet. Abschließend wird der derzeitige Wissensstand zur Bindung von Feinstaub durch Vegetation dargelegt.

2.1 Einführung in die Gebäudebegrünung

Um eine Einordnung der unterschiedlichen Typen von Gebäudebegrünungen vorzunehmen, erfolgt zunächst eine Einordnung des Begriffs *Gebäudebegrünung* auf unterschiedlichen Maßstabsebenen. Der englische Begriff *Green Infrastructure* (deutsch: *Grüne Infrastruktur*) ist ein Sammelbegriff für ein strategisch geplantes Netzwerk wertvoller natürlicher und naturnaher Flächen [Europäische Kommission 2013, S. 3]. Ziel der Grünen Infrastruktur ist es, sowohl im urbanen als auch im ländlichen Raum ein breites Spektrum an Ökosystemleistungen zu gewährleisten. Begriffe wie *Grüne Architektur* oder *Green Building* sind übergeordnete Bezeichnungen, die in ihrer Bedeutung nicht zwangsläufig die Dimension *Pflanze* berücksichtigen. Vielmehr umfassen sie die gesamtheitliche Entwicklung des nachhaltigen Bauens, die die Minimierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs, die Reduzierung von Umweltbelastungen und die Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit eines Gebäudes berücksichtigt [UBA (Hrsg.) 2021, o.S.]. Ein Teil des strategischen *Grüne-Infrastruktur-Netzwerkes* und der *Grünen Architektur* ist die Gebäudebegrünung oder auch Bauwerksbegrünung.

Unter dem Begriff *Gebäudebegrünung* werden alle Begrünungsformen der Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung zusammengefasst. Ziel ist eine dauerhaft konzipierte und umge-

setzte Begrünung. Dauerhaft bedeutet in diesem Zusammenhang mindestens zehn Jahre, besser noch die volle Lebensdauer der jeweiligen Gebäude [Köhler 2022, S.15].

Der Begriff *Dachbegrünung* unterscheidet in Abhängigkeit von der Bauweise und Nutzung drei Arten von Begrünungen: Intensivbegrünungen, einfache Intensivbegrünungen und Extensivbegrünungen [FLL-Dachbegrünungsrichtlinien 2018, S.21].

Bei der Innenraumbegrünung werden die Bauarten differenziert nach Ort, Größe und Art der Pflanzenverwendung. Die gängigste Unterscheidung erfolgt nach der Art der Wasserführung, als offene oder geschlossene Systeme, sowie nach der Art der Systemaufbauten mit differenziertem Substrataufbau [FLL-Innenraumbegrünungsrichtlinien 2011, S. 20ff]. Unter Wand- und Fassadenbegrünungen werden alle Begrünungen zusammengefasst, die sich an den Gebäudeaußenflächen, Mauern oder Wänden befinden [FLL-Fassadenbegrünungsrichtlinien 2018, S. 10]. Systembedingt können die Fassadenbegrünungen weiter in bodengebundene Begrünungssysteme, wandgebundene Begrünungssysteme und Mischformen differenziert werden (*Abbildung 3*). Nach Pfoser können diese Systeme auch als „Pflanzenfassaden“ zusammengefasst werden [Pfoser 2018, S. 68].

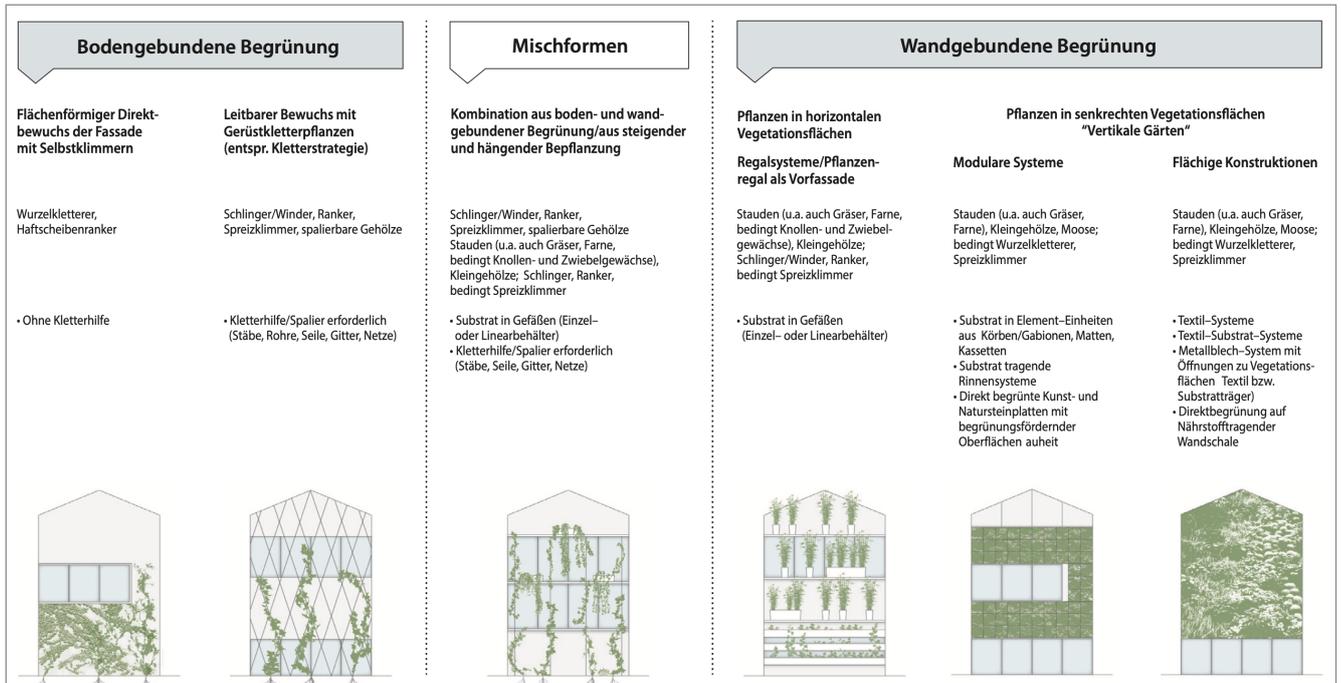


Abbildung 3: Formen der Fassadenbegrünung, typische Merkmale (Pfosser 2018).

2.1.1 Bestandteile wandgebundener Fassadenbegrünungssysteme

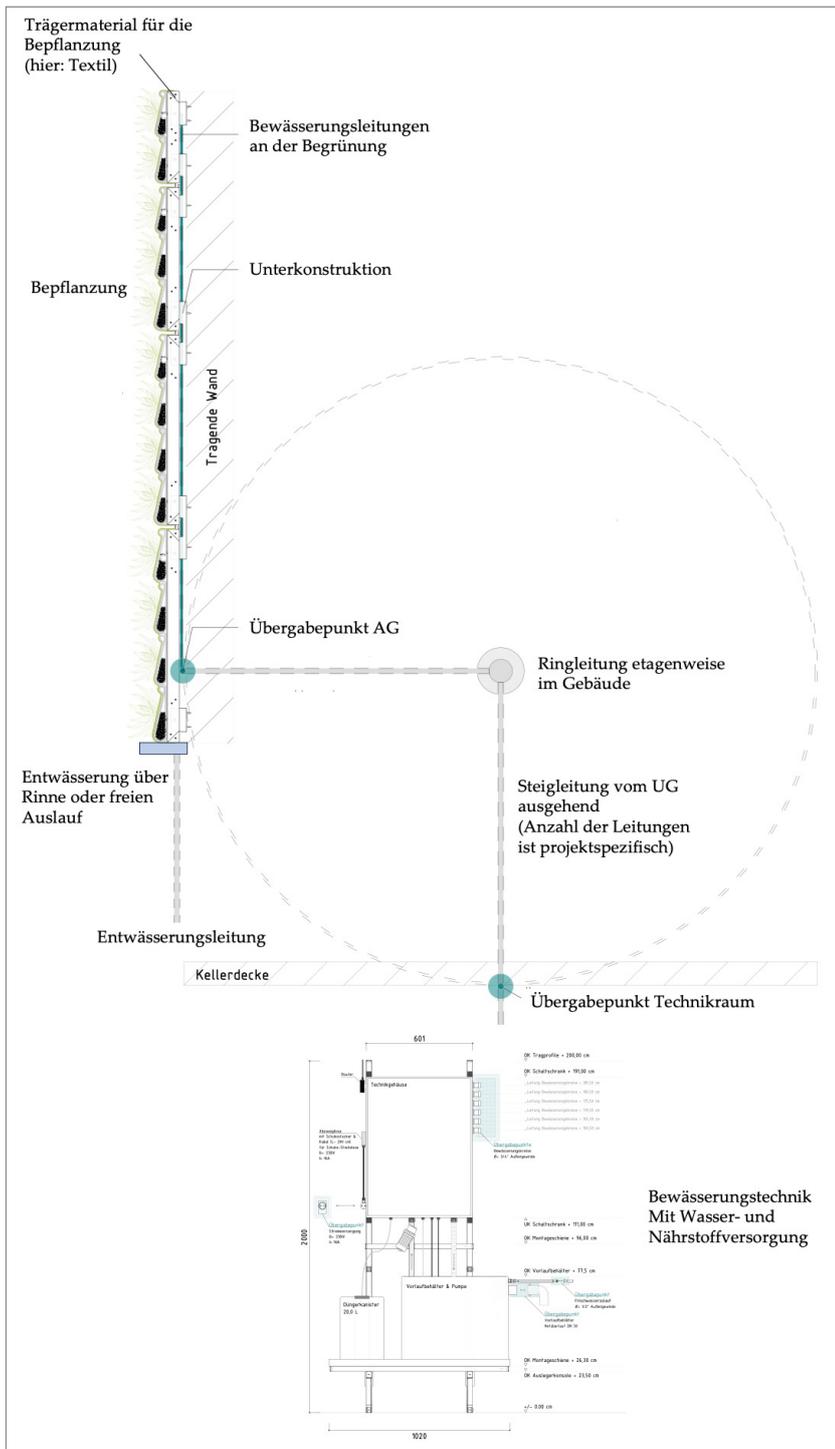


Abbildung 4: Zeichnung der Komponenten einer wandgebundenen Begrünung (Vertiko GmbH 2023, geändert).

Unter der Gruppierung der wandgebundenen Begrünungen werden alle Systemvarianten zusammengefasst, die ohne Boden- und Bodenwasseranschluss auskommen [Pfoser 2018, S.68]. Andere Begriffe für diese Bauart sind Living Walls, Vertikale Gärten oder die undifferenzierte Kurzform Wandbegrünung.

Auch wenn die Begrünung von Bauwerken heute mehr in den Fokus rückt, reichen die Anfänge dieser Begrünungsform etwa 30 Jahre zurück. Im europäischen Raum hat Patrick Blanc die Bauart mit seinen ersten Versuchen und Projekten ab den 1990er Jahren geprägt [Blanc 2024, o.S.]. Anfang der 2000er Jahre wurden weitere Systeme zur wandgebundenen Begrünung mithilfe von Experimenten und Prototypen entwickelt. [Pfoser 2018, S.68]. Obwohl die Entwicklung der Systeme stetig fortgeführt wird, werden im Verhältnis zur bodengebundenen Begrünung bisher in Deutschland wenige Flächen mit diesen Systemen begrünt. Von den im Jahr 2022 begrünt 146.000 m² Fassadenbegrünung entfallen nur 20,70 % (30.200 m²) auf wandgebundene Systeme [BuGG 2023, S.42].

Derzeit gibt es verschiedene Anbieter auf dem europäischen Markt. Wenngleich systemisch verschieden, beinhalten alle Bauweisen die folgenden fünf Komponenten:

1. Befestigung und Unterkonstruktion
2. technische Versorgung mit Wasser sowie Nährstoffen
3. Be- und Entwässerungsleitungen
4. Trägermaterial für die Pflanzen sowie eine an den Standort angepasste Pflanzenauswahl.

Abgesehen von der Versorgung, besteht die größte Differenz in der Art des Trägermaterials für die Pflanzen. Im Folgenden werden die genannten systemischen Komponenten erläutert.

2.1.1.1 Befestigung und Unterkonstruktion

Wandgebundene Begrünungen werden in der Regel als vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF), sogenannte hinterlüftete Außenwandbekleidung ausgebildet. In der DIN-Norm 18516-1 sind alle Planungs-, Bemessungs- und Konstruktionsgrundsätze dazu festgelegt. Der Hinterlüftungsraum wird definiert als Bereich zwischen dem Bekleidungs-element sowie der gedämmten oder ungedämmten Außenwand. Die untere und obere Öffnung der Konstruktion ermöglicht eine permanente Durchströmung der Konstruktion mit Luft, womit ein verringerter Kühlbedarf im Sommer einhergeht. Der Effekt wird durch die aktive Kühlung der wassergesättigten Begrünung verstärkt. Gleichzeitig dient der Hinterlüftungsraum im Winter als Temperaturpuffer, wodurch Transmissionswärmeverluste

verringert werden. Aufgrund verschiedener Konstruktions- und Fassadentypen wird derzeit bei wandgebundenen Begrünungen ein Hinterlüftungsraum von etwa 60 mm realisiert [Fassadentechnik 2020, S. 20].

Die Montage der wandgebundenen Begrünungen erfolgt in der Regel mit am Markt etablierten Fassadensystemen. Zur Anwendung kommen häufig Konsolen oder Edelstahlwinkel, mit denen die Unterkonstruktion zur Befestigung des Trägermaterials ausgebildet wird. Die unterschiedlichen Profile werden an den Haltepunkten als Fest- und Gleitpunkte montiert, um eine thermische Ausdehnung der Konstruktion zu gewährleisten [Systea Pohl GmbH 2015, S. 13].

2.1.1.2 Technische Versorgung

Aufgrund der Bauweise sind wandgebundene Begrünungssysteme auf die zusätzliche Bewässerung durch ein technisches System angewiesen, da sie keine ausreichende Versorgung durch auftretenden Niederschlag erhalten [Köhler 2022, S. 159].

Aus diesem Grund ist eine funktionierende und auf das Begrünungssystem ausgerichtete Bewässerung elementarer Bestandteil für den Begrünungserfolg. Am Markt bestehen je nach Größe der Begrünung unterschiedlich dimensionierte Bewässerungsanlagen, die in der Regel auf die Art, Größe und Exposition der Begrünung individuell geplant werden. Dabei wird grundsätzlich zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterschieden. Bei geschlossenen Systemen wird das Wasser in einem Kreislaufsystem wiederverwendet. In offenen Systemen wird das überschüssige Wasser aus der Entwässerungsrinne abgeleitet.

Je nach Art und Aufbau der Begrünung, Exposition, Verbrauch der Pflanzen und Witterung ist der Wasser-

bedarf unterschiedlich. Ein Näherungswert für den Wasserverbrauch liegt bei etwa 2,0 bis 3,0 l/m²/Tag [Vertiko GmbH 2022, o.S.].

Durch die meist schlanken Systemaufbauten ist die flächendeckende Bewässerung der Begrünung unabhängig von der eingesetzten Bewässerungstechnik entscheidend. Gleichzeitig ist hierbei die Entwicklung von zu trockenen Bereichen und Staunässe im unteren Bereich zu vermeiden. Regelmäßig werden wandgebundene Begrünungen mit Tropfschläuchen bewässert. Der vertikale Abstand der Tropfschläuche, der horizontale Abstand der Tropfer, sowie die eingesetzten Bewässerungsintervalle und die jeweilige Bewässerungsdauer haben Einfluss auf die flächendeckende Versorgung der Pflanzen.

Die erforderliche Wassermenge kann zudem jahreszeitlich um bis zu 70 % variieren [Köhler 2022, S. 159].

Je nach Größe und Art der Begrünung werden die Bewässerungsschläuche in mehreren Bewässerungskreisen an der

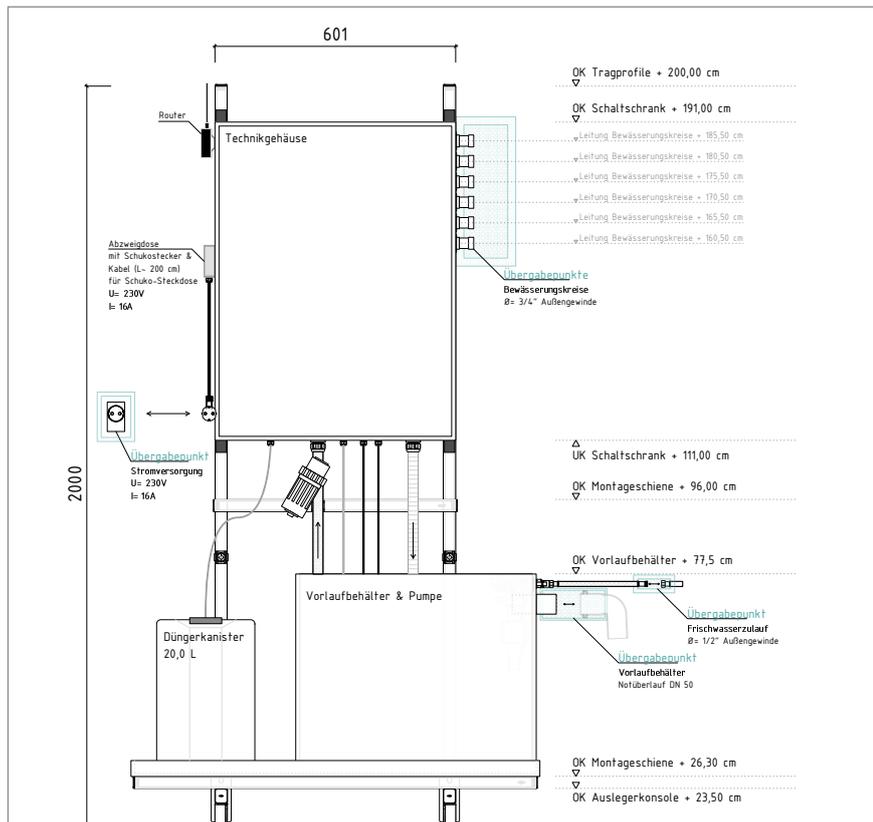


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Bewässerungsanlage (Vertiko GmbH 2023).

Fassade ausgebildet. So können beispielsweise unterschiedliche Begrünungssysteme oder Bereiche angesteuert werden.

Zentrale Bauteile einer solchen Anlage sind exemplarisch in *Abbildung 5* dargestellt. Die Bewässerungsanlage wird in einem zentralen Technikraum im Gebäude installiert. Dabei sind einzelne Anschlüsse für den Betrieb der Anlage vorzusehen. Neben einem Festanschluss für Strom wird eine Zuleitung mit Frischwasser benötigt. Auch wenn die Verwendung von Regenwasser mittels einer Zisterne vorgesehen und eingerichtet wird, ist dennoch ein Zulauf mit Frischwasser für den Bedarfsfall vorzusehen. Bei der Verbindung von Trinkwasseranschlüssen mit Wasserversorgungsanlagen muss zudem eine Schutz Einrichtung nach anerkannten Regeln der Technik geplant, gebaut und betrieben werden [§ 13 Trinkwasserverordnung].

2.1.1.3 Be- und Entwässerungsleitungen

Die Bewässerungsleitungen von Fassadenbegrünungen werden bei der Installation durch das Gebäude geführt. Dadurch ergeben sich, anders als in der Gartenbewässerung üblich, Schnittstellen mit der Gebäudetechnik und -installation. Die Definition geeigneter Übergabepunkte ist daher entscheidend für eine saubere Abwicklung. Die Leitungsführung der Bewässerungs- und Entwässerungsleitung wird durch die technische Gebäudeausrüstung geplant und durch die Gebäudeinstallation umgesetzt. Die Anzahl der Bewässerungsleitungen von der Bewässerungstechnik bis zur Fassade richtet sich nach der Anzahl der Bewässerungskreise. Als

Orientierungspunkt für die Anzahl der Bewässerungskreise gilt die Länge der Tropfschläuche und die Höhe der installierten Begrünungen.

Die Entwässerungsleitungen sind je nach Systemansatz als geschlossenes oder offenes System mit der Zisterne, weiteren Fallrohren oder der Kanalisation verbunden. Die Entwässerungsleitung sollte je nach Größe und zu erwartender Durchflussmenge des Systems mindestens als DN40-Leitung ausgeführt werden. Um den Eintrag von Laub oder anderen oberirdischen Blattorganen in die Entwässerungsleitung zu vermeiden, sollte die Verwendung eines Siebfilters in der Entwässerungsrinne mitgeplant werden.

2.1.1.3 Trägermaterial für die Pflanzen

Kübelsysteme

Kübelsysteme werden an der Fassade oft zur vertikalen Anordnung verwendet. Sie zeichnen sich durch eine vertikale Substratebene mit einer regelmäßig verwendeten zusätzlichen Bewässerung aus. Die Kübel können je nach Witterungsbedingungen als gedämmte und ungedämmte Variante ausgebildet werden. Eine Dämmung der Kübel ist insbesondere für die Sommermonate förderlich, um eine starke Aufheizung des Substrats und die damit einhergehenden Hitzeschäden im Wurzelraum zu vermeiden. Die Auswahl der Pflanzen kann dabei sehr unterschiedlich sein. Es können Stauden, Sträucher und Gehölze genauso eingesetzt werden wie Kletterpflanzen mit einer zusätzlichen Rankkonstruktion. Die Dimensionierung der Gefäße ist auf die jeweilige Pflanzenauswahl abzustimmen. Bei zunehmender Kübelgröße treten größere Gewichte und Lasten auf, die je nach Montage beispielsweise mit Konsolen abgetragen werden. Die Lastaufnahme und Dimensionierung der Kübel sind daher im Einzelfall zu prüfen.

Textilsysteme

Der Einsatz von Textil zur Vertikalbegrünung geht auf die *Living Wall*-Entwicklung mit einer Gewebesicht durch Patrick Blanc zurück. Der Einsatz sogenannter Geovliese oder Geotextilien, die ursprünglich aus dem Erdbau, der Hangbefestigung oder dem Teichbau stammen, ist möglich. Sie werden mit unterschiedlichen Verfahren und in mehreren Lagen miteinander verbunden und dienen den Pflanzen im Zwischenbereich als Wurzelraum. Textilsysteme werden sowohl im Innen- als auch im Außenbereich eingesetzt. Zur Begrünung eignen sich Stauden und Halbsträucher. Die Textilien müssen eine Vielzahl an Anforderungen erfüllen, beispielsweise eine besondere Festigkeit gegen Durchdrücken. Zusätzlich sind die UV-Stabilität der eingesetzten Materialien, deren Reißfestigkeit und Wasserspeicher-

kapazität obligatorisch [Köhler 2022, S. 149]. Im Hochhausbereich werden heute ebenfalls Textilien eingesetzt, die zusätzlich noch die Kriterien des Brandschutzes erfüllen müssen.

Gabionen- und Metallsysteme

Fassadenbegrünungen mit Gabionen- oder Metallsystemen bestehen aus einer Metallbox, die mit Substrat gefüllt wird. Die Gabionen werden zur Begrünung mit einem Textil ausgelegt und zusätzlich mit einer Dämmung versehen.

Zur Nutzung als Begrünungssystem sind die Gabionen mit einem Substrat gefüllt. In diese Systeme können neben Stauden und Sträuchern auch Gehölze und Kletterpflanzen eingesetzt werden. Wegen des hohen Gewichts der Gabionen ist eine ausreichend dimensionierte Unterkonstruktion zu wählen.

Mineralwolle als Trägermaterialien

In Konstruktionen einiger Hersteller wird Mineralwolle als Füllmaterial und Medium zum Pflanzenwachstum verwendet. Bei einer offenporigen Struktur können sie den Pflanzen zum einen Halt und Wurzelraum geben, zum anderen ein gutes Porenvolumen als Luft- und Wasserspeicher aufweisen. Die Eignung zur Durchdringung der Pflanzenwurzeln hängt von der Stabilität und Komprimierung der eingesetzten Dämmstoffe ab. Mit zunehmender Dichte und Stabilität des Materials verringert sich allerdings das Durchwurzelungspotenzial [FLL-Schriftenreihe 2015, S. 18].

Kunststoffträgersysteme

Die Herstellung von Trägersystemen aus Kunststoff ist eine Möglichkeit zur individuellen Gestaltung von Pflanzkübeln oder -kästen an der Fassade. In Abhängigkeit von der Granulatzusammensetzung können unterschiedliche Trägersysteme und -formen produziert werden [FLL-Schriftenreihe 2015, S. 18]. Auch die Verwendung von Styropor als Kunststoff-Trägermaterial

wird als System verwendet. Wegen des geringen Gewichts der Konstruktionen kann es leicht montiert werden und ist vielseitig einsetzbar. Häufig werden die Trägerelemente zur Wasserspeicherfähigkeit mit Substraten gefüllt. Die fehlende UV-Beständigkeit führt jedoch dazu, dass die Materialien langfristig nicht stabil sind [Köhler 2022, S. 144].

Vorsatzschalen zur Oberflächenbegrünung

Die aus Ziegelementen, Beton- oder Steinplatten (z. B. Tuffstein) bestehenden Elemente dienen dabei als Wachstumsgrundlage für Flechten oder Moose [Pfosser 2018, S. 83]. Durch die rauen Oberflächen der Vorsatzschalen wird eine begrünungsfördernde Oberfläche erzeugt. Die Versorgung der Pflanzen

erfolgt über Tropfschläuche oder Feinsprühdüsen.

Für den Erfolg dieser Begrünung sind die folgenden Aspekte entscheidend:

- Auswahl der Moos- und Flechtenvegetation für eine lokale Anpassung,
- angepasstes Bewässerungssystem mit einer ausreichenden Filtrierung; Nutzung von Regenwasser ist hier besonders empfehlenswert, da der pH-Wert zur Bewässerung entscheidend ist,
- Trennung zwischen den feuchten Vorsatzschalen und der darunterliegenden Wärmedämmung [Köhler 2022, S. 147].

2.1.1.5 Substrate

In vielen Systemen wandgebundener Begrünung werden Substrate eingesetzt. In den kunststoff- und metallbasierten Trägermaterialien und -boxen oder Regalsystemen sind sie essenzieller Bestandteil zur Pflanzenversorgung. In den beschriebenen Textilsystemen werden sie herstellereinspezifisch eingesetzt. Substrate erfüllen dabei die Funktion als Wasser- und Luftspeicher und bieten Pflanzen den nötigen Halt im System. Die Eigenschaften eines Substrats für wandgebundene Begrünungen sind vergleichbar mit denen herkömmlicher gärtnerischer Substrate. Ein hohes Porenvolumen bei günstiger Porengrößenverteilung, eine hohe Wasserspeicherkapazität und eine hohe Luftkapazität sind wesentliche Eigenschaften von Substraten [Röber/Schacht 2008, S. 125].

Die in der wandgebundenen Begrünung eingesetzten Substrate setzen sich überwiegend aus den folgenden

Zuschlagstoffen zusammen:

- Ziegelsplitt
- Lava/Bims
- Blähton und Blähschiefer ungebroschen/gebroschen
- Sand
- organische Bestandteile wie Kompost beigemischt [Magistrat Wien 2013, S. 19].

Ob und in welchen Mengen die Bauweisen Substrate verwenden, hat einen wesentlichen Einfluss auf das Gewicht der Systeme. In einem schlanken Textil-Substrat-System werden beispielsweise 10 l/m² Substrat eingesetzt, während in einem Gabionen-System etwa 100 bis 200 l/m² verwendet werden.

Die Zusammensetzung und Verwendung von Substraten in Living Wall Bauweisen ist stark herstellereinspezifisch und abhängig vom jeweiligen Begrünungsprodukt.

2.1.1.6 Angepasste Pflanzenauswahl

Im Gegensatz zu horizontalen Vegetationsflächen sind die Fassade und die vertikale Anordnung von Vegetationssystemen ein Extremstandort für Pflanzen. Dementsprechend muss die Pflanzenauswahl auf das jeweilige Vegetationssystem abgestimmt sein. Der Wurzelraum und das Wuchsverhalten auf der Oberfläche sind begrenzende Faktoren. Die weiteren Wuchsfaktoren wie Licht, Wasser und Nährstoffe sind standortabhängig oder werden künstlich gesteuert [Köhler 2022, S. 148f.].

In einigen hydroponischen Begrünungssystemen weisen die Pflanzen eine geringere Frosthärte auf, wodurch hier auf eine besondere Pflanzenauswahl zurückzugreifen ist. Die Anzahl an Pflanzen je Quadratmeter ist ebenfalls ein Differenzierungskriterium der Begrünungssysteme. Bei modularen und flächigen Systemen ist die Spannweite bei ähnlicher Pflanzenauswahl groß. Während in manchen Systemen lediglich ca. 25 Pflanzen/m² (*Vertiko*-Systemvariante) eingesetzt werden, verwenden andere Hersteller etwa 60 Pflanzen/m² (*Sempergreen*-Systemvariante). Das hat Einfluss auf die Entwicklung der Pflanzen. Bei einer hohen Pflanzdichte ist der Konkurrenzdruck hinsichtlich Wurzelraum, und Licht höher. Alle anderen Faktoren werden künstlich gesteuert. Dennoch kann es bei erhöhtem Konkurrenzdruck zu Stressreaktionen der Pflanzen kommen. Der Ausfall einzelner Pflanzen oder Schädlingsbefall können die Folge sein.

Mit dem Einsatz von wandgebundenen Begrünungen können außerdem hohe gestalterische Ansprüche erfüllt werden. Durch den Einsatz verschiedener Blatttexturen und -farben, unterschiedlicher Belaubungsphasen, besondere Blüten- oder Fruchtstände sowie die Struktur der Pflanzung werden diverse visuelle Effekte erzeugt. Wichtigstes Kriterium bei der Planung sollte dennoch die Funktionalität sein, um eine langfristig vitale Begrünung zu erreichen. Wie bereits beschrieben, sind die

Erfolge mit bewährten Pflanzenarten auf die Bauweisen angepasst. Jedoch können gewisse Überschneidungen zwischen unterschiedlichen flächigen und modularen Systemen beobachtet werden.

Bei einer wandgebundenen Bauweise mit Stauden und Gräsern gibt es verschiedene Möglichkeiten der Pflanzenanordnung.

Zum einen kann ein Pflanzbild nach einem speziellen Muster geplant werden. Dabei werden die Stauden in Gruppen angeordnet und in Linien, Kreisen, Ellipsen oder anderen Formen eingesetzt. Zum anderen kann die Pflanzung nach einem homogen angeordneten Mosaik erfolgen. Dabei werden die wuchsstarken Pflanzen im Wechsel zusammengesetzt. Mit dieser Form der Bepflanzung wird ein natürlicher Charakter erzeugt. Die Pflanzung im Mosaik hat den Vorteil, dass einzelne Ausfälle nicht sofort für den Betrachter sichtbar werden. Bei Pflanzungen in Gruppen sind Ausfälle hingegen deutlich erkennbar. Neben Stauden können auch Kleingehölze in der vertikalen Begrünung Anwendung finden.

Die Verwendung von Gehölzen in den wandgebundenen Bauweisen ist systemabhängig und aufgrund geringer Erfahrungswerte im Einzelfall zu prüfen. Neben dem beschränkten Wurzelraum in einigen Systemen kann mit zunehmendem Wuchs ein Ausbrechen oder Aushebeln erfolgen. Das Wuchsverhalten und der Sitz im System sollten daher regelmäßig bei der Pflege überprüft werden [Köhler 2022, S. 150].

Neben der intensiven Begrünung mit Stauden, bestehen auch Ansätze zur extensiven Begrünung von Fassaden mit Moos- und *Sedum*-Arten. Zur Anwendung kommen hier Vorsatzschalen zur Begrünung mit einer Nassansaat oder Anspritzbegrünung. Alternativ gibt es auch fertig begrünte Moos-, Moos-*Sedum*-, oder *Sedum*-Matten, die in vertikaler Ausrichtung aufgebracht und montiert werden können.

2.1.2 Verschiedene Bauweisen wandgebundener Begrünung

Nach Pfoser können die wandgebundenen Systeme in drei Kategorien untergliedert werden, die sich nach der Art des Aufbaus und der Anordnung an der Fassade unterscheiden [Pfoser 2018, S.70]. Neben den flächigen und modularen Bauweisen, den Vertikalen Gärten, gibt es auch Systeme mit

horizontal angeordneten Vegetationsflächen (*Abbildung 6*).

Im Folgenden wird eine Betrachtung der genannten Bauarten vorgenommen. Im Anschluss erfolgen eine Systematisierung und Gegenüberstellung der Unterschiede (*Kapitel 2.1.2*).

2.1.2.1 Regalsysteme

Als Regalsysteme, auch horizontale Vegetationsflächen oder Pflanzgefäße, werden alle Konstruktionen typisiert, bei denen Rinnen oder Tröge auf Sekundärkonstruktionen und Auskragungen an der Fassade montiert werden. Die Pflanzgefäße können dabei frei übereinander angeordnet werden. Im Idealfall wird die Bepflanzung so gewählt, dass ein Lichteinfall nicht behindert wird [Pfoser 2018, S. 165]. Die Dimensionierung der Tröge und des damit einhergehenden Substratvolumens hat Einfluss auf die Pflanzenauswahl und die Lastabtragung über die Sekundärkonstruktion. Um Folgeschäden in der Konstruktion zu vermeiden, sind die Pflanzgefäße verrottungssicher, korrosionsbeständig und UV-stabil auszuführen [Köhler 2022, S. 140].

Häufig werden die Gefäße daher aus Kunststoff oder aus Aluminium mit Pulverbeschichtung gefertigt. Die Versorgung der Pflanzgefäße mit Wasser

und Nährstoffen erfolgt über eine Anstaubewässerung oder Tröpfchenbewässerung.

Je nach Größe der Gefäße können Stauden, Kletterpflanzen, Sträucher oder Kleinbäume eingesetzt werden. Die Lasten der Pflanzen sind jeweils bei der Planung zu berücksichtigen. Um die Wurzeln vor Frost und starker Hitzeentwicklung im Sommer zu schützen, wird der Einbau einer Dämmschicht empfohlen. Um Staunässe zu vermeiden, sollte im unteren Bereich eine Drainageschicht mit einem Filtervlies zur Trennung der einzelnen Schichten eingebaut und ein Ablauf installiert werden. Das Erscheinungsbild der Pflanzgefäße ist dabei je nach Dimensionierung der Kübel und Anordnung an der Fassade unterschiedlich. Während einzelne Kübel für Akzente an der Fassade sorgen, können vollflächig eingesetzte Trogsysteme eine komplette Fassade begrünen (*Abbildung 8*).

Abbildung 6 (oben): Troggebundene Begrünung an einem Servergebäude in Frankfurt.

Abbildung 7 (unten): Innenhof der Calwer Passage in Stuttgart. Die Kletterpflanzen erzeugen Atmosphäre und sorgen für Raumbildung.

Abbildung 8 (rechts): Wandgebundene Begrünung mit Trogsystem an der Calwer Passage in Stuttgart.



2.1.2.2 Modulare Systeme

Bei der modularen Bauweise dienen vorgefertigte vertikale Vegetationsträger als Basis für das Pflanzenwachstum. Dazu wird eine Unterkonstruktion auf Basis einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade an der tragenden Wand befestigt. Darauf aufbauend werden Pflanzmodule mit der Unterkonstruktion verbunden. Im Hinterlüftungsraum können Versorgungs- und Entwässerungsleitungen für die Module verlegt werden [Pfoser 2018, S. 165]. Ein Beispiel für die Anwendung dieser Bauweise findet sich bei der in dieser Forschungsarbeit untersuchten Begrünung an der Gladbecker Straße in Essen (Abbildung 9). Hier wurden Sub-

stratkörbe mit einer lastabtragenden Unterkonstruktion in die Geschossdecken installiert und eine massive Rahmenkonstruktion streifenförmig auf die Fassade aufgesetzt. Bei der Bepflanzung wurden Stauden und Kletterpflanzen mit angrenzenden Gitterstrukturen kombiniert. In *Abbildungen 10 und 12* sind modulare Begrünungen mit einer ausgeprägten Blattstruktur und Blütenfärbung aufgeführt. Mit modularen Bauweisen können auch schmale Bereiche, beispielsweise zwischen Fenstern, begrünt werden.



2.1.2.3 Flächige Systeme

Bei den flächigen Konstruktionen wird die wandgebundene Begrünung flächendeckend mit einer systemtragenden Sekundärkonstruktion verbaut [Pfoser 2018, S. 166]. Mit Konsolen oder Abstandshaltern wird ein Hinterlüftungsraum gewährleistet. Darauf aufbauend werden verrottungsfreie Trägerplatten, in der Regel aus Metall, Kunststoff oder einem Verbundmaterial, unter Berücksichtigung der thermischen Ausdehnung vollflächig verbaut. Unterhalb der Konstruktion fängt eine Rinne das überschüssige Wasser auf. Die Anschlüsse können sowohl innenliegend im Gebäude als auch in der Fassade gelegt werden. Auf den Trägerplatten wird eine pflanzentragende Schicht aus verschiedenen Materialien aufgebracht. Häufig werden Geotex-

tilien in unterschiedlichen Texturen und Grammaturen verwendet, die verschiedene Aufgaben im Aufbau erfüllen. Neben einer wasserspeichernden Schicht im hinteren Bereich sorgen die mittleren Textillagen als Substratspeicher. Die äußere Schicht dient als Abdeckung und Schutz vor Witterungseinflüssen. Nahezu alle Gebädekubaturen können dank der flexiblen Struktur der Gewebe und der Möglichkeit, die Trägerplatten mit Winkeln oder Rundungen auszubilden mit dieser Bauweise begrünt werden. *Abbildung 8* veranschaulicht, dass auch bei komplexe Fassadenstrukturen wie Vorsprünge oder Fenster mit dieser Form begrünt werden kann.



Abbildung 9 (oben): Wandgebundene Begrünung in modularer Bauweise an der Gladbecker Straße in Essen.

Abbildung 10 (Mitte): Wandgebundene Innenraumbegrünung in modularer Bauweise in Arnhem (NL).

Abbildung 11 (unten): Wandgebundene Begrünung in flächiger Bauweise, Projekt Q8 am Neckarpark in Stuttgart.

Abbildung 12 (links): Wandgebundene Begrünung in modularer Bauweise, Energieversorger Enni Moers.



2.1.3 Systematisierung und Gegenüberstellung der Unterschiede

Wandgebundene Begrünungen können unabhängig vom Boden an der Fassade angebracht werden. Dabei unterscheiden sie sich in der Art der Konstruktion, den bautechnischen Anforderungen und der Gestaltung an der Fassade. Grundsätzlich lassen sie sich in horizontale und vertikale Vegetationsflächen unterscheiden.

Horizontale Vegetationsflächen können in Form von Pflanzregalen oder Kübeln als Vegetationsträger ausgebildet werden. Vertikale Vegetationsflächen unterscheiden sich in eine flächige und eine modulare Bauweise. Durch den fehlenden Bodenanschluss ist das Medium zur Durchwurzelung der Pflanzen, in Kombination mit einer angepassten Bewässerung und Nährstoffversorgung, entscheidend für ein gutes Wachstum der Pflanzen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Pflanzen an der Fassade mit Wasser und Nährstoffen im Wurzelbereich zu versorgen. In allen Varianten kann Substrat verwendet werden. Häufig sind die Substrate speziell auf die Bauweise abgestimmt und enthalten viele unterschiedliche Zuschlagstoffe, um einen guten Luft- und Wasserhaushalt im Wurzelbereich zu ermöglichen. In vertikalen Vegetationsflächen wer-

den oft auch hydroponische Systeme eingesetzt. Vereinzelt wird eine hydroponische Bauweise auch in Kübelssystemen verwendet. Eine weitere Form der Durchwurzelung wird durch unterschiedliche Geotextilien ermöglicht. Hier werden je nach Systemanbieter Varianten mit oder ohne Substrat angeboten. Der Aufbau der pflanzentragenden Schicht hat einen Einfluss auf die Pflanzgesellschaft. Sehr dünn-schichtige Systeme mit Geotextilien oder anderen Trägermaterialien werden für Moos- und *Sedum*-Kulturen an der Fassade eingesetzt. Diese Bauweisen weisen eine Aufbauhöhe ab etwa 40 mm auf [Siemsen & Lasak 2023, o.S.]. Aufbauten aus Geotextilien oder Gabionen in der flächigen oder modularen Bauweise können auch Stauden, Gräser und zum Teil Kleingehölze tragen und versorgen.

Die Bauweise der wandgebundenen Begrünung und die damit verbundene Vegetationsauswahl haben Einfluss auf die Luftreinhaltung. Eine Aufstellung der unterschiedlichen Begrünungsschichten und damit verbundenen Potenziale für die Luftreinhaltung sind in *Kapitel 2.5* aufgeführt.

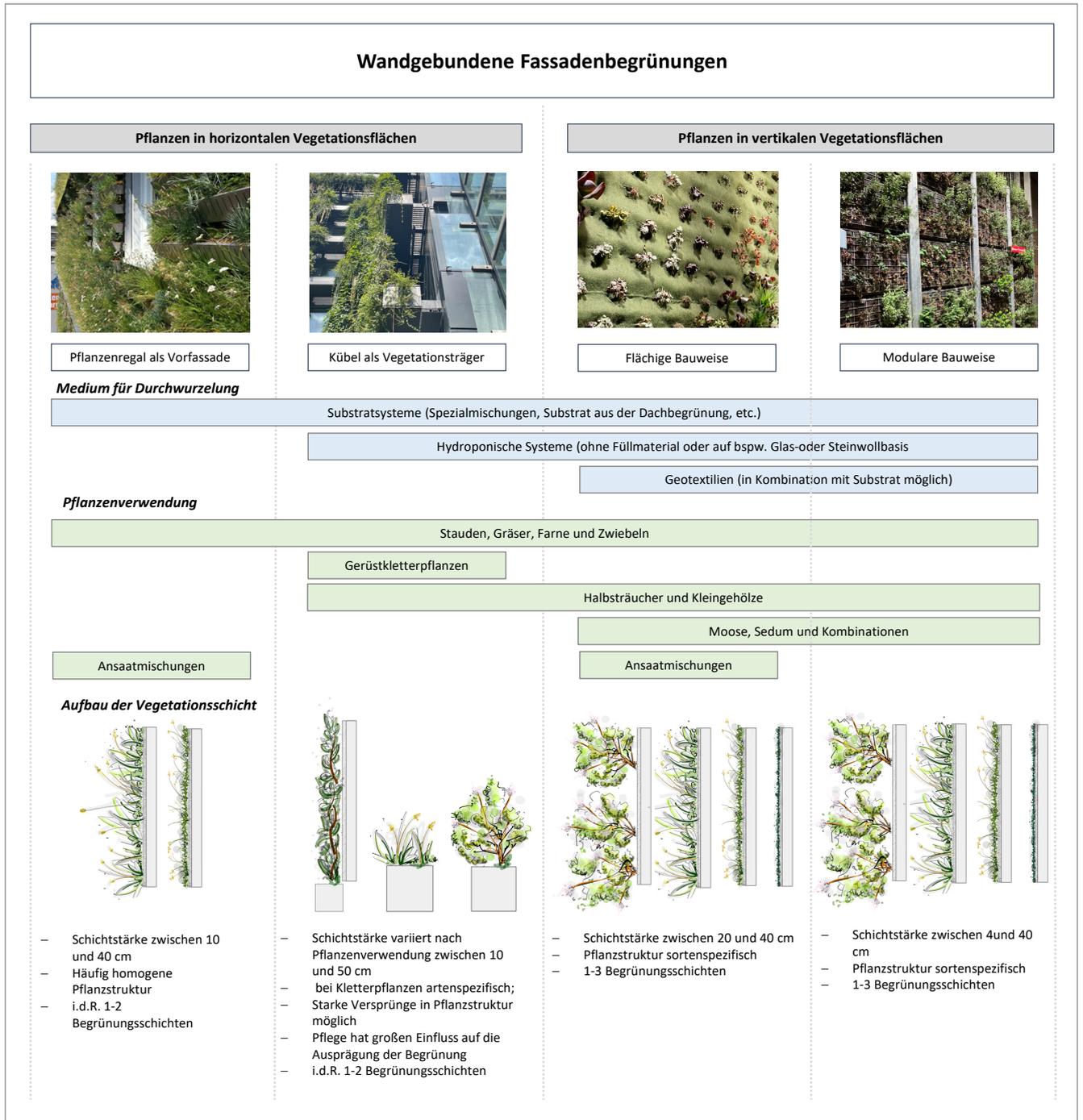


Abbildung 13: Übersicht zur Systematik unterschiedlicher Bauweisen wandgebundener Begrünungen und die Integration verschiedener Vegetationsschichten (in Anlehnung an Pfoser 2018).

2.2 Potenziale und Leistungsfaktoren von Fassadenbegrünungen

Grünen Gebäudehüllen wird eine Vielzahl an Wohlfahrtswirkungen zugesprochen. Diese gehen über die Gestaltgebung hinaus und erzeugen Effekte auf das Gebäude wie auch das direkte Umfeld [Pfoser 2016, S. 6]. Aufgrund der großen Flächenpotenziale können Fassadenbegrünungen einen entscheidenden Beitrag zu einem besseren Stadtklima leisten. Dabei

können Sie den Stadtraum sowohl gestalterisch beeinflussen als auch energetisch und qualitativ aufwerten. Nach Pfoser erzeugen Bautechniken der Fassadenbegrünung sogenannte Leistungsfaktoren, die sich in gebäude- und umfeldbezogene Leistungsfaktoren unterscheiden lassen [Pfoser 2016, S.6].

2.2.1 Potenziale zur Gebäudeoptimierung

Die Begrünung von Fassaden kann positive Effekte auf ein Gebäude ausüben [Green City e.V. 2015, S. 11]. Dabei handelt es sich unter anderem um Auswirkungen im Bereich der energetischen Gebäudeoptimierung. Im Sommer tragen die Begrünungen zur adiabaten Kühlung bei und können bei einer begrünten Fassade etwa 20 bis 40 % der Energiebilanz des Gebäudes ausmachen [UBA (Hrsg.) 1982, o.S.]. Die Gebäudehülle wird dadurch aktiv gekühlt, gleichzeitig verringert die Verschattung durch die Pflanzen eine Aufheizung der Gebäudeoberfläche. Somit kann die Substitution technischer Systeme zur Kühlung der Gebäude reduziert werden oder entfällt gänzlich [Pfoser 2018, S. 144]. Neben den energetischen Vorteilen im Sommer kann eine Begrünung im Winter ebenfalls zur Wärmehaltung eines Gebäudes beitragen und als Puffer zwischen Umgebungstemperatur und Fassadenoberfläche dienen [Pfoser 2023, S. 29]. Dabei wirkt die Substrat- und Vegetationsschicht wie eine Dämmung [Brune et al. 2017, o.S.]. Die Temperaturunterschiede im Bereich der Luftpolsterung zwischen Begrünung und Fassade können bei Kletterpflanzen bis zu 3 °C [Bartfelder/Köhler 1987; Thönnessen 2002, o.S.] und bei wandgebundenen Systemen bis zu 7 °C [Köhler 2022, S. 114ff.] betragen.

Gleichzeitig wird der Einfluss klimatischer Faktoren wie Wind, Niederschlag oder Hagel von der äußeren Gebäudehülle ferngehalten. Dies führt zum Schutz von Fassadenbauteilen und fördert deren Lebensdauer [Brune et al. 2017, o.S.].

Fassadenbegrünungen können auch systemabhängig zur Reinigung von Grauwasser eingesetzt werden. So eignen sich wandgebundene Begrünungen mit Substratkörpern zur Filterung von Verunreinigungen und Schadstoffen [Pfoser 2023, S.23].

Zusätzlich können Fassadenbegrünungen in der Boden- oder Trog gebundenen Bauweise als außenliegender, natürlicher Sonnenschutz verwendet werden. Dazu werden Pflanzen mit transluzenten Blättern eingesetzt, die ein Durchscheitern des Lichts ermöglichen. Durch diese Art der Pflanzenverwendung können Wartungskosten für technische Systeme eingespart werden [Schmidt 2023, S. 47].

2.2.2 Potenziale zur Umfeldverbesserung

Fassadenbegrünungen haben einen positiven Einfluss auf ihr Umfeld [VM Baden-Württemberg 2012, o.S.]. Dabei tragen sie zur Verbesserung in verschiedenen Bereichen bei:

Regenwasserrückhalt, Regenwasserverdunstung, Vermeidung von Überhitzung, Reduktion der Luftbelastung, Minderung der Lärmbelastung, Akzeptanz/psychologischer Aspekt, Biodiversität sowie monetäre Vorteile [Pfoser 2018, S. 144].

Pflanzen können zur Verdunstung von Regenwasser und damit gleichzeitig zu einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit beitragen. Die Transpirationsleistung von Wasser durch Pflanzen an der Fassade wird aufgrund der vergrößerten Oberfläche potenziert. Durch den Vorgang der Transpiration der damit verbundenen adiabaten Kühlung können Hitzeinseleffekte in der Stadt reduziert werden. Adiabate Kühlung beschreibt den Energieverbrauch für den Wechsel des Aggregatzustandes von flüssigem Wasser zu Wasserdampf [UBA (Hrsg.) 1982, o.S.]. Die Luft wird dabei lokal befeuchtet und die gefühlte Temperatur maßgeblich gesenkt. Die Erhöhung der Wasseranteile in der Luft führt auch zu einer Agglomeratbildung von Partikeln. Dadurch werden feine Partikel zusammenschlossen und gebunden, wodurch sie weniger lungengängig sind [BAST (Hrsg.) 2010, S. 34].

Ein Effekt, der mit der Verdunstung einhergeht, ist die Reduzierung und Vermeidung von Hitzeentwicklungen in der Stadt [Pfoser 2018, S. 145]. Sogenannte *Urban Heat Islands*, auch städtische Wärmeinseln genannt, sind heute ein typisches Merkmal des Stadtklimas. Wärmeinseleffekte treten durch eine Lufttemperaturdifferenz zwischen dem urbanen Raum und dem kühleren Umland auf [DWD 2023, o.S.].

Ursache für die Wärmeentwicklung sind eine dichte Bebauungsstruktur, wärmespeichernde Baustoffe sowie eine zunehmende Flächenversiegelung und Nachverdichtung unbebauter Bereiche. Mit dem Einsatz von Fassadenbegrünungen kann die natürliche Verdunstungsleistung der Begrünungen genutzt und die Umgebung aktiv gekühlt werden. Zudem können sich unter der Begrünung liegende Fassadenbereiche durch die Verschattung nicht so stark aufheizen.

Weitere Leistungsfaktoren der Fassadenbegrünung sind die Reduktion von Luftbelastungen, die Bindung von Kohlenstoffdioxid und die Produktion von Sauerstoff durch Photosynthese von Pflanzen. Die Wirkungsintensität ist von der Pflanzengesellschaft, der Blattmasse, sowie der Bedeckungsdichte abhängig.

Die Filterung von Luftschadstoffen durch Pflanzen wird durch mehrere Parameter beeinflusst. So hängt sie unter anderem von der Exposition, der Pflanzenart, der Struktur der Pflanzung oder der Wüchsigkeit ab. Neben der Verbesserung der Luftqualität kann mit Fassadenbegrünung auch die Materialität auf der Gebäudeoberfläche durch ausbleibende chemische Beanspruchungen geschützt werden [IFS 2015, S. 71].

Sowohl vertikale als auch horizontale Begrünungsstrukturen weisen zudem erhebliche schalldämmende Eigenschaften auf. Die Intensität der Schalldämmung variiert dabei je nach Konstruktionsaufbau, Substratstärke und Bewässerung und der Frequenz des Schalls (Hz) [FLL-Fassadenbegrünungsrichtlinien 2018; Wong et al. 2010, o.S.]. Weiterhin sind der Begrünungsaufbau, der Belaubungszustand, die Blattfläche, sowie Blattdicke der

Pflanzen und die Oberflächenbeschaffenheit ausschlaggebend für die Absorptions- und Reflexionsleistung der Pflanzen [Wong et al. 2010, o.S.].

Einen wesentlichen Einfluss haben Fassadenbegrünungen auch auf das städtische Gesamtbild. So wirken sie sich positiv auf die menschliche Psyche aus und steigern das mentale Wohlbefinden [Hansen et al. 2019, o.S.]. Fassadenbegrünungen können zudem

wertvolle Lebensräume für zahlreiche Tierarten sein und tragen damit zur urbanen Biodiversität bei [Brune et al. 2017, o.S.]. Durch die unterschiedlichen Strukturen der Begrünung können sie eine große Vielzahl an Lebensbereichen für die urbane Fauna zur Verfügung stellen. [Köhler 1993, o.S.].

2.3 Umwelteinflüsse im urbanen Raum und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Urbane Räume als Lebensraum für den Menschen gewinnen in Deutschland und im weltweiten Kontext an Bedeutung. Aktuell leben etwa 55 % der Weltbevölkerung in Städten. Einige Prognosen beschreiben eine weltweite Zunahme bis zu 70 % im Jahre 2050 [WHO 2019, o.S.]. Zum Bevölkerungswachstum in den Städten kommt die Entwicklung einer immer älteren und damit anfälligeren Einwohnerschaft hinzu. Der demografische Wandel in Deutschland gründet auf einer Jahrzehnte hinweg niedrigen Geburtenrate, verbunden mit einem prozentual wachenden Anteil älterer Menschen an der Gesamtbevölkerung [Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (Hrsg.) 2021, o.S.]. Die Städte und urbanen Regionen stehen damit vor erheblichen Herausforderungen, einerseits die Lebensqualität zu halten, Maßnahmen zur Gesundheitsförderung einzuleiten und Anpassungen an den Klimawandel vorzunehmen. Der Einfluss von Grünflächen auf die Gesundheitsförderung ist Thema zahlreicher Studien. [Stiftung Die grüne Stadt (Hrsg.) 2009, S. 5]. Jedoch ist die Untersuchung der Auswirkungen des urbanen Raums und grüner Strukturen auf die Gesundheit des Menschen ein noch junges, interdisziplinäres Forschungsfeld, das Bereiche aus Medizin, der Soziologie, der Stadt- und Landschaftsplanung, der Psychologie und der Physiologie

beinhaltet [Stiftung „Die grüne Stadt“ (Hrsg.) 2009, S. 5]. Unter dem Begriff Urban Health werden diese Untersuchungen zusammengefasst [IPP (Hrsg.) 2014, S. 1]. Räumlich betrachtet nehmen „die gebaute Wohnumwelt, die soziale Umwelt und der Zugang zu Versorgungsstrukturen“ Einfluss auf diesen Bereich [IPP (Hrsg.) 2014, S. 1]. Zum einen werden Faktoren untersucht, die gesundheitsschädliche Auswirkungen auf den Menschen haben können. Zum anderen sind Umweltressourcen von Bedeutung, die gesundheitsfördernd und -erhaltend wirken können [IPP (Hrsg.) 2014, S. 1]. Im Folgenden wird eine Annäherung an den idealen Gesundheitszustand eines Menschen vorgenommen. Darauf aufbauend werden verschiedene Einflussfaktoren im urbanen Raum und deren Einfluss auf die menschliche Gesundheit dargestellt. Dabei wird der Einfluss von Luftschadstoffen tiefergehend betrachtet. Abschließend wird in diesem Kapitel der Frage nachgegangen, wie ein für den Mensch gesunder Stadtzustand aussehen kann.

2.3.1 Der ideale Gesundheitszustand eines Menschen

Der Zustand einer „guten Gesundheit“ wurde von der WHO anlässlich ihrer Konstituierung 1946 wie folgt definiert:

„Gesundheit ist ein Zustand vollkommenen, körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens und nicht allein das Fehlen von Krankheit und Gebrechen.“
[WHO 1946, S. 9]

Gesundheit hängt demnach von vielen Faktoren ab. Die geistige Gesundheit hat Einfluss auf emotionale und subjektive Zustände wie Zufriedenheit, Freude, Glück und Selbstwertgefühl. Soziales Wohlbefinden hingegen umfasst Gefühlszustände wie Sicherheit, Liebe und soziale Kontakte [WHO 1946, S. 9].

Gesellschaftlich gibt es zahlreiche Ansätze, um gesund zu bleiben. Die Beantwortung der Frage, wie man die Gesundheit des Menschen aufrechterhält, ist jedoch komplex, da sowohl körperliche als auch geistige Faktoren die Gesundheit eines Menschen beeinflussen können.

Ein Modell, das sich mit der Gesundheit und deren Erhaltung auseinandersetzt, ist das Konzept der Salutogenese nach Antonowsky (lateinisch: salus = Gesundheit/Wohlbefinden, genese = Entstehung). Grundprinzip dieses Modells ist die These, dass der menschliche Organismus permanent natürlichen und anthropogenen Einflüssen ausgesetzt ist und diese eine Störung in der Ordnung, bzw. der Gesundheit bewirken. Gesundheit als Zustand der menschlichen Verfassung ist kein Gleichgewichtszustand, sondern muss unter der Auseinandersetzung mit krankmachenden Einflüssen permanent neu aufgebaut werden [ARL 2018, S. 84].

Demnach wird unterschieden zwischen den Faktoren, die die Gesundheit der Menschen fördern, und jenen, die ihren Gesundheitszustand negativ beeinflussen. Der positive Einfluss von Grün und Naturflächen auf die menschliche Gesundheit ist allgemein anerkannt und wissenschaftlich bewie-

sen [Stiftung Die grüne Stadt (Hrsg.) 2009, S. 9]. Verschiedene Stadtentwicklungskonzepte wie die Verbesserung blau-grüner Infrastrukturen oder der Ausbau von Rad- und Fußgängerwegen, sowie der Neubau und die Erhaltung zentraler Grünflächen zielen darauf ab, die Gesundheit von Menschen zu fördern. Unter dem Prinzip der „15-Minuten-Stadt“ werden Entwicklungen vereint, die es ermöglichen sollen, alle notwendigen Besorgungen in einem Umkreis von 15 Minuten zu erledigen [Reikowski 2023, o.S.]. Dadurch sollen sowohl Verkehrswege, als auch psychischer Stress minimiert werden.

Weltweit arbeiten Städteplaner, Architekten und Landschaftsarchitekten, in Kombination mit weiteren Fachdisziplinen daran, Städte lebenswerter zu gestalten. Dennoch befinden sich in der Stadtumwelt Faktoren, die die menschliche Gesundheit negativ beeinflussen. Einige hängen mit der Konzentration von Menschen und Infrastrukturen zusammen, andere sind negative Folgen städtischer Erwärmung, die durch den Klimawandel weiter verstärkt wird. Die wesentlichen negativen Einflussfaktoren und deren Wirkung auf den menschlichen Organismus werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

2.3.2 Einflussfaktor Temperatur

In Wettervorhersagen und Klimaszenarien wird die Temperatur üblicherweise als tatsächliche Temperatur angegeben. Jedoch ist das Temperaturempfinden eines Menschen individuell und entspricht der tatsächlichen Temperatur nur, wenn man sich mit angemessener Kleidung und bei mittlerer Luftfeuchtigkeit im Schatten befindet [DWD 2023, o.S.]. Menschen in einer schlechten körperlichen Verfassung, wie ältere oder kranke Personen, Schwangere, Säuglinge oder Kleinkinder und Menschen, die hitzeempfindlich sind, können Temperaturen insbesondere an Hitzetagen anders wahrnehmen.

Untersuchungen des Deutschen Wetterdienstes mit einem Klima-Modell haben ergeben, „dass die gefühlte Temperatur unter sommerlichen Bedingungen wesentlich schneller als die Lufttemperatur steigt.“ [DWD 2023, o.S.].

Hohe Temperaturen haben unterschiedliche Auswirkungen auf den menschlichen Körper. Eine Überhitzung des Körpers mit dem damit einhergehendem Wasser- und Elektrolytverlust kann das Gehirn, die Nieren und das gesamte Herz-Kreislauf-System belasten. Der Einfluss von Hitze kann sich auch negativ auf bestehende Erkrankungen auswirken und im Ernstfall zum Tod führen. Insbesondere in heißen Sommern kann eine erhöhte Sterblichkeit aufgrund von anhaltender Hitze festgestellt werden [LGA Baden-Württemberg 2024, o.S.]. Im Zusammenhang mit weiteren negativen Einflüssen, wie starkem Pollenflug, erhöhtem bodennahem Ozon, Luftschadstoffen oder einer erhöhten UV-Strahlung, kann sich die Auswirkung von Hitze intensivieren. Hitzebedingte Beschwerden können sich wie folgt äußern:

- Exsikkose (Austrocknung des Körpers)
- Hitzeerschöpfung
- Hitzeausschlag
- Hitzekollaps
- Hitzekrämpfe
- Hitzeödem
- Sonnenstich

Zur Vermeidung der hitzebedingten Auswirkungen sollte direkte Hitze vermieden und es sollten Maßnahmen ergriffen werden, die aktiv zur Körperkühlung beitragen. Gleichzeitig können angepasste Ess- und Trinkgewohnheiten zu einer besseren körperlichen Verfassung während einer Hitzeperiode beitragen [LGA Baden-Württemberg 2024, o.S.]. Steigende Temperaturen in den Innenstädten, verbunden mit vielen wärmespeichernden Materialien aus Hochbau und Infrastruktur, sorgen für eine verringerte Luftfeuchtigkeit. Der Großteil des anfallenden Regenwassers wird über die Kanalisation abgeleitet und nicht in den lokalen kleinen Wasserkreislauf zurückgeführt. Die verringerte Luftfeuchtigkeit erhöht die Gefahr der Aufnahme von Luftschadstoffen oder Krankheitserreger aufgrund ausgetrockneter Schleimhäute.

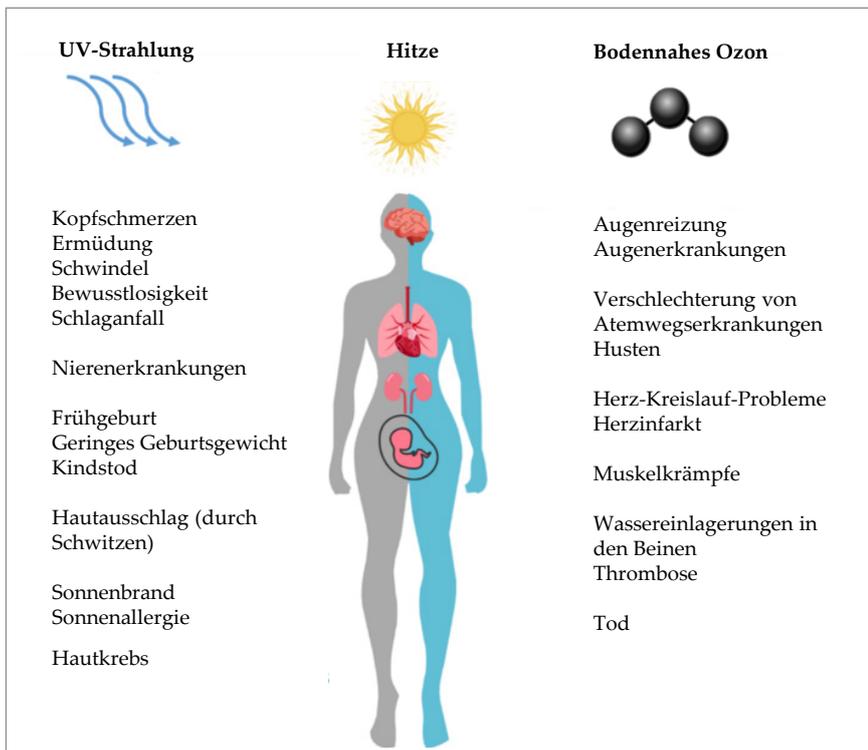


Abbildung 14: Gesundheitliche Folgen von Hitze (LGA Baden-Württemberg 2024, geändert).

2.3.3 Einflussfaktor Strahlung

Ein weiterer Parameter, dem Menschen ausgesetzt sind, ist die ultraviolette (UV-) Strahlung, mit einem Wellenlängenbereich zwischen 100 nm bis 400 nm. Sie ist für den Menschen nicht sichtbar und nicht wahrnehmbar. Jedoch übt sie bei Einwirkung auf die Haut oder die Augen sofortige oder langfristige Effekte aus, bis hin zu Augenentzündungen und Linsentrübungen. Gleichzeitig steigt das Risiko für Hauterkrankungen, Sonnenallergie und Krebserkrankungen [BFS 2024, o.S.]. Die Zunahme an Sonnenstunden, bedingt durch klimatische Veränderun-

gen, korreliert mit dem Einfluss und der Stärke von UV-Strahlung. Mit zunehmenden Sonnenstunden steigt der Bedarf an Schutzmaßnahmen, beispielsweise Schattenplätzen in den Innenstädten [BMUV 2023, o.S.]. Auch wenn Bäume die UV-Strahlung um etwa 20 % reduzieren, sind weitere Schutzmaßnahmen wie angepasste Kleidung oder Sonnenschutz erforderlich [Lorenz 2022, o.S.].

2.3.4 Einflussfaktor Niederschlag

Eine weitere Folge der klimatischen Veränderungen ist die Zunahme von Starkregenereignissen. Starkregen wird durch ein Niederschlagsereignis definiert das sehr kleinräumig auftritt aber große Wassermengen verursacht. Sie entstehen durch das Prinzip der Konvektion, indem Temperaturunterschiede starke Aufwärtsbewegungen von feuchtwarmen Luftmassen erzeugen. Die entstehenden Regenwolken können punktuell zu plötzlichem und intensivem Abregnen führen. Eine Vorhersage von Ort und Intensität ist nur sehr kurzfristig vor dem Ereignis möglich [LFU Bayern 2024, o.S.]. Erfolgreiche Schutzmaßnahmen können deshalb nur selten getroffen werden. Durch eine dichte Bebauungsstruktur

und großflächige Versiegelung in urbanen Bereichen können Starkregenereignisse in der Regel nicht durch die Oberflächen aufgenommen werden. Zwangsläufig wird das Wasser abgeleitet, was zu einer Überlastung der örtlichen Kanalisation führt. Gleichzeitig dringt das Wasser an tiefgelegene Punkte, wie Keller, Schächte oder Leitungen, wodurch es zu Schäden an Infrastruktur und Gebäuden kommt. Aus besonders starken Regenereignissen, mit einem hohen Oberflächenabfluss und ansteigenden Wasserständen können sich auch kräftige Abflusswellen und Sturzfluten bilden. Sie treten zwar nur lokal auf, stellen aber eine erhebliche Gefahr dar.

2.3.5 Einflussfaktor Lärm

Umwelt- oder Umgebungslärm ist ein bedeutendes Gesundheitsproblem in Europa [EU-Kommission 2017, o.S.]. Aufgrund der zunehmenden Anzahl an Menschen, die in Städten leben, betrifft Umweltlärm weite Teile der Bevölkerung. Nach der sogenannten EU – Umgebungslärmrichtlinie werden unter Umgebungslärm Geräusche im Freien verstanden, die durch Men-

schen verursacht werden [Art. 3. RL 2002/49/EG] Hauptursache für eine Lärmbelastung wie auch die subjektiv wahrgenommene Lärmbelastung ist der Straßenverkehrslärm [IPP (Hrsg.) 2014, S. 2]. Die Erfassung der Lärmbelastung erfolgt derzeit mithilfe von Karten und Modellen. Schätzungen gehen davon aus, dass aktuell die Hälfte der Bevölkerung in Deutsch-

land durch Straßenverkehrslärm von mindestens 55 dB tagsüber und 45 dB nachts belastet wird. In Innenstädten wird Umgebungsschall von den harten Oberflächen der Infrastruktur reflektiert und breitet sich ungehindert aus. Die Belastung von Lärm wirkt sich dabei unterschiedlich auf den Körper aus. Wissenschaftlich erwiesen sind Beeinträchtigungen der Konzentrationsfähigkeit und des Wohlbefindens

sowie der gesundheitsbezogenen Lebensqualität. Durch ständigen Verkehrslärm kann sich aber auch das Risiko für Depressionen erhöhen [IPP (Hrsg.) 2014, S. 1]. Daneben können als Stressreaktion des Körpers Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schlafstörungen oder Bluthochdruck entstehen [EU-Kommission 2017, o.S.].

2.3.6 Einflussfaktor Luftschadstoffe

Menschen nehmen Stoffe aus ihrer Umwelt auf. Handelt es sich dabei um Stoffe, die einen potenziell negativen Einfluss auf die menschliche Gesundheit haben, spricht man von Schadstoffen. Unter Luftverunreinigungen werden gemäß des Bundes-Immissions-Schutzgesetzes (BImSchG) Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft bezeichnet. Darunter fallen Rauch, Ruß, Staub, Gase, Aerosole, Dämpfe oder Geruchsstoffe [LUBW (Hrsg.) 2024, o.S.]. Unter Emissionen werden Stoffe zusammengefasst, die von einer Quelle (Emittent) aus als feste, flüssige oder gasförmige Substanz in die Atmosphäre gelangen. Als Immission gelten Einflüsse der Umgebung auf den Menschen, wie Luftschadstoffe oder andere Umweltparameter [LUBW (Hrsg.) 2024, o.S.]. Zu den wesentlichen Luftschadstoffen im urbanen Raum zählen partikuläre Luftschadstoffe wie Staub, Ozon, Stickstoffoxide und Schwefeldioxide [Umweltbundesamt Österreich 2023, o.S.]. Diese Stoffe sind bedeutende Risikofaktoren für die menschliche Gesundheit. Gleichzeitig haben sie einen erheblichen Einfluss auf die Mortalität, also die Sterblichkeit, und die Morbidität, also das Verhältnis der Erkrankten zur Gesamtbevölkerung, ausgelöst durch chronische Erkrankungen [IPP (Hrsg.) 2014, S. 7]. Eine Großzahl der Studien, die sich mit den Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die menschliche Gesundheit beschäftigen,

betrachten die Beeinträchtigung der Atemwege und Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System, nach dem Einatmen von Schadstoffen. Jedoch können einige Stoffe nicht nur durch die Atmung in den menschlichen Körper gelangen, sondern auch über jeden Teil des Körpers, beispielsweise die Haut oder die Augen, aufgenommen werden [IEK 2024, o.S.].

Zum Schutz der Menschen vor den Auswirkungen von Luftschadstoffen wurden Grenzwerte definiert (siehe Kapitel 2.4.4). Jedoch treten negative gesundheitliche Auswirkungen nicht nur oberhalb gewisser Grenzwerte ein. Insbesondere Personen mit Vorerkrankungen, ältere Menschen oder Kinder können stärker von den Auswirkungen betroffen sein. In der Wissenschaft wird von einer wahrscheinlich linearen „Dosis-Wirkung-Beziehung“ ausgegangen [SMC (Hrsg.) 2017, S. 2]. Demnach gibt es keine Konzentration, die nicht schädlich für den menschlichen Körper ist.

Die gesundheitlichen Auswirkungen sind abhängig von der Größe der Partikel, der sogenannten Partikelmassekonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), sowie der Partikelanzahl pro Kubikmeter Luft (Partikel/ m^3). Zusätzlich haben die physikalischen und chemischen Eigenschaften Einfluss auf den Menschen. Die Partikeloberfläche und -struktur bestimmen, ob sich an den Partikeln

weitere Stoffe anlagern können. Partikelagglomerate können verschiedene Gase, anorganische und organische Stoffe, wie Metalle oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, sowie chemisch-biologische Systeme zusammenschließen. In den organischen Stoffen sind Pilzsporen, Pollen, Bakterien oder Viren eingeschlossen [HLNUG 2007, S. 3].

Der Atmungsapparat des Menschen weist eine Fläche von insgesamt etwa 140 m² auf. Mit jedem Atemzug nehmen Menschen Millionen von Partikeln in unterschiedlicher Art und Größe auf, die sich in Abhängigkeit von ihrem aerodynamischen Durchmesser im Atemtrakt ablagern können [HLNUG 2007, S. 3].

Mit unterschiedlichem Durchmesser erreichen die Partikel verschiedene Regionen im Atemtrakt. Der Weg der Atemluft führt, wie in *Abbildung 15* dargestellt, über die Nasenhöhlen oder die Mundhöhle durch den Rachenraum in die Bronchien und in den rechten und linken Lungenflügel. Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser zwischen 10 und 2,5 µm

werden durch die Atmung bis in den Nasen- und Rachenraum transportiert. Sie können aber auch weiter bis in den oberen Bereich der Bronchien vordringen. Bleiben hier Partikel haften, können sie über Schleimsekretionen und mithilfe von Flimmerhaaren in Richtung Kehlkopf abtransportiert werden. Hier können sie ausgehustet oder durch Schlucken in den Magen-Darm-Trakt überführt werden [HLNUG 2007, S. 4]. Bei einer Atmung durch die Nase kann die Belastung von Feinstaub für die Lunge deutlich reduziert werden. Die Nasenschleimhaut kann in intaktem, feuchtem Zustand Teilchen mit einer Größe von mehr als 2,5 µm filtern [NZZ 2006, o.S.].

Partikel mit einem kleineren aerodynamischen Durchmesser zwischen 2,5 und 0,1 µm können dagegen wesentlich tiefer in den Atemtrakt vordringen - bis zu den Bronchien und Bronchiolen [HLNUG 2007, S. 4]. Die Teilchen können sich dort für mehrere Wochen festsetzen, bevor sie über Schleimsekretionen und Flimmerhaare abtransportiert werden. Durch die geringe Eigenbeweglichkeit werden Partikel zwischen 1 und 0,1 µm nur zu

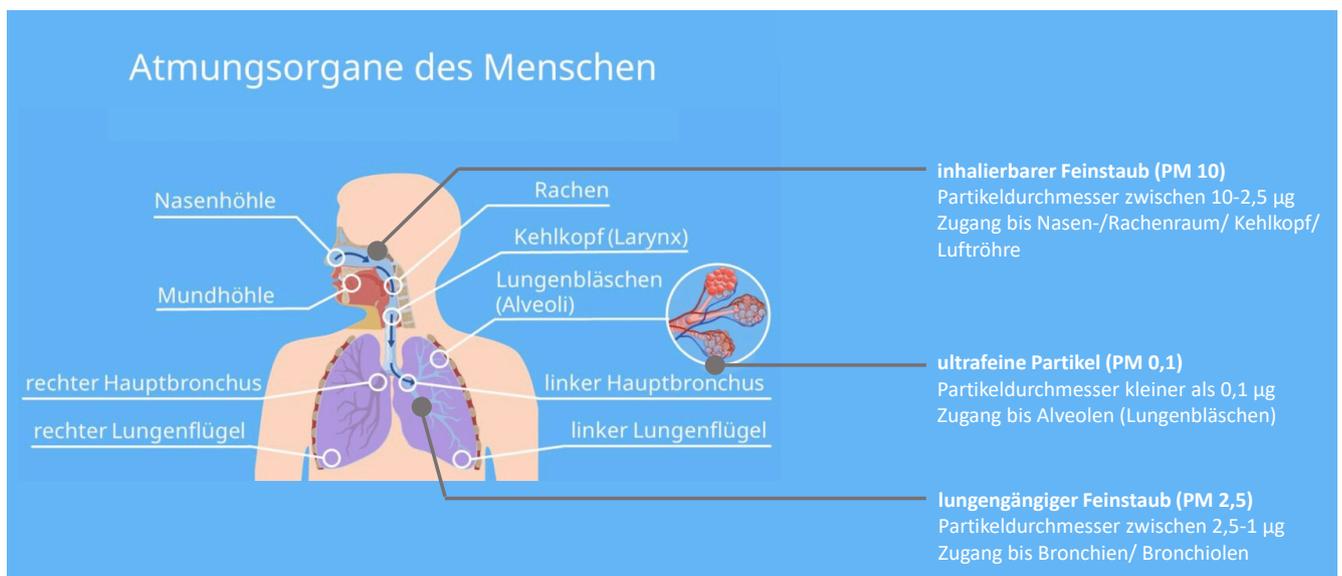


Abbildung 15: Atmungsorgane des Menschen – der Weg der Luft in den Körper [Blech 2023, geändert].

etwa 20 % im Atmungstrakt abgelagert. Sie werden in der überwiegenden Anzahl mit der Atmung aus dem Körper befördert. Ultrafeine Partikel, die kleiner als $0,1\mu\text{m}$ sind, können mit der Atmung bis in die Lungenperipherie dem Bereich, in dem der Gasaustausch stattfindet vordringen. Dort befinden sich die Alveolen, die Lungenbläschen, in denen sich ultrafeine Partikel über Jahre anreichern können. Durch ihr tiefes Vordringen in den menschlichen Atmungstrakt, geht von den ultrafeinen Partikeln eine besonders hohe Gesundheitsgefahr aus. Sie können zu Entzündungen im Alveolenbereich führen, wodurch die Immunabwehr gemindert wird, woraus wiederum eine erhöhte Infektanfälligkeit entstehen kann. Auch können die Partikel vom Gasaustauschbereich in die Blutbahn und so in andere Organe gelangen. Hieraus können Folgen wie Herz-Rhythmus-Störungen, Verengungen von Gefäßen, die Zunahme von Entzündungsfaktoren im gesamten Körper und die Zunahme von Blutgerinnung entstehen [HLNUG 2007, S. 4].

In der Lunge können durch Feinstaub verursachte Entzündungen, in Kombination mit genetischen Mutationen, die Entstehung von Tumoren begünstigen [Bayerischer Rundfunk, 2023, o.S.]. Die am häufigsten auftretende chronische Erkrankung sind Allergien. Sie können durch Luftschadstoffe ausgelöst und in ihrer Entwicklung begünstigt werden. Sie entstehen, in dem der Körper das Allergen bei einem Kontakt als schädlich einstuft und als Folge darauf eine Reaktion entwickelt. Bei erneutem Kontakt entstehen somit Entzündungsreaktionen. Mit Veränderung des Klimas und der Freisetzung von Luftschadstoffen verändern sich das Wachstum, die Blütezeit und die Allergenität von Pollen. In verschiedenen Studien konnte ein Zusammenhang zwischen der Ozonkonzentration in der Luft und dem allergischen Potenzial beobachtet werden [IEK 2024, o.S.].

Die zuvor genannten Folgen und Reaktionen aufgrund von Luftschadstoffen und Feinstaubbelastungen treten nicht erst oberhalb gewisser Grenzwerte auf. Jede Konzentration hat eine Auswirkung und einen gesundheitlichen Effekt auf den menschlichen Körper. Umgekehrt kann eine Verringerung der Feinstaubexposition zu einer Verringerung der gesundheitlichen Auswirkungen führen [HLNUG 2007, S. 4f.]. Eine Verringerung von Luftschadstoffbelastungen trägt daher zum Schutz der menschlichen Gesundheit und einem gesunden Lebensraum für den Menschen bei.

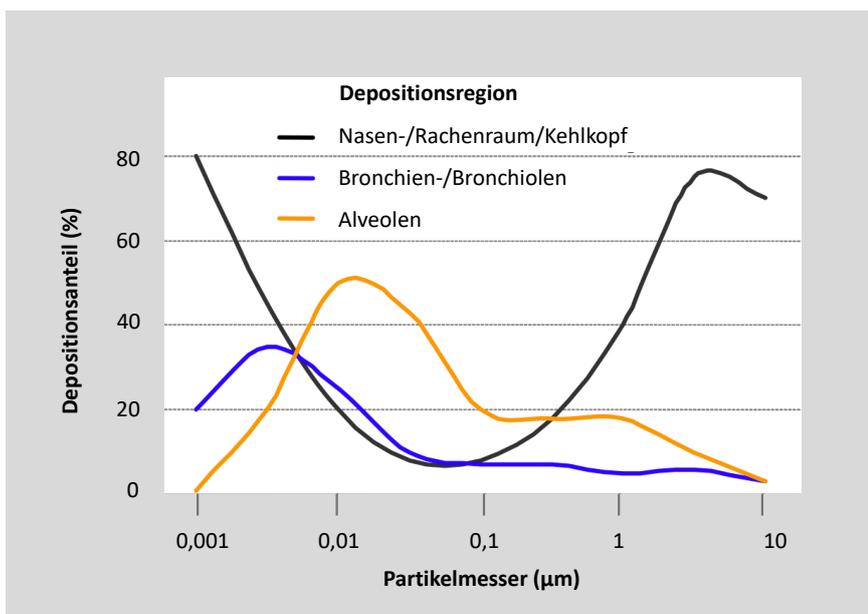


Abbildung 16: Depositionsregion von Partikeln im menschlichen Körper in Abhängigkeit von ihrem aerodynamischen Durchmesser (HLNUG 2007, geändert).

2.3.7 Wie sieht ein für den Menschen gesunder Stadtzustand aus?

Mit zunehmenden klimatischen Veränderungen steigen die Belastungen und Einwirkungen auf den menschlichen Körper. Erhöhte Temperaturen, erhöhte Strahleneinwirkung, niedrigere Luftfeuchtigkeit und eine hohe Konzentration an Luftschadstoffen üben einen ständigen Einfluss auf den Körper aus. Einen gesunden Stadtzustand für den Menschen herzustellen bedeutet, negative Belastungen für die Umwelt und den Menschen zu reduzieren und gleichzeitig gesundheitsfördernde Maßnahmen auszuweiten [Naturkapital Deutschland, S.6]. Nach Antonowskys Modell der Salutogenese werden dafür nicht nur die Faktoren thematisiert, die den Menschen krank machen, vielmehr wird der individuelle Entwicklungs- und Erhaltungsprozess von Gesundheit in den Fokus gerückt. Beide Seiten, Krankheit und Gesundheit werden dabei nicht getrennt, sondern als Kontinuum betrachtet [BMSGKP 2024, o.S.]. Zahlreiche Initiativen beschäftigen sich mit der Gesundheitsförderung von urbanen Räumen. Die Initiative Gesunde Städte - Netzwerk der Bundesrepublik Deutschland ist ein freiwilliger Zusammenschluss von Kommunen und setzt Konzeptionen zur gesunden Stadt auf kommunaler Ebene um [Magistrat der Stadt Frankfurt 2024, o.S.]. Sie basiert auf den in der Ottawa-Charta der WHO manifestierten Grundlagen zur Schaffung von gesunden Lebenswelten. Diese Charta ist ein grundlegender Meilenstein für die Umsetzung von gesundheitsfördernden Maßnahmen in den städtebaulichen Leitbildern. Dabei wird die Gesundheit nicht als Ziel, sondern als Ressource des täglichen Lebens betrachtet [ARL 2018, S. 61ff.]. Um das Thema Gesundheit in der Stadtentwicklung zu integrieren, gilt es Themen wie Gesundheitsförderung, Chancengleichheit, nachhaltige Mobilität oder Klimaanpassung über Konzepte und Leitbilder zu formulieren. Anschließend müssen sie in räumlich baulichen Maßnahmen Anwendung finden [ARL 2018, S.61ff.]. Maßnahmen zur Gesundheitsförde-

rung umfassen die Bereiche Kultur, Integration, Mobilität, Versorgung, Umwelt, Natur und weitere Themenfelder, die in einem strategischen Netzwerk, einen positiven Beitrag zum Themenkomplex Gesunde Stadt leisten können. Besondere Bedeutung zur Verringerung negativer gesundheitlicher Belastungen kommt die Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs zu. Hierdurch können verschiedene Emissionen im Stadtraum verringert werden und gleichzeitig neue Flächen für soziale Interaktion und Integration von Grün im urbanen Kontext entstehen. Es gibt zahlreiche Studien, die den positiven Beitrag und die Wirkung von Grün in der Stadt thematisieren. Bäume, Grünflächen und Parkanlagen tragen zur Erhaltung eines gesunden Stadtklimas bei, indem sie Schadstoffe aus der Luft filtern, Sauerstoff produzieren, die Temperatur regulieren und darüber hinaus einen positiven Einfluss auf die menschliche Psyche ausüben. Nach *Stiftung Die grüne Stadt* können die gesundheitsfördernden Wirkungen von Grün nach der Art der Grünanlage in unseren Städten differenziert werden:

Art der Grünanlage	Vorwiegende Effekte
Grün im Wohnumfeld	Verbesserung des psychischen und physischen Wohlbefindens
	Steigerung der Konzentrationsfähigkeit
	Verminderung von Aggression und Ärger
	Steigerung sozialer Kontakte
	Stressabbau
Parks	Verbesserung des psychischen und physischen Wohlbefindens
	Verbesserung der sozialen Gesundheit
	Stressabbau und Erholung
	Motivation zur Bewegung
Gemeinschaftsgärten	Integration sozial und wirtschaftlich benachteiligter Menschen
	partielle Selbstversorgung durch Gartenarbeit
	Aufbau sozialer Kontakte und sozialer Integration
	Schaffung sinnvoller, befriedigender Beschäftigungen
Therapeutische Gärten	Linderung von Stress, Angst und Schmerzen bei den Patienten
	Stressabbau beim Krankenhauspersonal
	Muskelentspannung durch Stressabbau und leichte, angemessene Tätigkeiten
	Verkürzung der Genesungszeit
	Integration von Menschen, denen der Aufenthalt im Freien aus gesundheitlichen Gründen schwer fällt
Innenraumbegrünung	Verbesserung der Luftqualität
	Reduzierung von Beschwerden wie Kopfschmerzen, Müdigkeit, Halsreizungen, trockenen Augen
	Reduzierung von Stress
	Steigerung der Konzentrationsfähigkeit
	Verbesserung des psychischen Wohlbefindens
(Stadt-) Wald	Stressabbau durch Bewegung und Anregung der verschiedenen Sinne
	Stressabbau durch Ruhe und Frischluft
	Vermittlung von Identität und Lebensbezug
	Erholung durch Naturnähe

Abbildung 17: Gesundheitsfördernde Wirkungen von Grün, unterschieden nach Arten von Grünanlagen (Stiftung Die grüne Stadt (Hrsg.) 2009).

2.4 Luftschadstoffbelastungen im urbanen Raum

Die Auseinandersetzung um reine Luft in den Städten wird seit vielen Jahrzehnten geführt. Insbesondere die Nachkriegszeit ging durch die Produktionssteigerung und Wirtschaftsleistung mit einer drastisch gestiegenen Luftverschmutzung einher [Brüggermeier et al. 1992, S. 63]. Im Ruhrgebiet gibt es zahlreiche Berichte über die Zunahme von Luftverunreinigungen. Damals wurde die zunehmende Staubbelastung noch als „Ärgernis“ betitelt. In den 1950er Jahren haben sich in Nordrhein-Westfalen rund 600.000 t Staub pro Jahr sedimentiert, davon mehr als die Hälfte im Ruhrgebiet. Zeitweise fielen durch Verfeuerung fossiler Brennstoffe etwa fünf Kilogramm Staub je 100 m² monatlich an [Brüggermeier et al. 1992, S.63], eine Menge, die unter heutigen gesundheitlichen Aspekten unvorstellbar ist. Auch wenn wir in Deutschland in den vergangenen 30 Jahren bedeutende Fortschritte in der Luftreinhaltung gemacht haben, besteht in zahlreichen Metropolen der Welt immer noch eine akute Gefahr durch Luftverschmutzungen [UBA (Hrsg.) 2019, S.3]. Nach der WHO sind neun von zehn Menschen weltweit verschmutzter Atemluft ausgesetzt. Schätzungen zufolge sterben allein in Euro-

pa rund 600.000 Menschen aufgrund von Luftverschmutzungen frühzeitig. Verschmutzte Atemluft stellt insbesondere für Kinder und ältere Menschen ein erhöhtes gesundheitliches Risiko dar [siehe Kapitel 2.3.6; WHO 2019, o.S.]. Die WHO hat über Jahre hinweg Studien zu Luftschadstoffbelastungen ausgewertet und Empfehlungen für Belastungsgrenzen ausgesprochen, die häufig unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte liegen. Trotzdem werden die empfohlenen Werte der WHO vielfach nicht eingehalten [UBA (Hrsg.) 2019, S. 3].

Ursache für eine Verunreinigung der Luft sind in urbanen Bereichen überwiegend Schadstoffe aus der Landwirtschaft, aus Kohlekraftwerken, Industrieanlagen, aus Privathaushalten oder dem Verkehr. Luftschadstoffbelastungen haben demnach vielfältige Ursachen und können unterschiedlich kategorisiert werden. Im folgenden Kapitel werden die Bestandteile von Luft betrachtet. Zudem werden einzelne Luftschadstoffe und deren Entstehung differenziert aufgeführt und die jeweiligen Grenzwerte beziffert.

2.4.1 Bestandteile von Luft und städtischer Lufthaushalt

Die Luft innerhalb der Erdatmosphäre ist ein Stoffgemisch aus verschiedenen Gasen. Im trockenen Zustand besteht es im Wesentlichen aus den zwei Hauptbestandteilen Sauerstoff, mit 20,95 Vol.-%, und Stickstoff, mit 78,08 Vol.-%. Hinzu kommen eine Reihe von Edelgasen wie Argon, Helium, Krypton und Xenon, sowie weitere Spurenstoffe. Hierzu zählen Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan und Wasserstoff. Der Anteil der Edelgase und Spurenstoffe liegt insgesamt unter einem Volumenprozent. Die Zusammensetzung der natürlich vorkommenden Gase ist in der gesamten Erdatmosphäre weitgehend gleich,

zeit- und gebietsweise können jedoch Veränderungen in der Zusammensetzung bei den Spurengasen auftreten. Häufig werden diese Veränderungen durch natürliche Prozesse wie Vulkanausbrüche ausgelöst [LUBW (Hrsg.) 2024, o.S.]. Jedoch können auch anthropogene Luftbeimengungen für eine geringfügige Veränderung der Grundzusammensetzung führen. Hierzu zählen insbesondere die Stoffe Kohlendioxid, Methan und Schwefeldioxid, die beispielsweise einen Einfluss auf das Klima ausüben. Neben diesen Gasen wird die Luft zudem mit weiteren festen, flüssigen oder gasförmigen Verbindungen ange-

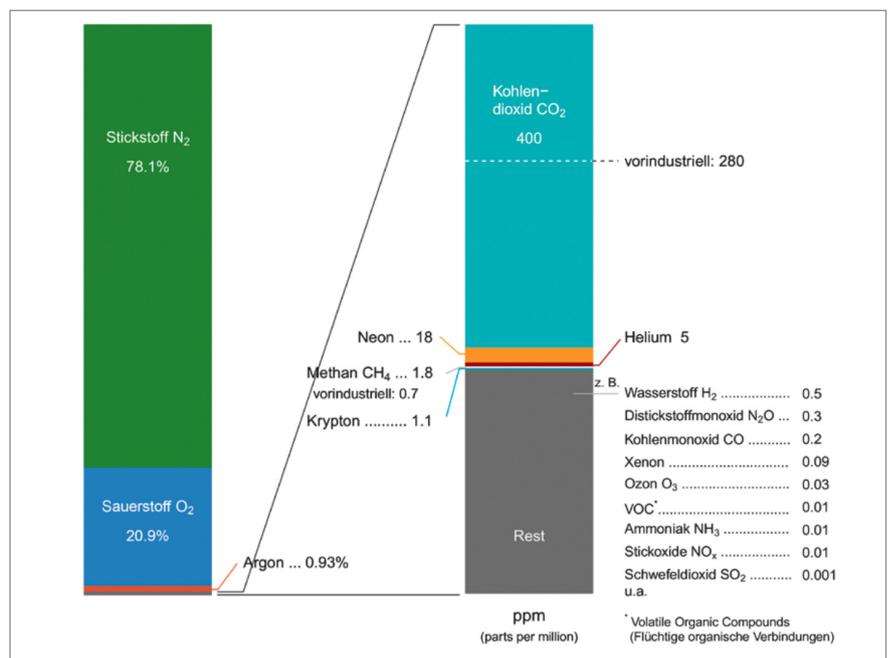
reichert:

- Wasserdampf, dessen Gehalt in der Atmosphäre zeitlich sowie regional schwankt und im Mittel 0,4 Vol.-% beträgt
- Staubpartikel
- Aerosole (kleine, in der Luft schwebende feste und flüssige Partikel)
- Schwefel- und Stickstoffverbindungen
- flüchtige organische Verbindungen (VOC)
- Ozon (Sekundärprodukt, regionale und zeitliche Unterschiede)
- in der Atmosphäre erzeugte Radikale [LUBW (Hrsg.) 2024, o.S.].

Diese Verbindungen und Anteile können regional sehr unterschiedlich sein und sich wiederum aus verschiedenen Bestandteilen zusammensetzen, beispielsweise die Gruppe der Aerosole. Bei einer hohen Verdunstungsleistung und damit einer hohen Luftfeuchtigkeit kann der Anteil an Partikeln in der Luft reduziert werden. Durch die Verbindung mit Wasser können sich einzelne Partikel agglomerieren. Durch den Zusammenschluss verändert sich der aerodynamische Durchmesser, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Absinkens und Abscheidens höher ist. Grundsätzlich lassen sich die Stoffe, die der Luft beigemischt werden, nach ihrer Entstehungsart in natürliche und anthropogene Stoffe unterscheiden. Zu den natürlichen Stoffen zählen Wüstenstaub, Vulkanasche, Pollen, Bakterien, Pilzsporen, Erosion, Waldfeuer oder Meersalz. Hinzu kommen weitere Bestandteile, die anthropogen erzeugt werden, beispielsweise durch den Straßenverkehr oder Industrie-prozesse. Gemäß der Art der Entstehung wird zudem nach primär und sekundär gebildeten Luftschadstoffen unterschieden. Stoffe können in der Luft, im gasförmigen Zustand Reaktionen miteinander eingehen und daraus weitere, gesundheitsschädliche Verbindungen bilden [Viering 2019, o.S.]. Der städtische Lufthaushalt wird bestimmt durch eine Basis der oben genannten

Ausgangsstoffe der Luft, ohne die es kein Leben gäbe. Hinzu kommen die vielen natürlichen oder anthropogenen festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffe, die sich in der Luft befinden können. Regional können sich die stofflichen Zusammensetzungen stark unterscheiden. Im weltweiten Vergleich sind insbesondere Länder mit einem niedrigeren Entwicklungsstand von schlechter Luft in den Städten betroffen. Dabei sind nicht nur Faktoren aus dem Verkehr die Verursacher. Häufig tragen auch Kleinfeuerungsanlagen aus Privathaushalten oder bestimmte Industriezweige zu einer schlechteren Luftqualität bei. Laut einer Schätzung der WHO atmen rund 99 % der Weltbevölkerung, die in Städten lebt, Luft, die die Grenzwerte nicht einhält [WHO 2022, o.S.]. Auch wenn die Luftbelastung in den vergangenen Jahrzehnten stark zurückgegangen ist, sind die Werte noch nicht unbedenklich. Die Grenzwerte wurden vor rund 20 Jahren festgelegt worden und entsprechen deshalb nicht den heutigen Erkenntnissen über die gesundheitlichen Auswirkungen von Luftverschmutzung.

Abbildung 18: Chemische Zusammensetzung der Luft (DWD 2014).



2.4.2 Feinstaubbelastung und Deposition im urbanen Raum

Luftschadstoffe befinden sich in der Atmosphäre und können über weite Strecken transportiert werden. Der anschließende Austrag von luftgetragenen Partikeln aus der Atmosphäre an die Erdoberfläche wird Deposition genannt. Der Eintrag von Partikeln lässt sich in drei Arten unterteilen:

1. **Nasse Deposition:** Der Eintrag von luftgetragenen Partikeln durch Niederschlagsereignisse wie Regen, Schnee oder Hagel.
2. **Feuchte Deposition:** Bindung von luftgetragenen Partikeln durch Feuchtigkeit wie allgemeine Luftfeuchtigkeit, Nebel- oder Wolkentröpfchen.
3. **Trockene Deposition:** Ablagerung von luftgetragenen Partikeln an Böden, Vegetation und Oberflächen durch mikroskalige turbulente Luftströmungen oder Sedimentation [UBA (Hrsg.) 2023, o.S.].

Grundsätzlich wird Feinstaub in drei Größenfraktionen unterschieden, die je nach Beschaffenheit und Herkunft einen unterschiedlichen Einfluss auf die menschliche Gesundheit haben (*siehe Kapitel 2.3.6*):

- Grobstaub mit einem Partikeldurchmesser von mehr als 10 µm,
- inhalierbarer Grobstaub (PM10) mit einem Partikeldurchmesser zwischen 2,5 und 10 µm (diese Fraktion und PM2,5 werden in der Forschung teilweise als Feinstaub PM10 zusammengefasst),
- Feinstaub (PM2,5) mit einem Partikeldurchmesser von weniger als 2,5 µm,
- Ultra-Feinstaub (PM0,1) mit einem Partikeldurchmesser von weniger als 0,1 µm.

Die feinen Partikelfraktionen sind dabei allgemein schädlicher für den Menschen, da sie über den Atmungs- trakt tief eindringen können. Sofern ein Partikel direkt durch einen Emittenten natürlichen oder anthropogenen Ursprungs gebildet wird, handelt es sich um primär gebildete Feinstäube. Zu großen Teilen können sie auch durch

Emission von gasförmigen Vorläufer- substanzien wie Ammoniak, Schwefeldioxid oder Stickstoffoxiden entstehen. Reagieren diese Stoffe in der Luft miteinander, bezeichnet man sie als sogenannte sekundäre Feinstäube [UBA (Hrsg.) 2018, o.S.].

Teilt man die durchschnittlichen Feinstaubemissionen in Deutschland nach ihren Verursachern ein, so wird deutlich, dass ein Großteil der ausgestoßenen Feinstaubpartikel (PM10) aus Industrieprozessen stammt. Weitere vom Menschen verursachte Feinstaubquellen sind der Verkehr, die Landwirtschaft und private Haushalte sowie Kleinverbraucher mit Öfen und Heizungen (*Abbildung 19*). In Ballungs- gebieten und dicht bebauten urbanen Bereichen kann die prozentuale Verteilung anders ausfallen. Mit den dichten Verkehrsnetzen ist hier insbesondere der Straßenverkehr eine bedeutende Feinstaubquelle. Aus diesem Grund werden die Emissionen aus dem Straßenverkehr genauer betrachtet.

Es gibt detaillierte Untersuchungen zur Entstehung von Feinstaub durch den Straßenverkehr [BASt 2010, o.S.]. So wurde festgestellt, dass ein Großteil der PM1-Emissionen, also Feinstaub- partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 1 µm, von Verbrennungsprozessen stammt. Hingegen können die Partikel in der Größenfraktion PM1 bis PM10 dem Abrieb von Reifen und Straße, so- wie der erneuten Aufwirbelung von Partikeln zugeordnet werden. Eine andere Einteilung in die Größenfrakti- on PM2,5 wurde bei der Auswertung von Partikeln aus dem Straßenverkehr aufgrund von schlechter Übereinstim- mung mit den Messergebnissen nicht vorgenommen [BASt (Hrsg.) 2010, S. 7]. Neben den Größenfraktionen lassen sich auch Einteilungen in Bezug auf den Ursprung vornehmen. Rund 20 % des verkehrsbedingten Feinstaubes stammt vom Reifenabrieb, rund 50 % aus Auspuffemissionen und rund 30 % aus aufgewirbeltem Staub [BASt (Hrsg.) 2010, S. 7]. Zudem besteht ein Zusammenhang zwischen dem

Verkehrsfluss auf den Straßen und der Größenverteilung der emittierten Partikel. Der Anteil an Aufwirbelung und Abrieb aus Bremsen und Reifen erhöht sich bei stockendem Verkehr durch das intervallmäßige Anfahr- und Bremsverhalten der Autos. Auch die Beschaffenheit der Straßen hat Einfluss auf die Menge der emittierten Partikel. Bei schlechter Qualität des Fahrbahnbelags, beispielsweise mit großer Porosität, werden mehr Partikel durch das Abrollen der Reifen in die Umgebungsluft freigesetzt [BASt (Hrsg.) 2010, S. 8].

Neben den verkehrs- und straßenbedingten Aspekten haben die klimatischen Faktoren erheblichen Einfluss auf den örtlichen Feinstaubgehalt der Luft. Der Einfluss von Wind ist maßgeblich für die Menge und Verteilung des örtlichen Feinstaubes. Bei zunehmenden Windgeschwindigkeiten und einem Luftaustausch mit umliegenden Bereichen werden die Feinstaubkonzentrationen in der Luft verdünnt. Gleichzeitig wird die Sedimentation erschwert. Lokal können sich Windfelder auch kurzfristig ändern und zu einer Veränderung der Luftströmungen und damit des Feinstaubgehalts führen. Bei einer erhöhten Luftfeuchtigkeit können sich Partikel zu Agglomeraten zusammenschließen, die aufgrund des Gewichts schneller sedimentieren.

Zum Einfluss von Niederschlag gibt es widersprüchliche Einschätzungen, die sich aus unterschiedlichen Messverfahren ergeben. Eine erhöhte Temperatur führt zu einer Zunahme von PM10-Konzentrationen [BASt (Hrsg.) 2010, S. 8]. Zudem kann eine Inversionswetterlage zu einer Aufkonzentrierung von Partikeln führen. Bei der Belastung und Messung von Feinstaubkonzentrationen gibt es verschiedene Parameter der Einflussnahme, die sich vielfach auch gegenseitig beeinflussen. Um die Feinstaubbelastung zu messen, wurden daher standardisierte Verfahren entwickelt, die mit gemittelten Werten und über einen längeren Zeitraum die Konzentrationen messen. So lassen sich Tendenzen zur örtlichen Feinstaubbelastung sowie einer Zu- oder Abnahme von Konzentrationen feststellen.

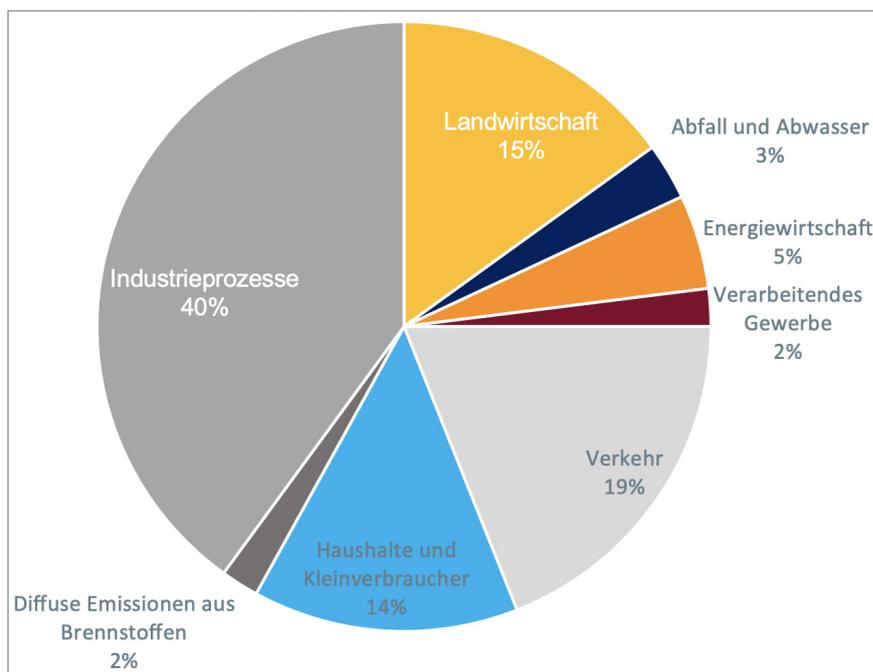


Abbildung 19: Feinstaub (PM10)-Emissionen nach Verursacher in Deutschland (UBA (Hrsg.), eigene Darstellung).

2.4.3 Weitere Luftschadstoffbelastungen im urbanen Raum

Bei Betrachtung der Gesundheitssituation in urbanen Räumen treten häufig auch weitere Luftschadstoffe in den Fokus. Wesentlich sind dabei Stickoxid als Substanz, die bei Verbrennungsprozessen freigesetzt wird, sowie Ozon als ein Produkt, das aus Vorläufersubstanzen entsteht.

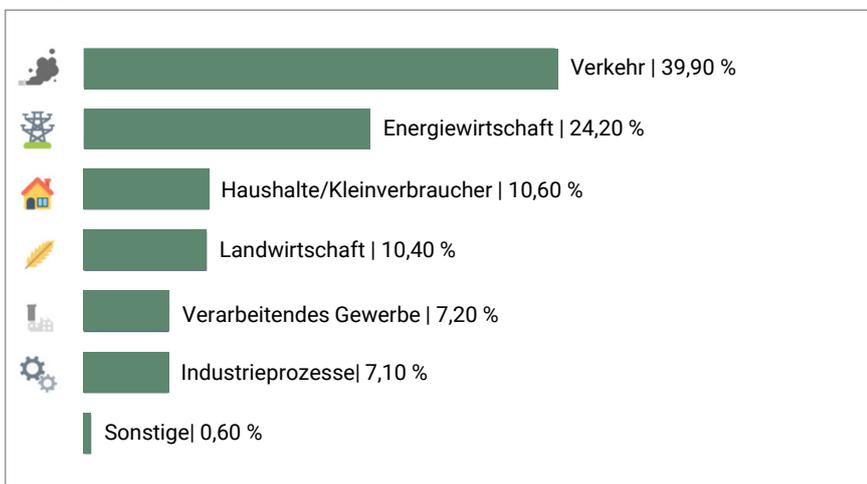
Stickstoffoxide (NO_x) bestehen aus einer Mischung aus Stickstoffdioxid (NO_2) und Stickstoffmonoxid (NO). Die Stoffe werden bei allen Verbrennungsprozessen freigesetzt, beispielsweise im Auto, im Kraftwerk oder in der Gasheizung. Bei den Verbrennungsprozessen im Motor eines Fahrzeugs bildet sich vorrangig, zu etwa 90 % Stickstoffmonoxid (NO). Nach dem Ausstoß in die Atmosphäre bildet sich dann aus einem Großteil der Verbindungen Stickstoffdioxid (NO_2). Im innerstädtischen Raum treten erhöhte Stickoxidbelastungen insbesondere an verkehrsreichen Straßen auf. Betrachtet man die Belastungssituation in Deutschland, so trägt der Verkehr durchschnittlich etwa 40 % zu den Emissionen bei. Im innerstädtischen Bereich können die Auswirkungen des Straßenverkehrs sogar bis zu 60 % ausmachen [UBA (Hrsg.) 2019, S. 25].

Bei Aufschlüsselung des Bereichs Straßenverkehr können etwa 70 % der Stickoxidbelastungen auf Diesel-

Fahrzeuge zurückgeführt werden. Zum Schutz der Bevölkerung und Umwelt wurden für Stickoxide Grenzwerte definiert. Diese beziehen sich zum einen auf die gemessene Gesamtbelastung im urbanen Raum, zum anderen auf den Ausstoß von Fahrzeugen. In der EU wurden die Grenzwerte für NO_2 aus den WHO-Empfehlungen übernommen. Damit ist die menschliche Gesundheit gegen die Auswirkungen von Stickstoffdioxid wesentlich besser geschützt als gegen die Auswirkungen von Feinstaub. In den vergangenen Jahren gab es nur wenige Überschreitungen der Grenzwerte. Wenn Überschreitungen auftraten, wurden sie häufig an verkehrsreichen Straßen gemessen. Ein Grund dafür sind die realen Abgasemissionen aus den Diesel-Fahrzeugen. Trotz strenger Grenzwerte, insbesondere bei Fahrzeugen mit Euro-6-Abgasnorm, werden die Grenzwerte im realen Stadtverkehr regelmäßig um bis zu Faktor 6 überschritten [UBA (Hrsg.) 2019, S. 25].

Ein weiterer bedeutsamer Luftschadstoff in den urbanen Räumen ist Ozon. Es wird jedoch nicht, wie bei Stickoxiden oder Feinstäuben, direkt freigesetzt, sondern bei intensiver Sonneneinstrahlung durch komplexe photochemische Prozesse aus Vorläufersubstanzen gebildet [UBA (Hrsg.) 2013, o.S.]. Wesentliche Stoffe zur Bildung von Ozon sind Stickstoffdioxid und flüchtige organische Verbindungen, sogenannte VOC (Volatile Organic Compounds). Daher kann man Ozon zur Gruppe der sekundär gebildeten Luftschadstoffe zählen. Sommerliche Hochdruckwetterlagen mit starker Sonneneinstrahlung und hohen Lufttemperaturen begünstigen die Entstehung von bodennahem Ozon [LFU (Hrsg.) 2020, S. 3]. Doch auch bei erhöhten Ozonwerten treten negative gesundheitliche Auswirkungen auf. So können zu hohe Konzentrationen eine reizende Wirkung auf die Atemwege haben und zu einer verminderten Lungenfunktion sowie Atembeschwerden führen.

Abbildung 20: Stickoxid-Emissionen nach Quelle in Deutschland im Jahr 2016 (Statista 2019, geändert).



2.4.4 Luftreinhalte und Grenzwerte in Deutschland

In dicht besiedelten urbanen Bereichen treffen häufig verschiedene Nutzungen aufeinander. Privathaushalte mit Kleinfeuerungsanlagen, kleine Industrieanlagen sowie der Straßenverkehr und die Landwirtschaft üben einen Einfluss auf die städtische Luftqualität und damit den Lufthaushalt aus. Um die menschliche Gesundheit vor zu hohen Belastungen zu schützen, werden sogenannte Leitsubstanzen gemessen, die als Indikatoren für eine Schadstoffbelastung dienen [DWD 2014, S. 8]. Diese Leitsubstanzen sind Stickstoffdioxid (NO_2), Feinstaub ($\text{PM}_{2,5}$), Grobstaub (PM_{10}), Schwefeldioxid (SO_2) sowie Ozon (O_3) [SMC (Hrsg.) 2017, S. 2].

Die EU legt zum Schutz der Bevölkerung Grenzwerte als Teil der EU-Luftqualitätsrichtlinie für die zuvor genannten Luftschadstoffe fest. In Deutschland gelten diese Grenzwerte. Sie sind in der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes festgeschrieben. Die aktuellen Grenzwerte für Feinstaub und Stickoxide wurden vor etwa 20 Jahren eingeführt. Nach heutigen

wissenschaftlichen Erkenntnissen zu den Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die menschliche Gesundheit, sind diese Werte zu hinterfragen. Die WHO-Empfehlungen liegen weit unter den gesetzlich geltenden Grenzwerten. Sie haben jedoch keine rechtliche Verbindlichkeit. Um die WHO-Empfehlungen einzuhalten, sind weitreichende Veränderungen im motorisierten Individualverkehr in den Städten notwendig [Baars 2021, o.S.].

Luftschadstoff	Gesetzliche Grenzwerte EU	WHO-Empfehlungen
Feinstaub (PM_{10})	Tagesmittelwert: $50 \mu\text{m}/\text{m}^3$ (darf höchstens an 35 Tagen im Jahr überschritten werden)	Tagesmittelwert: $50 \mu\text{m}/\text{m}^3$ (darf höchstens an 3 Tagen im Jahr überschritten werden)
	Jahresmittelwert: $40 \mu\text{m}/\text{m}^3$	Jahresmittelwert: $20 \mu\text{m}/\text{m}^3$
Feinstaub ($\text{PM}_{2,5}$)	Jahresmittelwert: $25 \mu\text{m}/\text{m}^3$	24-Stunden-Grenzwert: $25 \mu\text{m}/\text{m}^3$ (darf höchstens an 3 Tagen im Jahr überschritten werden)
		Jahresmittelwert: $10 \mu\text{m}/\text{m}^3$
Stickstoffdioxid (NO_2)	1-Stunden-Grenzwert: $200 \mu\text{m}/\text{m}^3$ (darf höchstens 18-mal im Jahr überschritten werden)	1-Stunden-Grenzwert: $200 \mu\text{m}/\text{m}^3$
	Jahresmittelwert: $40 \mu\text{m}/\text{m}^3$	Jahresmittelwert: $10 \mu\text{m}/\text{m}^3$
Ozon (O_3)	8-Stunden-Mittelwert: $120 \mu\text{m}/\text{m}^3$ (darf höchstens an 25 Tagen im Jahr überschritten werden)	8-Stunden-Mittelwert: $100 \mu\text{m}/\text{m}^3$

Tabelle 1: Übersicht der geltenden Immissionsgrenzwerte zum Schutz der Gesundheit, festgelegt im Immissionsschutzgesetz – Luft.

2.4.5 Debatten um die Luftschadstoffbelastung

Der LUBW zufolge kann der verkehrsbedingte Staub zu rund 85 % auf Reifen-, Bremsen- und Straßenabrieb zurückgeführt werden. Das macht deutlich, wie sehr der verkehrsbedingte Staub in den Innenstädten vom motorisierten Individualverkehr abhängt. Mit der Zunahme von Elektrofahrzeugen werden zwar aus den Verbrennungsprozessen stammende Feinstäube reduziert, jedoch wird sich voraussichtlich an der Gesamtstaubbelastung und den damit einhergehenden gesundheitlichen Auswirkungen kaum etwas ändern [Vieweg 2017, o.S.]. Bremsabrieb, Reifen und Wiederaufwirbelung sind bei den Elektrofahrzeugen ebenfalls vorhanden. Die Überschreitung von Grenzwerten

ist in den vergangenen zwei Jahren zurückgegangen. Einen Grund zur Entwarnung gibt es jedoch nicht, da auch eine geringfügige Konzentration an Luftschadstoffen negative Auswirkungen auf die Gesundheit haben kann. Mit zunehmenden öffentlichen Debatten zur gesetzlichen Verschärfung der Grenzwerte entstanden in den vergangenen Jahren auch immer wieder fehlgeleitete Diskussionen auf, die einen gesundheitlichen Einfluss von Feinstäuben und Stickoxiden verharmlosten. Ein Zusammenhang zwischen Dosis und Wirkung beim Einfluss von Luftschadstoffen ist jedoch epidemiologisch vielfach bewiesen [u.a. Krauter 2019, o.S.].

2.5 Feinstaubbindung durch Vegetation

Es gibt diverse Möglichkeiten, Pflanzen im Stadtraum zu integrieren, beispielsweise Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfe, Spielplätze und Sportflächen sowie Straßenbegleitgrün. Die Bauwerksbegrünung im Stadtraum trägt dazu bei, auch in dichten urbanen Bereichen Pflanzen zu integrieren. Pflanzen können durch verschiedene Prozesse zur Bindung von Luftschadstoffen beitragen. Es gibt bereits zahlreiche Untersuchungen, sowohl im Stadtraum als auch im Labor, die sich mit den Eigenschaften von Pflanzen zur Luftreinhaltung auseinandersetzen. Einer der wesentlichen Prozesse ist die Photosynthese der Pflanzen, bei der Glucose und Sauerstoff aus Kohlenstoffdioxid und Wasser gebildet werden. Den zahlreichen Untersuchungen zur Entstehung anthropogener Luftschadstoffe, insbesondere aus Kraftfahrzeugen, stehen lückenhafte Untersuchungen zur Abscheidung von Stäuben auf Pflanzen gegenüber [BASt (Hrsg.) 2010, S. 8]. Es bestehen unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Partikeln in der Luft. Vegetationselemente können durch verschiedene Vorgänge zur Kon-

zentrationminderung beitragen, wie im folgenden Kapitel näher erläutert wird. Gleichzeitig können sie aber auch direkt oder indirekt zu einer Konzentrationserhöhung führen. So kann beispielsweise der Eintrag von biogenen Emissionen wie Pollen oder anderen partikulären Pflanzenteilen zu einer direkten Konzentrationserhöhung führen. Indirekt können Pflanzen durch die Veränderung des Strömungsfeldes ebenfalls zu einer temporären Konzentrationserhöhung beitragen [IASP 2007, S. 67]. Es besteht eine Abhängigkeit zwischen der Windgeschwindigkeit und der Staubkonzentration. Entscheidend für eine gute Luftqualität im urbanen Raum ist nach Bruse [2003, o.S.] eine Durchmischung belasteter Stadtluft mit frischer Luft aus den oberen Luftschichten. [IASP 2007, S. 27]. In Straßenschluchten mit einer geringen Durchlüftung wurden höhere Schwermetallkonzentrationen nachgewiesen [IASP 2007, S. 123]. Die Beachtung von Frischluftschneisen in der städtebaulichen Entwicklung ist daher für die Minderung von Luftschadstoffen im urbanen Raum essenziell.

2.5.1 Feinstaubbindungsvermögen von Pflanzen an der Oberfläche

Die Bindung von Stäuben an pflanzlichen Oberflächen war bisher nur vereinzelt Bestandteil wissenschaftlicher Forschungen [BASt (Hrsg.) 2010, S. 8]. Pflanzen nehmen ihre Nährstoffe in gelöster Form über die Wurzeln sowie in gasförmigem Zustand über die Spaltöffnungen auf. Durch die große Oberfläche können für Menschen lungengängige Feinstäube in der Luft ab- und adsorbiert werden [Kuttler 2010, o.S.]. Pflanzen können durch ihre Blattoberfläche Aerosole und Stäube binden. Aufgrund der unterschiedlichen Partikelgrößen können Partikel in

verschiedene Abscheideprozesse differenziert werden. Dabei unterscheidet man je nach Luftraum drei funktionale Räume:

1. **Turbulente Grenzschicht über dem Bestand:** Sedimentation der Partikel und turbulente Diffusion; Partikel können dabei an den Blättern vorbeiströmen und durch Windbewegungen zur Pflanze transportiert werden.
2. **Quasi-laminare Grenzschicht:** geringe Entfernung über der Blattoberfläche (wenige Millimeter), Wirkung von Sedimentati-

on, Impaktion und Interzeption (Trägheitsabscheidung) sowie Brown'scher Diffusion.

3. Blattoberfläche: Anhaftung und Abscheidung von Partikeln durch direkten Kontakt mit Blattoberfläche [IASP 2007, S. 77].

In *Tabelle 2* werden die Transportprozesse der quasi-laminaren Grenzschicht aufgezeigt.

Unter Deposition wird im Allgemeinen die Ablagerung von aus der Atmosphäre entfernten Stoffen auf belebten und unbelebten Oberflächen verstanden [LUBW (Hrsg.) 2024, o.S.]. Dabei wird weiter in verschiedene Formen der Deposition unterschieden. Bei der trockenen Deposition werden Partikel durch Sedimentation oder Trägheitsabscheidungen bei der Umströmung der Blätter auf den Oberflächen abgeschieden. Dies gilt insbesondere für Partikelgrößen > 1 µm [IASP 2007, S. 78]. Partikel mit einer Größe < 0,1 µm werden durch Diffusionsprozesse an die Blattoberfläche transportiert. Bei Partikeln in der Größenfraktion 0,1 µm bis 1 µm ist die Abscheideleistung gering. Allerdings macht diese Fraktion den Großteil der verkehrsbedingten, gesundheitsschädlichen Stäube aus, wodurch sich nach Langer (2006) die Vermutung aufstellen lässt, dass die Filterleistung der Vegetation bei Feinstaub (PM2,5) insgesamt als gering einzuschätzen ist.

Von Vorteil für eine Partikelhaftung ist die transpirative Erhöhung der Luftfeuchtigkeit, die sogenannte Feuchtdeposition, wodurch sich Partikel zu Agglomeraten zusammenschließen, was zu einer schnelleren Sedimentation führt.

Zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit bei der pflanzlichen Transpiration und der damit einhergehenden Einflussnahme auf die Bindung von PM2,5 liegen derzeit nur wenige Untersuchungen

Partikeldurchmesser	Transportprozess	Kurzerläuterung des Prozesses
< 0,1 µm	Brownsche Diffusion	Ungerichtete Wärmebewegung der Moleküle in unmittelbarer Nähe der Oberfläche
0,1 bis 10 µm	Interzeption	Partikel gelangen mit dem Hauptflutstrom nah an ein Hindernis, treffen mit ihm zusammen und bleiben aufgrund ihrer Trägheit liegen. Tritt auf an Stellen mit einer quasi-laminaren Schicht, die kleiner ist als die Partikelgröße. Abscheidungen auf der Vegetationsoberfläche ist vernachlässigbar gering
0,1 bis 10 µm	Impaktion	Partikel können aufgrund ihrer Trägheit dem Hauptluftstrom nicht mehr folgen und werden an der Oberfläche abgeschieden
Ab 10 µm sowie kleinere Partikel, wenn sie sich nah der Oberfläche befinden	Sedimentation	Abscheidungen aufgrund der Schwerkraft

Tabelle 2: Partikelgrößen und dominierende Transportprozesse in der quasi-laminaren Grenzschicht (Slinn 1982, Davidson/Wu 1990, Marques 1999).

vor. Eine Feuchtdeposition ist insbesondere bei Nebel nachweisbar und kommt überwiegend in höheren Lagen vor [IASP 2007, S. 79]. Nassdeposition ist besonders wirksam beim Austrag feinerer Partikel aus der Atmosphäre. Partikel in der Größenfraktion PM2,5 werden über diese Form am häufigsten abgeschieden.

Der Grad der Partikelhaftung ist maßgeblich vom Zusammenspiel verschiedener Faktoren abhängig. Folgende Faktoren können zu einer Erhöhung der Deposition und damit einer Minderung der Schadstoffkonzentration in der Luft führen:

- Oberflächenbeschaffenheit der Blätter (Rauigkeit, Blattbehaarung, Blattnervatur, Relief, Blattrandwölbung, Blattrandmorphologie, Fiederung, Vorhandensein klebriger Drüsen, Benetzbarkeit)
- Blattmorphologie (Blattgröße, Ansatzwinkel, Blattstellung in der Krone, Länge des Blattstieles, Skleromorphiegrad der Blattspreite (Starrheit) sowie damit einhergehende Windbeweglichkeit)
- Maß für auffangende Blattfläche (Blattflächenindex, Belaubungsdichte)

- Belaubungsdauer
- Verhältnis der einzelnen Pflanzenteile zueinander (Laubwerk, unbelaubte Äste, Zweige und Stämme)
- Allgemeiner Pflanzenhabitus (Architektur und Höhe des Vegetationsbestandes)
- Pflanzenposition in Relation zur Hauptwindrichtung [IASP 2007, S. 76].

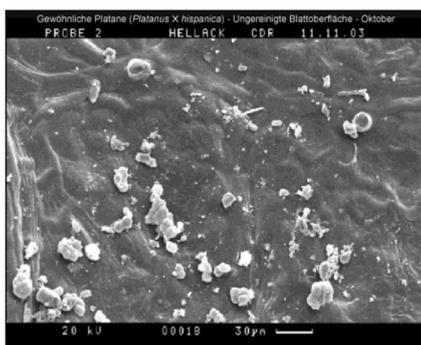
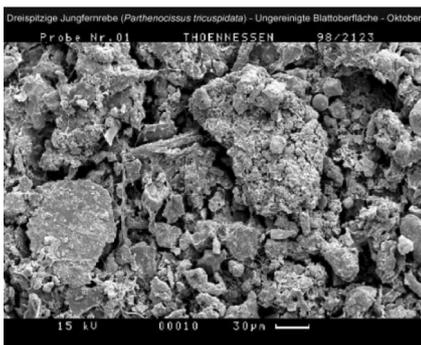
Pflanzen lassen sich gemäß der Mikrorauigkeit ihrer Blätter in Akkumulierer (z.B. *Parthenocissus tricuspidata*) und Selbstreiniger (*Platanus x hispanica*) unterscheiden [Thönnessen 2006, S. 8-11]. Die guten Eigenschaften von Akkumulatoren zur Partikelhaftung lassen sich insbesondere auf die raue Oberfläche und damit verbundene gute Benetzbarkeit zurückführen. Ein Teil der an der Oberfläche anhaftenden Partikel bleibt im Laufe der Vegetationsperiode trotz Niederschlägen haften [IASP 2012, S. 8]. So konnte Thönnessen eine sich im Laufe der Vegetationsperiode anreichernde Staubschicht auf der Blattoberfläche des Wilden Weins feststellen (Abbildung 21). Im Gegensatz dazu konnten Thönnessen und Helack (2005) auf den Blättern des Selbstreinigers Platane nur eine geringe Staubauflage messen (Abbildung 22). Eine Zunahme von Staubpartikeln auf der Blattoberfläche wurde im Laufe der Vegetationsperiode nicht erkannt werden [IASP 2007, S. 80]. Die Selbstreinigung von Blattoberflächen wird auch durch den sogenannten Lotus-Effekt erklärt. Ursprünglich an der Lotuspflanze festgestellt, können Pflanzen durch ihre Kutikula Wachs absondern, mit dem sie eine superhydrophobe Oberfläche bilden [EU-Kommission 2023, o.S.]. Bei Pflanzenarten, die eine Struktur oder Rauigkeit in Form von Rillen oder ausgeprägten Blattadern auf der Blattunterseite aufweisen, konnten Staubpartikel gut gebunden werden. Gleichzeitig wurde die Resuspension, die Wiederaufwirbelung von Partikeln an Blättern mit einer dreidimensionalen Oberfläche verhindert [Speak et al.

2012, S. 283ff.]. Mit Größenzunahme der Blattoberflächen und unter Berücksichtigung der genannten Eigenschaften konnte zudem eine gesteigerte Effizienz in der Partikelhaftung nachgewiesen werden [Litschike et al. 2008, S. 229ff.]. Daher sind Pflanzen mit möglichst großen Oberflächen für die Partikelhaftung von Vorteil. Mit der Anströmung von Partikeln haben diese bei größerer Blattoberfläche mehr Möglichkeiten zur Anhaftung.

Besonders raue, klebrige, behaarte oder von Tau benetzte Oberflächen sind daher bei der Intensität von Partikelabscheidungen von Vorteil. Weisen die Grünstrukturen eine hohe Dichte mit geringer Permeabilität auf, werden weniger Partikel aus der Luft an den Blattoberflächen abgeschieden. Das liegt an der durch die Grünstruktur veränderten Windströmungen. Durch eine dichte Pflanzenstruktur werden mit Partikeln angereicherte Winde über die Pflanzen hinweggeführt. Bei einer permeablen Anordnung wird die anströmende Luft abgebremst und kann durch die Grünstruktur hindurchgeleitet werden. Dadurch können große Partikel besser sedimentieren. Zudem wird die partikelbeladene Luft an den Blättern vorbeigeführt. Für eine wirksame Abscheidung sollte die Porosität einer Pflanze zwischen 50 und 70 % liegen [BASt (Hrsg.) 2010, S. 8ff.]. Eine zu niedrige Porosität führt zu einer Ablagerung von Staubpartikeln hinter einem Vegetationselement, jedoch ohne Abscheidung der Partikel an der Pflanze.

Weisen die Pflanzen mehrere der genannten Eigenschaften auf und zeigen sie zudem eine hohe Toleranz gegenüber urbanen Stressfaktoren (bspw. Salzeintrag, Hitzeeinwirkung, Wurzeldruck), eignen sie sich als natürliches Element zur Feinstaubbindung. Bei der Untersuchung der tatsächlichen Elementkonzentration von Stäuben auf Blattoberflächen konnte bis zu einer Beprobungshöhe von 4,50 m eine deutliche Ablagerung von

Abbildung 21 (oben): Ungereinigte Blattoberfläche von *Parthenocissus tricuspidata* (Akkumulierer) im Oktober (Thönnessen/Hellack 2005).
Abbildung 22 (unten): Ungereinigte Blattoberfläche von *Platanus x hispanica* (Selbstreiniger) im Oktober (Thönnessen/Hellack 2005).



Partikeln, insbesondere Feinstäuben, festgestellt werden [Thönnessen 2002, S. 86]. Die Empfehlungen zur Höhe der Begrünung unterscheiden sich in mehreren Forschungsberichten. Eine vom deutschen Städtetag in Auftrag gegebene Forschung zum Feinstaub in der Stadt Köln empfiehlt die Anordnung diverser Schichten in unterschiedlichen Höhen. Die erste Schicht aus krautartigen Pflanzen sollte eine Wuchshöhe von 0,75 m aufweisen. Eine zweite Schicht aus Sträuchern sollte eine Höhe zwischen 2 und 3 m haben. Bäume mit einer Höhe über 3 m bilden die dritte Schicht. Weitere Untersuchungen von Langer [2006] geben an, dass die Abscheidung von Partikeln mit zunehmender Höhe abnimmt. Daher sollten insbesondere den Boden bedeckende

und niedrigere Pflanzen zum Einsatz kommen [BASt (Hrsg.) 2010, S. 10]. Eine quantitative Entfernung der über die Luft eingetragenen und anhaftenden Partikel durch Abwaschverfahren ist nur bedingt möglich. Je nach Oberflächenbeschaffenheit der Blätter und Anzahl der eingetragenen Partikel lassen sich nur mittlere bis geringe Mengen immissionsbedingter Ablagerungen entfernen. Insbesondere kleinere Partikelgrößen bleiben an der Blattoberfläche haften [Thönnessen 2002, S. 30].

2.5.2 Aufnahme von Staubfraktionen

Luftschadstoffe können auch in gelöster Form über die Blattoberfläche und die Spaltöffnungen in die Interzellularräume gelangen und dort über die Mesophyll-Zellen aufgenommen werden [Heinze/Fielder 1992, o.S.]. Dies trifft insbesondere auf Pflanzen zu, deren Schließzellen sich auf den Blattoberflächen befinden, da dort der überwiegende Teil verkehrsbedingter Stoffe anlagert. In partikulärer Form findet keine nennenswerte Aufnahme von Stoffen in das Blattinnere statt. Die Spaltöffnungen sind im geöffneten Zustand die einzige Brücke zwischen dem Blattinneren und der äußeren Blattoberfläche. Größere Partikel können nicht über die Spaltöffnungen aufgenommen werden. Selbst im geöffneten Zustand dringen nur wenige Stäube und Aerosole in das Blattinnere. Immissionsbedingte Ionen und Stoffe, die sich während der Vegetationsperiode im Blatt unterhalb der wachshaltigen Kutikula eingelagert haben, können durch den natürlichen Entwicklungs- und Alterungsprozess des Blattes am Ende der Vegetationsperiode wieder ausgewaschen und

freigesetzt werden [Thönnessen 2002, S. 30]. Moose haben im Vergleich zu höheren Pflanzen keine Wurzeln und können Wasser, sowie Nährstoffe über ihre gesamte Oberfläche aufnehmen [IASP 2007, S. 124]. Sie haben keine Kutikula, die sie vor atmosphärischen Stoffen schützt [Milnikel 2022, o.S.]. Durch ihre spezifische Nährstoffaufnahme nehmen Moose in Bezug auf die Staubfilterung daher eine besondere Rolle ein. Aufgrund ihrer zahlreichen kleinen Blätter besitzen sie eine verhältnismäßig große Oberfläche, die im Vergleich zur Bodenoberfläche um bis zu Faktor 30 zunehmen kann [Milnikel 2022, o.S.]. Durch den Kationenaustausch werden einige Partikel an der Moosoberfläche elektrostatisch gebunden. Der Prozess wird mit der feuchten Oberfläche der Moose begünstigt. Dadurch können Moose bis zur Hälfte der im Feinstaub enthaltenen anorganischen Salze an der Oberfläche elektrostatisch binden und anschließend verstoffwechseln [Frahm 2008, S. 13]. Verschiedene Untersuchungen haben die Feinstaubreduzierung der Moose

und die Verstoffwechslung von Ammoniumnitrat als wichtigen Bestandteil von Feinstaub bestätigt [Frahm 2008, S. 14]. Die Zusammensetzung der Stäube kann sehr unterschiedlich sein. Der Anteil an Ammoniumsalzen, der als Dünger für die Moose dienen kann, ist für die Effizienz der Bindung entscheidend. Neben dem Kationenaustausch und der Bindung von partikulären Luftschadstoffen an der Oberfläche kann ein Teil der Ionen in die interzellulären Kompartimente eintreten und dort verstoffwechselt werden. Dies gilt insbesondere für anorganische, wasserlösliche Substanzen. Weiterhin ist die Oberfläche der Moose durch einen Biofilm aus Bakterien bedeckt. Diese Bakterien können die organischen Komponenten der Staubpartikel, beispielsweise organische Bestandteile aus Reifenabrieb, abbauen. Werden Moose in einem vitalen Zustand gehalten, können Stäube durch die elektrostatische Bindung festgehalten werden und resuspendieren nicht wieder als Schwebstaub in die Luft [IASP 2007, S. 125]. Alle unlöslichen Bestandteile sedimentieren im Moosrasen und werden dort von der Pflanzstruktur

gebunden.

Zur Aufnahmefähigkeit von Schwermetallen gibt es unterschiedliche Forschungsergebnisse. Bei der Aufnahme von Aluminium, Blei, Eisen und Nickel wurde *Hypnum cupressiforme* eine bessere Eigenschaft als Schwermetallakkumulator nachgewiesen als *Scleropodium purum*. Die Ergebnisse der Untersuchungen variieren aufgrund unterschiedlicher Adsorptions- und Desorptionskapazitäten [IASP 2007, S. 125].

Moose können auch als Indikator für Luftverschmutzung verwendet werden. Es besteht eine Korrelation zwischen Gebieten mit Luftverschmutzung und einem Rückgang verschiedener Moosarten. Begasungsuntersuchungen haben einen Rückgang von Epiphyten bei höheren Schwefeldioxidkonzentrationen nachgewiesen. Durch die qualitative und quantitative Entwicklung der Moosflora rund um belastete Gebiete lassen sich Zonen unterschiedlicher Luftgüte ableiten [Frahm 2001, S. 296].

2.5.3 Unterscheidung von verschiedenen Vegetationselementen

Es gibt verschiedene Untersuchungen, die sich mit der Feinstaubbindung spezifischer Vegetationselemente auseinandersetzen. Häufig wird dabei zwischen Gehölzen in Form von Bäumen oder Sträuchern, Dachbegrünung und Fassadenbegrünung unterschieden. Die meisten Forschungen betrachten den Einfluss verkehrsbedingter

Emissionen im Zusammenhang mit diesen Begrünungen und beziehen sich dabei auf die Bindung von Feinstäuben durch Straßenbäume.

2.5.3.1 Stadtbäume

Nadelgehölzen wird aufgrund ihrer komplexen Blattstrukturen und hohen Gesamtoberfläche die höchste Staubbindung zugesprochen [IASP 2007, S. 76]. Unter anderem wurden Untersuchungen an Schwarzkiefern durchgeführt, die eine Staubmenge in der Größenfraktion PM10 von bis zu 200 mg/m² maßen. Vergleichbare Untersuchungen an Laubbäumen wie dem Feldahorn und der Hybrid-Pappel 'Beaupré' zeigten, dass diese nur etwa ein Viertel der Staubmenge aufnehmen konnten [IASP 2012, S. 10]. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Reznik und Schmidt [2008] bei Laboruntersuchungen zur Bindung von Partikeln auf Pflanzoberflächen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. Beim Vergleich der Abscheideeffizienz von *Hedera helix* und *Picea abies* konnte eine etwa 200 %-ige abgeschiedene flächenbezogene Staubmenge im Vergleich zu dem Efeu festgestellt werden. Dies wird unter anderem auf die Eigenschaften der Nadeln mit ihrer gewölbten Randausbildung zurückgeführt [Reznik/Schmidt 2008, S. 5]. Lin et al. [2017] betrachteten die Anzahl und Größe der Partikelverteilung auf den Blattoberflächen. Dabei wurde auf den Blattoberflächen von

Salix matsudana eine 10- bzw. 8-fache Ablagerung im Vergleich zu *Fraxinus chinensis* und *Ailanthus altissima* festgestellt. Von Vorteil für die Partikelanhaftung bei *Salix matsudana* waren die dicht angeordneten Spaltöffnungen in Kombination mit einer leichten Blattbehaarung [Lin et al. 2017, S. 59ff.]. In unterschiedlichen Berechnungen wurde eine maximale Abscheidung von 20 % bei einer Porosität von 80 % errechnet [Kappis, 2007, o.S.]. Bäume mit einem Hochstamm in einer Straßenschlucht können zudem zu einer Aufkonzentrierung von Partikeln unterhalb der Kronen führen. Dies wurde bei Bäumen mit Hochstamm nachgewiesen, da sich unterhalb der Kronen Turbulenzen bilden. Allgemeine Schätzungen zur Filterleistung von Grünelementen gehen bei durchschnittlichen Wetterbedingungen von einer maximalen Filterung von etwa 15-30 % vom Feinstaub PM10 aus [IASP 2007, S. 128]. Die Leistungsfähigkeit ist wie in *Abbildung 23* schematisch dargestellt, maßgeblich von dem Aufbau der Bepflanzungen und den Strömungsverhältnissen abhängig.

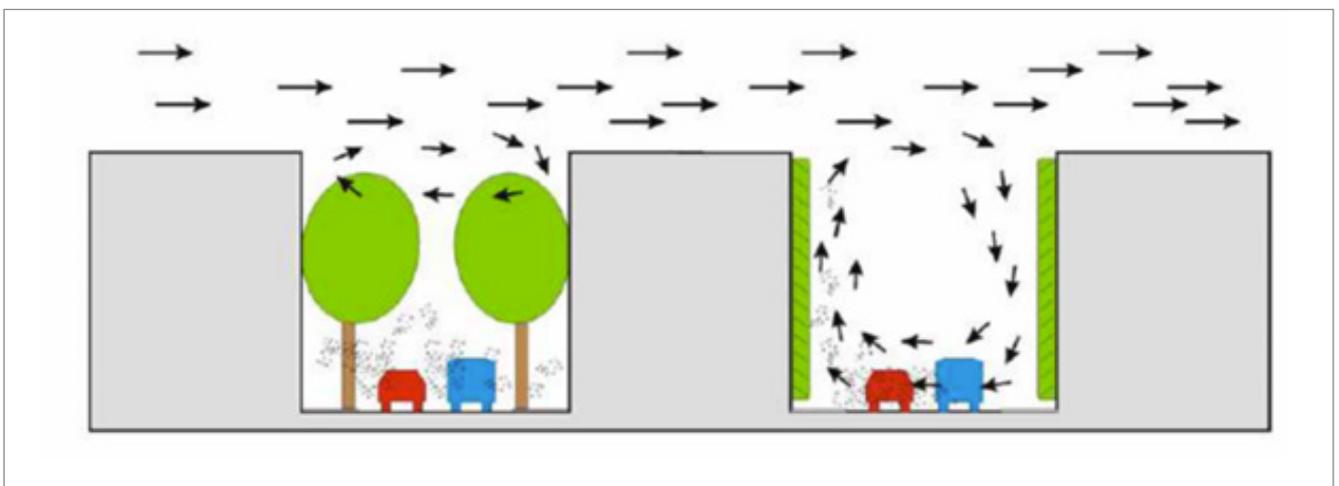


Abbildung 23: Verschiedene Austauschszenarien von Luftmassen bei unterschiedlichen Bepflanzungen. Links: dichtkronige Allee, rechts: Fassadenbegrünung (Flohr 2010).

2.5.3.2 Dachbegrünung

Die Dachbegrünung ist heute ein zentrales Medium zur Integration von Grünstrukturen in den urbanen Raum. Dachbegründungen können verhältnismäßig einfach in das Stadtbild eingefügt und als dünnschichtige Systeme auf einem Großteil der Dächer installiert werden. Unterschiedliche Studien gehen von einer hohen Staubfilterung bei räumlicher Nähe zur Emissionsquelle, beispielsweise Verkehrsflächen aus [Speak et al. 2012, 283 ff.]. Durch den regelmäßig größeren Abstand zwischen den Emittenten und den Dachflächen ist allgemein von einer geringeren Grundkonzentration von Schadstoffen auszugehen [IASP 2012, S. 10 f.]. Aufgrund der geringen Wuchshöhe extensiver Dachbegrünungen weisen diese eine geringe Feinstaubbindung auf. Versuche von Reznik und Schmidt [2008] haben gezeigt, dass für eine effektive Feinstaubbindung eine spezielle Blattoberfläche und -menge vorhanden sein muss [Reznik/Schmidt 2008, S. 1f.]. Allerdings zeigten Vergleichsuntersuchungen verschiedener Arten von Sedum eine Anreicherung von Partikeln im Laufe der Vegetationsperiode. Durch die immergrünen Blätter nimmt die Staubschicht über das Jahr hinweg weiterhin zu [Schreiter 2010, o.S.]. Untersuchungen unter dem Rasterelektronenmikroskop zeigten eine gute Anhaftung von Partikeln der Größenordnungen PM₁₀, sowie PM_{2,5}. Auch bei der Dachbegrünung hat Niederschlag keinen nennenswerten Einfluss auf die Reduzierung der Partikel und damit die Blattreinigung [IASP 2012, S. 11.]. Aufgrund der extensiven Begrünungsflächen wird der Begrünung von Dächern eine wesentliche strategische Bedeutung in der Luftreinhaltung zugesprochen. Die Dachbegrünungsflächen können dabei ähnliche Feinstaubbindungsvermögen wie Straßenbäume aufweisen [Nowak et al., 2006, o.S.]. Hochrechnungen von Yang et al. [2008, o.S.] verdeutlichen die Relevanz zur Bindung von Luftschadstoffen in mehreren amerikanischen Großstädten. So können etwa 19 m² Dachbegrünung die Filterungsleis-

tung eines mittelgroßen Straßenbaums erbringen. Untersuchungen des IASP haben 2012 das Feinstaubbindungsvermögen verschiedener Dachbegrünungs-Vegetationsmatten untersucht und simuliert. Im Ergebnis bindet die *Sedum*-Matte, im Vergleich zu anderen, nicht begrünten Oberflächen, den lungengängigen Staub in einer Größe von < 3 µm am effektivsten. Die Verwendung von *Sedum*-Matten zur Bauwerksbegrünung wird daher als besonders vorteilhaft bezeichnet [IASP 2012, S. 10ff.].

2.5.3.3 Fassadenbegrünung

Bei der Leistungsfähigkeit von Fassadenbegrünungen zur Feinstaubbindung sind die bisherigen Untersuchungen nach wandgebundenen Systemen und Kletterpflanzen zu unterscheiden. Sie basieren fast ausschließlich auf der Bestäubung und Untersuchung von Kletterpflanzen. Die umfangreichsten Untersuchungen bezogen auf eine Pflanzengattung hat Thönnessen [2002] mit seinen Forschungen zur Elementdynamik in fassadenbegründendem Wilden Wein (*Parthenocissus tricuspidata*) durchgeführt. Er stuft die Pflanze durch seine Untersuchungen als tolerant gegenüber Luftschadstoffen ein [Thönnessen 2002, S. 85]. Bei den Untersuchungen konnte er eine Filterungsleistung von bis zu 80 % der Emissionen feststellen, davon wurden bis zu 60 % auf den Blattoberflächen deponiert [IASP 2007, S. 124]. Durch seine morphologischen Eigenschaften und die Nähe zu Emissionsquellen unterstreicht Thönnessen die Eignung von Wildem Wein zur Filterung und Bindung von emissionsbedingten Luftschadstoffen. Nach Köhler [1987] setzen sich Staubpartikel eher auf den hinteren Blättern ab, als auf den vorderen. Daher lautete seine Empfehlung, eine Fassadenbegrünung aus mindestens zwei Schichten zur effektiven Feinstaubbindung anzubringen [IASP 2012, S. 12]. Zudem konnte Thönnessen aerosolgebundene Schwermetalle im Grobstaub (Al, As, Cd, Co, Cr, Fe, Pb, Pt, Sb, Cu, Ni, Zn) nachweisen. Die höchsten Konzentrationen wurden dabei in innerstädtischen Straßenschluchten gemessen. Zur Mächtigkeit oder Tiefe einer Fassadenbegrünung lässt sich keine eindeutige Aussage treffen. Konkrete Angaben zur Filterungsleistung von Fassadenbegrünungen finden sich in wissenschaftlichen Untersuchungen ebenfalls nur vereinzelt. In der Literatur wird die Effektivität zur Filterung des Gesamtstaubs zwischen 4 und 8,4 % angegeben. Beim Efeu (*Hedera helix*) wurde eine Feinstaubbindung von 1,8 bis 3,6 % und eine Jahresmenge von 6,0 g/m² angegeben. Differenziert betrachtet waren dabei

71 % der Partikel < 15 µm und nur 10 % der Partikel < 5 µm [Bartfelder/Köhler 1987, o.S.]. Allgemein wird der Beitrag von Fassadenbegrünungen zur Feinstaubbindung jedoch als relevant eingeschätzt [IASP 2007, S. 124f.]. In der wandgebundenen Bauweise wurden neben den genannten Laboruntersuchungen auch Feldversuche durchgeführt. Unter anderem wurde in Stuttgart von 2017 bis 2018 ein aufwendiges Konzept zur Messung von Luftverunreinigungen mit einer Mooswand durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, die langfristige Filterung und Bindung von Feinstäuben und Stickoxiden festzustellen. Hierzu wurden Vergleichsmessungen zwischen der Mooswand und nicht begrünten Flächen in der näheren Umgebung durchgeführt. Ein messtechnischer Nachweis zur Bindung von PM10-, PM2,5- und PM1-Konzentrationen war jedoch aus mehrererlei Gründen unsicher. Zum einen waren die tatsächlichen Zeiträume der Vergleichsmessungen mit insgesamt fünf Wochen relativ kurz. Zum anderen waren die Moosflächen im Verhältnis zur gesamten Projektlaufzeit nur stellenweise und über einen kurzen Zeitraum in einem vitalen Zustand [Vogt 2018, S. 42].

2.5 Zusammenfassung

Die Begrünung von Fassaden mit wandgebundenen Bauweisen ist Teil der gesamtheitlichen Entwicklung nachhaltigen Bauens und Grüner Infrastruktur. Wandgebundene Begrünungen werden aus fünf Komponenten zusammengesetzt: Befestigung und Unterkonstruktion, technische Versorgung, Leitungsführung, Trägermaterial für die Pflanzen, sowie geeignete Pflanzenauswahl. Sie unterscheiden sich in den Konstruktionsmöglichkeiten, den Gestaltungsansätzen sowie den bautechnischen Anforderungen.

Fassadenbegrünungen erzeugen positive Faktoren für Gebäude und Umfeld, sogenannte Leistungsfaktoren, die sich in Gebäude- und umfeldbezogene Leistungsfaktoren unterscheiden lassen.

Im urbanen Kontext beeinträchtigen mehrere Faktoren, wie Temperatur, Strahlung, Starkregenereignisse, Lärm und Luftschadstoffe die menschliche Gesundheit.

Die Auswirkungen von Luftschadstoffen sind dabei abhängig von der Größe der Partikel. Je kleiner die Partikel, desto tiefer gelangen die Stoffe in verschiedene Regionen des Atemtrakts. Jede Konzentration in der Umgebungsluft hat Einfluss auf den Körper und die Gesundheit. Eine Verringerung der Feinstaubexposition wiederum, kann zu einer Verringerung der gesundheitlichen Auswirkungen führen.

In urbanen Bereichen sind Feinstäube aus dem Verkehr und Infrastrukturbereichen Hauptemittenten städtischer Luftschadstoffe. Verkehrsbedingter Staub stammt zu rund 85 % aus Reifen-, Bremsen- und Straßenabrieb.

Zum Schutz der Bevölkerung wurden daher durch die EU festgesetzte Grenzwerte für unterschiedliche Luftschadstoffe definiert. Die WHO-Empfehlungen liegen jedoch weit unter diesen Grenzwerten.

Eine Reduzierung der Belastung sollte in erster Linie durch eine Verringerung der Emissionen erfolgen. Als sekundäre Maßnahme können Vegetationselemente durch verschiedene Formen der Partikelbindung zur Konzentra-

tionsminderung beitragen. Aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit werden Pflanzen in Akkumulierer und Selbstreiniger unterschieden. Pflanzen mit rauen, klebrigen oder behaarten Blattoberflächen sind für eine Partikelabscheidung von Vorteil. Einzelne Stoffe können auch über die Spaltöffnungen oder bei Moosen über die gesamte Oberfläche aufgenommen werden. Die maximale Abscheidung auf Bäumen liegt bei 20 %. Allgemeine Schätzungen gehen von einer maximalen Filterung bei verschiedenen Grünelementen von 15 bis 30 % aus. Hinsichtlich des Leistungsvermögens von Kletterpflanzen variieren die Ergebnisse bei verschiedenen Pflanzenarten. In der Literatur wird die Filterleistung von Fassadenbegrünungen zur Reduzierung von Luftschadstoffen mit 4 bis 8,4 % angegeben.

Methodik

3. Methodik

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Bindung von Luftschadstoffen durch wandgebundene Fassadenbegrünungen. Unter den Aspekt der Luftschadstoffe fallen, wie in *Kapitel 2.4.1* behandelt, eine Reihe von stofflichen Einflüssen und Parametern. In diesem Kapitel werden daher unterschiedliche Messmethoden zur Bestimmung von Umweltparametern im urbanen Raum vorgestellt. Der Fokus der Betrachtung ist die Messung von Stäuben in der Umgebungsluft und auf Oberflächen. Auf Grundlage der Materialbasis und der durchzuführenden Forschungstätigkeiten an den Praxisprojekten wurde die Betrachtungsebene erweitert. Zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit

von wandgebundenen Begrünungen in klimatischer Hinsicht wurden zusätzlich Temperatur- und Luftfeuchtwerte ermittelt. Die Verwendung der Echtzeitmessgeräte ermöglichte zudem die Aufnahme von Stickstoffdioxid und Ozon. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der genannten Parameter aufgezeigt. Die Messungen beruhen auf dem Prinzip von Differenzmessungen zwischen begrünten und unbegrünten Oberflächen [Vogt 2018, S. 8]. In *Kapitel 3.4* wird zudem ein Modellversuch zur künstlichen Bestäubung erläutert, bei dem unter kontrollierten Bedingungen Feinstaub auf Oberflächen appliziert wird.

3.1 Methodik zur Untersuchung von Umgebungsparametern

In diesem Kapitel wird die Untersuchung von Umgebungsparametern erörtert. Die Methoden zur Ermittlung der Parameter Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden im ersten Teil dargestellt. Anschließend erfolgt eine Aufschlüsselung der Methodik zur Ermittlung von Stickoxiden sowie der Staubkonzentration in der Umgebungsluft. Die Methoden zur

Ermittlung der Staubkonzentration werden aufgrund des thematischen Schwerpunkts der Arbeit vertiefend beschrieben. Im *Abschnitt 3.2* werden die vorgestellten Untersuchungsmethoden für die Umgebungsparameter zur Ermittlung von Stäuben auf Oberflächen und die Laborversuche zusammenfassend dargestellt.

3.1.1 Messmethoden zur Ermittlung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Zur Beschreibung unserer Umweltbedingungen wird eine Vielzahl an Parametern verwendet. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) ist in Deutschland die zentrale Instanz zur Erfüllung meteorologischer und klimatologischer Dienstleistungen [BMJ 1998, o.S.]. Die Stelle, an der eine Messgröße aufgenommen wird, bezeichnet man als Messort. Die Ermittlung von Umweltdaten aus Boden- und Atmosphärenbeobachtung wird zusammen in einem Messnetz organisiert [DWD 2012, S. 20]. Zu den meteorologischen Elementen, die messtechnisch erfasst

werden, gehören neben der Temperatur- und Luftfeuchtigkeit auch Luftdruck, Wolkenhöhe, Wolkenbedeckung, Niederschlag, Wind, Sichtweite, Sonnenscheindauer, Strahlung sowie agrarmeteorologische Messungen. Die meteorologischen Elemente haben Einfluss auf die Konzentration von Luftschadstoffen an einem Ort. Dabei sind die lokalen Wetterbedingungen unterschiedlich relevant für die verschiedenen Luftschadstoffe. Aus diesem Grund ist eine Trennung des Einflusses von Emissionen und Wetterbedingungen auf die lokale Luftschad-

stoffkonzentration kompliziert [UBA (Hrsg.) 2022, o.S.].

Zur Beurteilung eines Standortes hinsichtlich meteorologischer Parameter gelten Temperatur und Luftfeuchtigkeit für verschiedene Messungen im Bereich der Luftschadstoffe als relevant. Einige aktive Messgeräte wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, verfügen auch über Sensoren zur Messung von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck.

Die Temperatur ist eine physikalische Zustandsgröße, die den Wärmezustand eines Körpers oder Luftvolumens angibt. Es gibt drei Skalen, die zur Messung verwendet werden. Neben der Kelvin-Skala (K), wird die Temperatur auch mit der Fahrenheit-Skala (°F), sowie der Celsius-Skala (°C) angegeben. Heute werden in den meisten WMO-Mitgliedsstaaten die Temperaturen anhand nach der Kelvin-, und der Celsius-Skala beschrieben [DWD 2012, S. 39]. Zur Ermittlung der Lufttemperatur wird eine Vielzahl an Methoden verwendet. Die beiden am häufigsten verwendeten Messgeräte sind Ausdehnungs- und elektrische Thermometer [DWD 2012, S. 46ff.]. Heute finden regelmäßig sensorgestützte Thermo-

meter Anwendung, die die Temperatur in einem vorprogrammierten Intervall messen und die gesammelten Daten über einen internen Speicher bis zur Auswertung speichern.

Die Luftfeuchtigkeit beschreibt den Anteil des gasförmigen Wassers am Gasgemisch in der Erdatmosphäre [DWD 2012, S. 56]. Durch den Verdunstungsprozess wird der Erdoberfläche Wasser entzogen, das in Form von Wasserdampf der Atmosphäre zugeführt wird. Je nach Umgebungstemperatur kann die Verdunstungsrate und damit der Anteil an Wasser in der Luft geringer oder höher ausfallen. Die relative Feuchte ist dabei ein Maß der Luftfeuchte, das den Sättigungsgrad der Luft in Prozent angibt. Häufig werden dafür Hygrometer verwendet, die den Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung bestimmen. Zur meteorologischen Überwachung der Umgebung sind Kombigeräte geeignet, die mehrere Parameter gleichzeitig aufnehmen. Sogenannte Polymeter werden zur Ermittlung von relativer Feuchte, Temperatur, Taupunkttemperatur, Sättigungsdampfdruck, Sättigungsdefizit und absoluter Feuchte eingesetzt. [DWD 2012, S. 67].

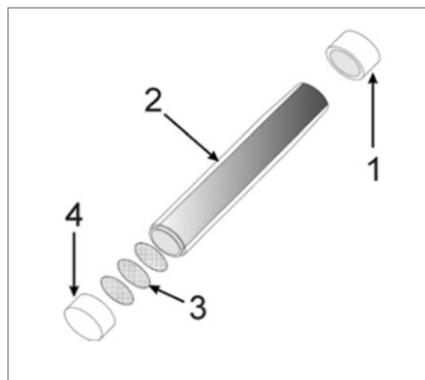
3.1.2 Messmethoden zur Ermittlung von Stickoxidkonzentrationen in der Umgebungsluft

Es gibt unterschiedliche Methoden, um die Konzentration von Stickstoffoxiden in der Umgebungsluft zu ermitteln. Unterschieden wird dabei nach aktiven und passiven Verfahren. Beide verfolgen das Ziel, die Stickoxidkonzentration in der Luft in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zu ermitteln. Während zur Überwachung der Stickstoffdioxidwerte nur vereinzelt aktive Messgeräte verwendet werden, kann mit Passivsammlern eine Vielzahl an räumlichen Orten überwacht und damit Einsicht in die Verteilung von Stickstoffdioxid im Stadtraum gegeben werden [Passam AG 2012, S. 1]. Ein gängiges Verfahren zur aktiven

Messung von Stickstoffoxiden ist die Chemilumineszenz-Messung nach DIN EN 14211:2012 – „Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffoxiden und Stickstoffmonoxiden mit Chemilumineszenz“. Bei diesem Verfahren wird Luft durch einen Filter des Chemilumineszenz-Messgerätes angesaugt und bei konstantem Volumenstrom in eine Reaktionskammer geleitet. Dort reagiert das Stickstoffmonoxid mit Ozon, das Ozon künstlich im Messgerät erzeugt wird [Vogt 2018, S. 16f.]. Das Ozon (O_3) reagiert chemisch mit dem im Proben gas vorhandenen Stickstoffmonoxid (NO)

Abbildung 24 (oben): Prinzip eines Stickstoffdioxid-Passivsammlers mit zylindrischem Röhrchen (Passam AG 2012).

Abbildung 25 (unten): Kleine Ausführung eines Passivsammlers für Stickstoffdioxid (Passam AG 2012).



zu Stickstoffdioxid (NO_2), das sich in einem angeregten chemischen Zustand befindet. Anschließend fällt es in den Grundzustand zurück. Mithilfe dieser chemischen Reaktion wird eine Ausendung von Licht erzeugt [Deutscher Bundestag 2018, S. 8]. Dieses Licht oder die Strahlung wird mit einem Fotomultiplier eingefangen und detektiert. Die erzeugten Signale verhalten sich proportional zur Anzahl der Stickstoffmonoxid-Moleküle. Das Signal wird anschließend als elektrisches Signal zur Weiterverarbeitung der Daten bereitgestellt. Das im Probengas vorhandene Stickstoffdioxid (NO_2) wird durch einen Konverter zu Stickstoffmonoxid reduziert und auf die eben beschriebene Weise bestimmt. Anschließend kann auf dieser Grundlage die Gesamtkonzentration an Stickstoffdioxiden durch die Differenz der Konzentrationen von NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) und NO berechnet werden. Die aktive Messmethode ermittelt die Konzentration von Stickstoffdioxiden in der Maßeinheit $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Das Prinzip zur Sammlung von Stickstoffdioxiden mit Passivsammlern ist ein nach DIN EN 16339:2013 standardisiertes Verfahren, zur Bestimmung von Stickstoffdioxidkonzentrationen in der Umgebungsluft. Die Methode ist für einen Konzentrationsbereich von $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ geeignet. Der übliche Probenzeitraum mit den Passivsammlern beträgt ein bis vier Wochen [Deutscher Bundestag 2018, S. 8f.].

Das Prinzip dieser Sammler beruht auf der Funktionsweise der passiven Diffusion von Stickstoffdioxid-Molekülen an einem absorbierenden Medium [Passam AG 2012, S. 1]. Die Geometrie der Sammler basiert auf konischen oder zylindrischen Röhrchen (Abbildung 24). Die Röhrchen bestehen aus Acryl (2), die Endkappe aus einem lichtundurchlässigen Polypropylen (4). An einem Ende befinden sich Drahtnetze aus nichtrostendem Edelstahl, die mit einer speziellen Lösung beschichtet werden. In die Endkappe (4) werden drei dieser beschichteten Netze (3) eingegeben. Die Kappe (1) ist vor der Probennahme

zu entfernen. Zur kurzfristigen Probennahme von Tageswerten werden auch kleinere Passivsammler eingesetzt (Abbildung 25).

Zum Schutz vor Witterung werden die Sammler in einer Schutzvorrichtung eingehängt. Diese ist fester Bestandteil des Messverfahrens [EN16339 2013, S. 20f.] In die Schutzbehälter können je nach Hersteller bis zu sechs Passivsammler integriert werden. Die Messorte sind so zu wählen, dass die Schutzbehälter frei anströmbar sind. Die geeignete Höhe für die Messungen liegt zwischen 2,0 und 2,5 m. Für eine anschließende Auswertung der Proben ist eine genaue Dokumentation des Messorts und der Probenbedingungen zwingend erforderlich [Passam AG 2012, S. 2]. Die Analyse der Röhrchen erfolgt anschließend nach der Analysemethode der Kolorimetrie, entsprechend dem Saltzmann-Verfahren [Vogt 2018, S. 21]. Die Menge des absorbierten NO_2 verhält sich dabei proportional zur Umgebungskonzentration. Nach der Ermittlung der Aufnahmezeit kann über die Expansionszeit auf die NO_2 -Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ geschlossen werden.

3.1.3 Messmethoden zur Ermittlung von Staubkonzentrationen in der Umgebungsluft

Zur Beurteilung der Luftqualität müssen die Mitgliedsstaaten der EU einheitliche Verfahren anwenden, um die Vergleichbarkeit und Gültigkeit der Messtechniken und – methoden

zu gewährleisten. Zur Beurteilung der Staubkonzentration in der Umgebungsluft werden aktive und passive Verfahren angewendet.

3.1.3.1 Aktive Verfahren

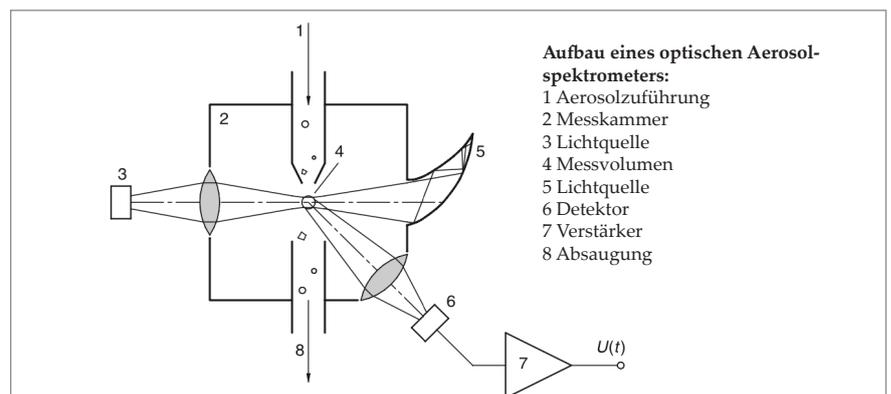
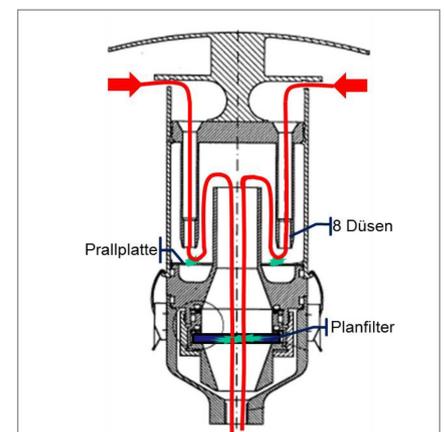
Maßgebend hierfür sind die in DIN EN 12341 dargestellten Standardmessverfahren zur Bestimmung der PM₁₀- und PM_{2,5}-Massenkonzentration [DIN EN 12341 2019, S. 5]. Die Verfahren beruhen auf dem Prinzip der gravimetrischen Messung mithilfe von Kleinfiltergeräten [Vogt 2018, S. 21]. Hierbei wird die Außenluft aktiv mit einem konstanten Volumenstrom von 2,3 m³/h durch einen größe selektiven Probeneinlass angesaugt [DIN EN 12341 2019, S. 5]. Im Partikelabscheidekopf befinden sich zwei scharfe Umlenkungen, durch die der Volumenstrom geleitet wird. Die größeren Partikel werden innerhalb der Umlenkungen abgeschieden, die feineren Partikel gelangen mit dem Volumenstrom in das Innere des Partikelabscheidekopfs, wo sie an einem Partikelfilter gesammelt werden [DIN EN 12341 2019, S. 13]. Die auf dem Filter gesammelte Masse des PM-Materials wird nach einer Nenndauer von 24 Stunden vor und nach der Messung durch Wägung des Filters bestimmt. Eine Standard-Probeneinrichtung besteht üblicherweise aus den folgenden Elementen (Abbildung 27):

- größe selektive Probeneinlässe
- Verbindungsrohrleitungen
- Filterhalter mit Filter
- Durchflusseinstellsystem
- Probenwechsler
- Lagerungseinrichtungen für Filter im Probennahmegerät.

Die Anforderungen an die einzelnen Bauteile sind in DIN EN 12341 Abschnitt 5 aufgeführt. Von Bedeutung ist, dass die Filter einen Abscheidegrad von mindestens 99,5 für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 0,3 µm aufweisen [DIN EN 12341 2019, S. 16].

Ein weiteres Verfahren zur Messung der Partikelkonzentration in der Umgebungsluft ist das optische Verfahren mittels Aerosolspektrometers. Die Grundlage hierfür bildet die VDI 3867 Blatt 4. Der Luftstrom wird dabei über eine Aerosolzuführung durch ein intensiv beleuchtetes Messvolumen geleitet. Das von den Partikeln gestreute Licht wird messtechnisch erfasst. Die Intensität der Streuung wird dabei als Maß für die Partikelgröße interpretiert. Mithilfe der Anzahl der gezählten Streulichtimpulse bei vorher definiertem Probennahmestrom sowie festgelegter Messdauer kann dann auf die Partikelanzahlkonzentration geschlossen werden [VDI 3867 2009, S. 15]. Die Partikel werden in diesem Verfahren gezählt und in Größenklassen eingeteilt. In *Abbildung 26* wird der grundlegende Aufbau dargestellt.

Abbildung 26 (oben): Partikelabscheidekopf, Schnittansicht (Vogt 2018).
Abbildung 27 (unten): Aufbau eines optischen Aerosolspektrometers (VDI 3867 2009).



Der von der Lichtquelle – in der Regel ein Laser oder Hochdrucklampen – erzeugte Lichtstrahl wird von den Partikeln im Bereich 4 gestreut. Die gestreuten Laserimpulse treffen dann über einen Spiegel auf den Detektor, der die Partikel einzeln aufnimmt [Vogt 2018, S. 15].

Ein Messgerät zur automatischen Bestimmung der Staubkonzentration nach DIN EN 16450:2017 ist das Feinstaubmessgerät Fidas der Firma Palas. Das *Fidas 200* ist ein optisches Aerosolspektrometer, das für behördliche Immissionsmessungen entwickelt wurde. Durch die thermische Aerosoltrocknung wird ein wartungsarmer Betrieb mit einem Wartungsintervall von drei Monaten gewährleistet. Mit dem integrierten Doppelpumpensystem wird eine Datenverfügbarkeit von 99 % garantiert. Das Gerät erhebt umfangreiche Messdaten von PM_{2,5}, PM₁₀, PM₁ sowie PM₄. Zudem fungieren die Messgeräte als Wetterstationen und nehmen Daten zum Luftdruck, zur Lufttemperatur und zur Luftfeuchte auf. Weitere Sensoren zum Wind und zum Niederschlag sind optional verfügbar. Aufgrund der zahlreichen Parameter der Einflussnahme bei einer Messung der Luftschadstoffkonzentration können die Parameter Wind und Niederschlag helfen, die gewonnenen Daten zu interpretieren. Ein Datenzugriff ist über eine Remote-Desktopverbindung möglich [Palas 2024, S. 5f.]. Dieses Gerät ist für die stationäre Messung von Luftschadstoffen ausgelegt, weshalb mit ihm auch Langzeitmessungen durchgeführt werden können. Palas besitzt ebenfalls eine Einheit zur mobilen Feinstaubmessung. Der *Fidas Frog* ist batteriebetrieben und misst Feinstaub. Konzentrationsverläufe werden hierbei automatisch visualisiert und somit direkt sichtbar. Allerdings ist das Gerät auf Grund der Akkukapazitäten nur für zeitlich beschränkte ortsgebundene Messungen geeignet. Beide Anlagen werden mit einem Kalibrierstaub geliefert, wodurch die kor-

rekte Funktion der Systeme überprüft werden kann [Palas 2024, S. 5f.].

Eine Alternative zu den aufgezeigten optischen Aerosolspektrometern sind automatische Messeinrichtungen zur Überwachung der Luftqualität im Low-Tech-Bereich. Die Eignung zur automatischen Messeinrichtung (AMS) muss über eine Eignungsprüfung nachgewiesen werden [VDI 4202 2019, S. 3]. Die automatische Messung zur Bestimmung der Staubkonzentration ist in der DIN EN 16450:2017 abgebildet. Im Allgemeinen besteht eine automatische Messeinrichtung aus:

- einem größenselektiven Einlass
- einem Probennehmerrohr
- einer Messeinheit
- einer Vakuumpumpe
- Durchflussmessgeräten und -reglern
- Temperatur-, Feuchtigkeits- und Drucksensoren
- Hard- und Software für die Datenerfassung und Speicherung [DIN EN 16450 2017, S. 11]
- Mobilfunkeinrichtung zur Versendung von Daten.

Die Auswertung der Daten kann systemgestützt mit dem Messgerät erfolgen. Alternativ wird ein Datensatz zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt. Grundsätzlich steigt das Interesse an der Lufttreinhaltung, was sich im Angebot der freien Sensoren widerspiegelt. Viele dieser Low-Tech-Geräte können selbstständig zusammengebaut und verwendet werden [LUBW 2017, S. 4f.]. Um die offiziellen Kriterien nach DIN 12341 zu erfüllen, müssen die Geräte jedoch validiert und geprüft werden. Viele von ihnen eignen sich für den Heimgebrauch, jedoch nicht zum Einsatz als offizielle Messstelle.

3.1.3.2 Passive Verfahren

Zur Beurteilung der Luftqualität werden neben aktiven auch passive Verfahren mit Auffanggefäßen oder Akzeptorflächen (nach VDI 2119:2013) verwendet. Die Verwendung von Auffanggefäßen, beispielsweise nach der Bergerhoff-Methode, ist in VDI 4320 Blatt 2 erläutert. Das Verfahren wird zur Bestimmung des Staubniederschlags angewendet. Dazu wird die gesamte trockene und nasse Deposition, die sich über einen festen Zeitraum im Auffanggefäß gesammelt hat, verdampft. Die festen Partikelrückstände werden im Anschluss auf verschiedene Bestandteile analysiert [LFU Bayern 2024, o.S.]. Da sich eine der Testflächen im Tunnel befindet und es hier nicht zu nasser Deposition kommt, wurden Akzeptorflächen eingesetzt.

Die Abscheidung von Partikeln auf Akzeptorflächen erfolgt mithilfe von Sigma-2-Passivsammlern. In dem windberuhigten, niederschlagsgeschützten Zylinder mit der waagerechten Halterung für die Akzeptorfläche erfolgt die Abscheidung nahezu ausschließlich über Sedimentation (*Abbildung 28*) [VDI 2119 2013, S. 3]. Die hier gesammelte trockene Sedimentation ist Bestandteil der gemäß VDI 4320 Blatt 1 definierten atmosphärischen Deposition. Die Auswertung der Partikel erfolgt mikroskopisch-manuell, halbautomatisch oder automatisch, nach Art und Anzahl sowie hinsichtlich der optischen Eigenschaften. Die daraus gewonnenen Daten können in die Berechnung der größenfraktionierten Anzahldepositionsrate einfließen [VDI 2119 2013, S. 3]. Mit dem Verfahren werden Partikel in der Größenfraktion von 2,5 bis 80 µm erfasst. Mithilfe der Analysewerte kann eine Partikel-Anzahldepositionsrate (Partikel pro Fläche und Sammelzeitraum) ermittelt werden. Die daraus resultierenden Daten können in die Berechnung der Partikel-Massenkonzentration einfließen (Partikelmasse pro Luftvolumen) [DWD 2014, S. 14f.].

Die Sigma-2-Passivsammler benötigen eine minimale Luftströmung und sind an ihrem Einsatzort frei anströmbar aufzustellen. Größere Hindernisse in der Nähe des Aufstellortes sind zu vermeiden [Particle Vision GmbH 2017, S. 1]. Die Höhe der Passivsammler richtet sich nach den Empfehlungen für Immissionsmessungen. Die Einlasshöhe sollte bei der Verwendung zu Luftqualitätsmessungen mindestens 1,5 m und nicht mehr als 4,0 m über Grund betragen. Bei verkehrsbezogenen Messungen wird zudem ein maximaler Abstand von 10 m zum Fahrbandrand empfohlen [VDI 2119 2013, S. 3]. Dieses Verfahren ist einfach durchzuführen und kostengünstig. Bei der Verwendung spezieller Akzeptoroberflächen (*siehe Kapitel 3.2.2*) können auch tiefergreifende analytische Betrachtungen vorgenommen werden. Das Verfahren eignet sich zur Quellenzuordnung der gesammelten Partikel sowie für Vergleichsmessungen.



Abbildung 28: Eingesetzter Sigma-2 Passivsammler im Citytunnel Darmstadt.

3.2 Methodik zur Untersuchung von Stäuben auf Oberflächen

Der Methodik zur Untersuchung von Stäuben auf Oberflächen liegt der physikalische Prozess der Deposition zugrunde. Das bedeutet eine Ablagerung von Stoffen aus der Atmosphäre auf belebten und unbelebten Oberflächen [LUBW (Hrsg.) 2024, o.S.]. Eine Untersuchung der stofflichen Ablagerungen

ist mit unterschiedlichen Verfahren möglich. Die quantitative Bestimmung ermöglicht Aussagen zur Anzahl und Klassifizierung der Partikel, während die qualitative Bestimmung die Ursprungsbestimmung und Einzelbetrachtung der Partikel beinhaltet.

3.2.1 Quantitative Bestimmung von Stäuben auf Oberflächen

Bei der quantitativen Betrachtung von Stäuben auf Oberflächen wird dasselbe Verfahren wie bei der Untersuchung der Umgebungsluft in *Kapitel 3.1.3.2* angewendet. Die Probennahme erfolgt wieder mit Sigma-2 Passivsammlern nach VDI 2119:2013. Die durch die Öffnungen des Sammlers eintretenden Partikel können im windberuhigten Bereich ungehindert absinken. Zur Probennahme eignen sich Standard-Glasobjektträger mit adhäsiven Sedimentationsflächen. Alternativ können transparente Akzeptoroberflächen, zum Beispiel Haftfolien, verwendet werden [VDI 2119 2013, S. 14]. Die Auswertung der Proben kann ebenfalls manuell, halbautomatisch oder vollautomatisch durchgeführt werden. Zur Einstellung des Mikroskops und zur Qualitätssicherung der erhobenen Messdaten ist die Verwendung eines Referenzpräparats erforderlich. Das Dauerpräparat kann vom Deutschen Wetterdienst bezogen werden [VDI 2119 2013, S. 20]. Die Zählfläche richtet sich nach der entsprechenden Immissionsbelastung. Dabei sollte eine Mindestzählfläche von 10 mm² nicht unterschritten werden [VDI 2119 2013, S. 27]. Auf die Analyse der Proben wird in *Kapitel 5.2* eingegangen. Dort werden auch das verwendete Mikroskop und die damit einhergehende Auswertungsmethode erläutert. Gemäß VDI 2119:2013 können die in Mitteleuropa in der Atmosphäre auftretenden Partikel in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- **Sedimentierte, transparente, anorganisch-mineralische Partikel** (z.B. Quarz, Silikate, Salze)
- **Sedimentierte, transparente, biogene Partikel** (z.B. Pflanzen- oder Insektenteile, tierische oder menschliche Bestandteile)
- **Sedimentierte, opake, vorwiegend anthropogene Partikel** (z.B. Rückstände aus Verbrennungsprozessen, Abrieb) [VDI 2119 2013, S. 22f.].

Eine andere Methode, um Partikel von Oberflächen zur Analyse zu trennen, ist das sogenannte Abwaschverfahren. Es eignet sich auch zur Analyse von Blattoberflächen. Dazu wird der Gesamtschwebstaub von den zu untersuchenden Blättern abgewaschen und spektrometrisch durch Trübungsmessung des Abwaschwassers untersucht. [IASP 2007, S. 65]. Je nach Partikelanhaftung an der Blattoberfläche können jedoch nur mittlere und nicht reproduzierbare Anteile immissionsbedingter Ablagerungen entfernt werden [Thönnessen 2002, S. 30f.]. Zudem können meist nur die Grobpartikel abgelöst werden. Das liegt unter anderem an der komplexen Oberflächenstruktur der Blätter. Schon Thönnessen hat in seinen Untersuchungen Zweifel an dieser Methode zur Reinigung von Blattoberflächen geäußert. Stattdessen hat er verschiedene auf Waschen oder mechanischer Reinigung basierende Verfahren getestet:

- intensives Waschen über 10 Mi-

nuten,

- Reinigung der Blätter mit organischem Lösungsmittel Chloroform durch Spülen und anschließende Nachbehandlung mit Wasser,
- Blattreinigung mit Alconox,
- Reinigung der Blätter durch Stripping mit zwei verschiedenen Polyvinylbutyral-Abziehlacken [Thönnessen 2002, S. 31].

Die vergleichenden Untersuchungen belegen, dass es bei unterschiedlichen Reinigungsmethoden zu großen Unterschieden in den Ergebnissen kommt. Um die Methodik des Abwaschens zu überprüfen, wurden eigene Voruntersuchungen mit mechanischer Reinigung von Blattoberflächen im Labor vorgenommen.

Dazu wurden Blattausschnitte der *Bergenia cordifolia* 'Baby Doll', über einen Zeitraum von 14 Tagen im Citytunnel Darmstadt exponiert und anschließend im Labor für 15 Minuten im Ultraschallbecken mit H₂O gereinigt. Sodann wurde die Blattoberfläche mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops untersucht. Wie in *Abbildung 30* zu erkennen ist, konnten insbesondere die feinen Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 2,5 µm nicht entfernt werden.

Zudem kann es bei Niederschlag oder Tropfeneinfall auf den Blattoberflächen zu vermehrter Bildung von Partikelagglomeraten kommen (*Abbildung 29 und 30*). Bei der quantitativen Betrachtung werden dadurch die Analyseergebnisse beeinträchtigt.

Gravimetrische Verfahren

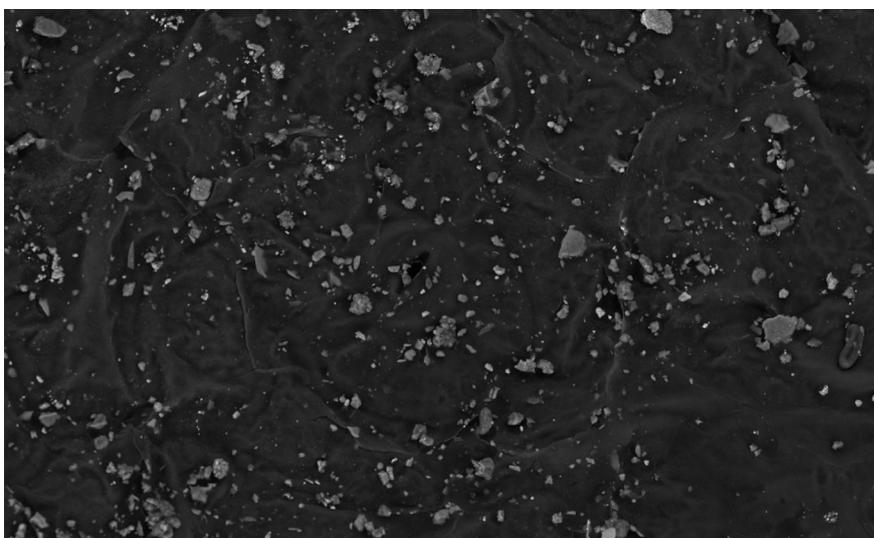
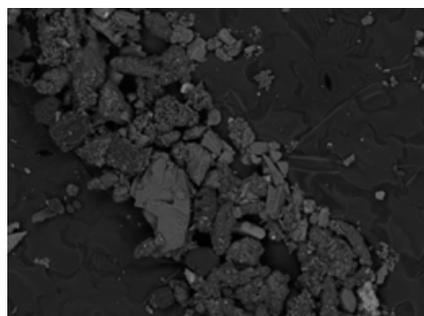
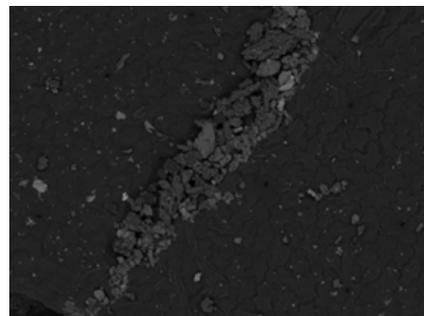
Die in *Kapitel 3.1.3.1* beschriebene Methode der gravimetrischen Messung mit Kleinfiltergeraten, eignet sich ebenfalls zur Messung von Partikeln auf Oberflächen. Die Partikel werden dabei auf einem Planfilter in einem definierten Zeitraum gesammelt und nach Abschluss der Messung durch Wägung ausgewertet. Die Bestimmung der Masse muss unter zuvor festgeleg-

ten konstanten Bedingungen erfolgen, um einheitliche Messergebnisse zu generieren. Insbesondere der Feuchtigkeitsgehalt hat Einfluss auf das Messergebnis und kann zu größeren Messunsicherheiten führen [Vogt 2018, S. 13f.]. Der Filter kann einen Teil der Luftfeuchte aufnehmen und damit das Gewicht verändern, sodass ein Teil der Gewichtsänderung der unbeladenen und beladenen Partikel auf die Veränderung des Feuchtegehalts der Filter zururckzufuhren ist. Es besteht die Möglichkeit, die Filter zum Zweck der Bestimmung der Massenkonzentration anzupassen und je nach Betrachtungsebene Filter für PM10 oder PM2,5 einzusetzen. Mithilfe der Filter können weitere Untersuchungen vorgenommen werden. So kann beispielsweise die Konzentration der erfassten Schwermetalle oder einzelner Bestandteile von PM2,5 bestimmt werden. Die Anforderungen an die Einrichtung zur Wägung sind in DIN EN 12341:2014 definiert. Durch die Massendifferenz zwischen den beladenen und unbeladenen Partikelfiltern kann die Massenkonzentration in der Einheit µg/m³ beschrieben werden.

Abbildung 29 (oben): Partikelagglomerat auf der Blattoberfläche von Bergenia cordifolia 'Baby Doll'.

Abbildung 30 (Mitte): Agglomeratbildung auf der Blattoberseite von Bergenia cordifolia 'Baby Doll'.

Abbildung 31 (unten): Darstellung einer Blattoberfläche von Bergenia cordifolia 'Baby Doll' nach dem Waschvorgang im Ultraschallbecken für ein Zeitintervall von 15 Minuten.



3.2.2 Qualitative Bestimmung von Stäuben auf Oberflächen



Abbildung 32: Verwendung eines Zeiss GeminiSEM 300 zur morpho-chemischen Partikelanalyse.

Zur qualitativen Bestimmung von Stäuben werden ebenfalls die bereits beschriebenen Methoden zur Abscheidung von Partikeln auf einer Oberfläche verwendet, die anschließend analysiert werden können. Ziel ist auch bei dieser Methode eine Massenkonzentrationsberechnung, sowie die Klassifizierung der Partikelbestandteile. Eine Möglichkeit der Klassifizierung sind die nach VDI 2119:2013 beschriebenen Unterscheidungsmerkmale der Partikel (siehe Kapitel 3.2.1). Die Klassifizierung richtet sich nach optischen Merkmalen der Partikel. So können die Partikel je nach Oberflächenfarbe oder -geometrie in unterschiedliche Klassen, zum Beispiel Reifenabrieb oder Pollenkörner eingeteilt werden. Auch lassen sich daraus die mögliche Herkunft, Zusammensetzung und Bedeutung für die menschliche Gesundheit oder Ökosysteme ableiten [DWD 2014, S. 15]. Ohne eine bildgestützte Auswer-

tung ist die Klassifizierung und eindeutige Zuordnung der Partikel jedoch komplex. Eine tiefergreifende Methode zur Bildaufnahme, Bestimmung und Klassifizierung von Partikeln liefert die Rasterelektronenmikroskopie verbunden mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie.

Durch eine Probennahme mit Passivsammlern werden Partikel in der Größenfraktion zwischen 1 und 80 μg gesammelt und einzeln auf Größe, Form, Struktur und chemische Zusammensetzung hin untersucht. Auch bei dieser Methode ist es von Vorteil, die Partikel nach Größe zu unterteilen und die Größenfraktionen PM10-2.5, sowie PM80-10 getrennt zu betrachten. Die elektronenmikroskopische Einzelpartikelanalyse hat sich besonders für die Analyse größerer Partikel (PM10-2.5) innerhalb der Partikelfraktion PM10 bewährt [Particle Vision GmbH 2020, S. 8].

3.3 Methodik zur Untersuchung der Vitalität ausgewählter Vegetationsträger

Neben der Untersuchung von Umgebungsparametern und der Analyse von Partikelablagerungen auf Oberflächen liegt ein Fokus der Forschungsarbeit auf der Betrachtung der Vitalität der unterschiedlich eingesetzten Vegetationsträgern.

Der Einfluss von Immissionsschäden auf die Pflanzen hat unterschiedliche Auswirkung auf die Vitalität. Schädigungen durch urbane Einflüsse und Stressfaktoren können zu Assimilati-

onsstörungen und Vitalitätsminderung führen [IASP 2007, S. 149]. Gegenstand wissenschaftlicher Betrachtung waren bisher wandgebundene Bauweisen von Fassadenbegrünungen. Neben den Vegetationsträgern mit eingesetzten Stauden wurden auch Vegetationsträger mit vorkultivierten Moosmatten eingesetzt. Im Folgenden werden unterschiedliche Methoden zur Vitalitätsbetrachtung unterschieden nach Stauden und Moosen, vorgestellt.

3.3.1 Vitalitätsbetrachtung von Vegetationsträgern mit Stauden

Es gibt unterschiedliche Verfahren, um die Vitalität von Pflanzen zu bestimmen. Mit der Nutzung von biologischen Indikatoren können zeitabhängige Verläufe von Umweltbelastungen aufgezeigt werden. Um den Einfluss verkehrsbedingter Belastungen auf die Vegetation zu analysieren können Feldversuche durchgeführt werden, bei denen unterschiedliche Pflanzen in einem definierten Zeitraum an charakteristischen Standorten, zum Beispiel an einer vielbefahrenen Straße, Luftschadstoffen ausgesetzt werden [BASt (Hrsg.) 2010, S. 87]. Im Anschluss werden pflanzenphysiologische Untersuchungen durchgeführt.

Eine Möglichkeit sind spektralphotometrische Messungen, bei denen die Enzymaktivität in den Pflanzenteilen im Labor chemisch gemessen wird. Mithilfe der Aktivität unterschiedlicher Enzyme kann die Stoffwechselaktivität in den Zellen ermittelt werden. Dabei werden Vergleichsmessungen zwischen Pflanzen mit ähnlichen Bedingungen an unterschiedlichen Standorten durchgeführt. Eine verminderten Stoffwechselaktivität ist ein Indiz für schädigende äußere Einflüsse.

Eine weitere Möglichkeit zur Vitalitätsbestimmung ist die Messung des Chlorophyllgehalts. Mit einem höheren Chlorophyllgehalt können Pflanzen effektiver Photosynthese betreiben. Die Messung der Photosyntheseaktivität ist hingegen eine rein physikalische Methode, die unmittelbar an der lebenden Pflanze durchgeführt wird. Hierzu wird ein Fluorometer verwendet, das

die Leistungsfähigkeit des Photosystems der Pflanze feststellt [BASt (Hrsg.) 2010, S. 88].

Neben den messtechnischen Varianten kann die Vitalität der Pflanze auch über rein optische Merkmale beurteilt werden. Wenngleich diese Methode nicht zur physiologischen Erkennung von immissionsbedingten Vitalitätsverlusten an Pflanzen geeignet ist, kann die Entwicklung der Pflanzengesellschaft damit dokumentiert werden. Dazu werden in regelmäßigen Abständen habituelle Veränderungen fotografisch dokumentiert, miteinander verglichen und ausgewertet. Kriterium für eine Beurteilung ist bei dieser Methode der Deckungsgrad der Pflanzen im Begrünungsträger. Die Beurteilung von Pflanzen nach rein optischen Merkmalen hat aber zur Folge, dass Veränderungen erst sichtbar werden, wenn ein Mangelzustand bereits fortgeschritten ist [Texier 2018, S. 157]. Weiterhin können einzelne Pflanzenbestandteile mikroskopisch untersucht werden, um den Anteil an Zellen mit zerstörten Chloroplasten oder Nekrosen, sowie den Befall mit Algen und Pilzen beurteilen zu können [Thielen 2018, S. 4].

Ein weiteres Indiz für die Gesundheit der Pflanzen im Begrünungssystem ist der Befall durch Schädlinge. Sollten sich im Untersuchungszeitraum Schädlinge auf den Testflächen einfinden, kann dies ein Merkmal für stressbedingte Reaktionen der Pflanzen sein.

3.3.2 Vitalitätsbetrachtung von Vegetationsträgern mit Moosen

Umweltveränderungen lassen sich mit lebenden Organismen besonders gut erfassen und analysieren. Da jeder Organismus bestimmte Standortansprüche hat und auf Veränderungen der Umwelteinflüsse reagiert, sind alle Organismen Indikatoren für den jeweiligen Standort. Als Bioindikatoren eignen sich besonders Arten, die sehr empfindlich oder spezifisch reagieren [Frahm 2001, S. 293]. Aus physiologischen und morphologisch-anatomischen Gründen sind Moose als Bioindikatoren geeignet. Diese Eigenschaften setzen sich wie folgt zusammen:

- poikilohydrische Lebensweise (Aufnahme von Wasser und Nährstoffen direkt über die Oberfläche),
- artenspezifisch kurze Lebenszyklen und dadurch schnelle Reaktion auf Umweltbedingungen,
- Moose sind zumeist aufgrund äußerer Merkmale identifizierbar,
- Moose haben eine ganzjährige Vegetationsperiode und sind damit als Bioindikatoren sichtbar [Frahm 2001, S. 293].

Ein Indikator für ein gesundes Wachstum von Moosen ist der Zuwachs der Triebe. Zur Zuwachsmessung eignen sich zwei Methoden. Da sich Moose während des Wachstums dichotom verzweigen können, nimmt die Anzahl der Triebspitzen bei wachsenden Moosen zu. Bei der Zuwachsmessung der Moose können daher in regelmäßigen Zeitintervallen Dichtebestimmungen anhand der Anzahl der Triebspitzen durchgeführt werden. Voraussetzung hierfür ist die genaue Festlegung der Untersuchungsflächen im Untersu-

chungszeitraum. Zur Definition der Untersuchungsflächen wird eine feste Markierung auf den Moosflächen vorgenommen. Neben der Dichtebestimmung kann eine Zuwachsmessung nach der *Cranked-Wires*-Methode [Russell 1984] durchgeführt werden. Bei diesem Verfahren wird mithilfe von Edelstahldrähten oder anderen Fixpunkten der Zuwachs des Moosrasens ermittelt. Grundlage hierfür ist die Dokumentation der Markierung zu Anfang und Ende des Untersuchungszeitraums. Die Differenz zwischen den markierten Punkten bildet den Zuwachs [Thielen 2018, S. 3f.]. Auch bei den Moosen können, ähnlich wie bei den Stauden, mikroskopische Untersuchungen zur Betrachtung der Vitalität herangezogen werden. Dabei werden zerstörte Chloroplasten oder Nekrosen sowie Algen- und Pilzbefall dokumentiert. Zudem können habituelle Veränderungen fotografisch festgehalten werden [Thielen 2018, S. 3f.].

3.4 Modellversuch zur Feinstaubbindung von wandgebundenen Fassadenbegrünungssystemen

Um die Leistungsfähigkeit einzelner Pflanzen zur Bindung von Feinstaub zu ermitteln, können auch kontrollierte Untersuchungen in einer Bestäubungsanlage durchgeführt werden. Dabei werden Grundlagen der Verfahrenstechnik angewendet, die zur Beschreibung der Abscheidung an Filtern Anwendung finden [Bracke 2012, S. 28]. Die Anlagen dienen dem Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen (z.B. Funktionsweise der Abscheidung an Pflanzen sowie Effizienz der verschiedenen Gattungen). Das Prinzip der Anlage beruht auf mehreren stofflichen Übertragungen. Ein Trägergas wird dabei über zwei Verfahren mit einem Teststaub vermischt und anschließend in die Bestäubungskammer geleitet. Dort umströmt das mit dem Teststaub versehene Gas die pflanzlichen Blattoberflächen. Dabei entsteht eine Stoffübertragung aus dem gasförmig-festen Zustand hin zu den Blattoberflächen. Je nach Untersuchungsgegenstand müssen die Pflanzen vorher gereinigt und vorbereitet werden [Reznik 2012, S. 80]. Zur Simulation können statische Versuchskammern oder ein Windkanal verwendet werden, in dem unterschiedliche Windsituationen nachgebildet werden können. Zur Messung der Luft in der Messkammer gibt es verschiedene Feinstaubmessgeräte, die verwendet werden können. Die Modelle reichen von tragbaren Standardgeräten zur Echtzeitmessung bis hin zu speziellen, für die jeweilige Messanforderung gefertigte Geräte. Die Auswertung der Versuche erfolgt zum einen über die Bestimmung der Partikelkonzentration

im Gas. Dazu kann ein optischer Partikelzähler wie in Kapitel 3.1.3.1 beschrieben verwendet werden [Bracke 2012, S. 26]. Zum anderen können Pflanzenteile nach der Bestäubung lichtmikroskopisch, gegebenenfalls mit zusätzlicher Analysesoftware, untersucht werden. Versuche andere Instituten (bspw. IASP, Berlin) arbeiten mit einem einfacheren Verfahren, um eine Tendenz in der Unterscheidung unterschiedlicher Abscheideleistungen zu erhalten. Dazu wird ebenfalls ein Teststaub mit den unterschiedlichen Testmedien in eine Messkammer eingeleitet. Die Feinstaubbindung der Prüfvarianten wird dabei anhand der Differenz der Partikelkonzentration nach Applikation des Staubs und zum Ende des Versuchs bestimmt (Abbildung 34) [Sempel et al. 2013, S. 1].

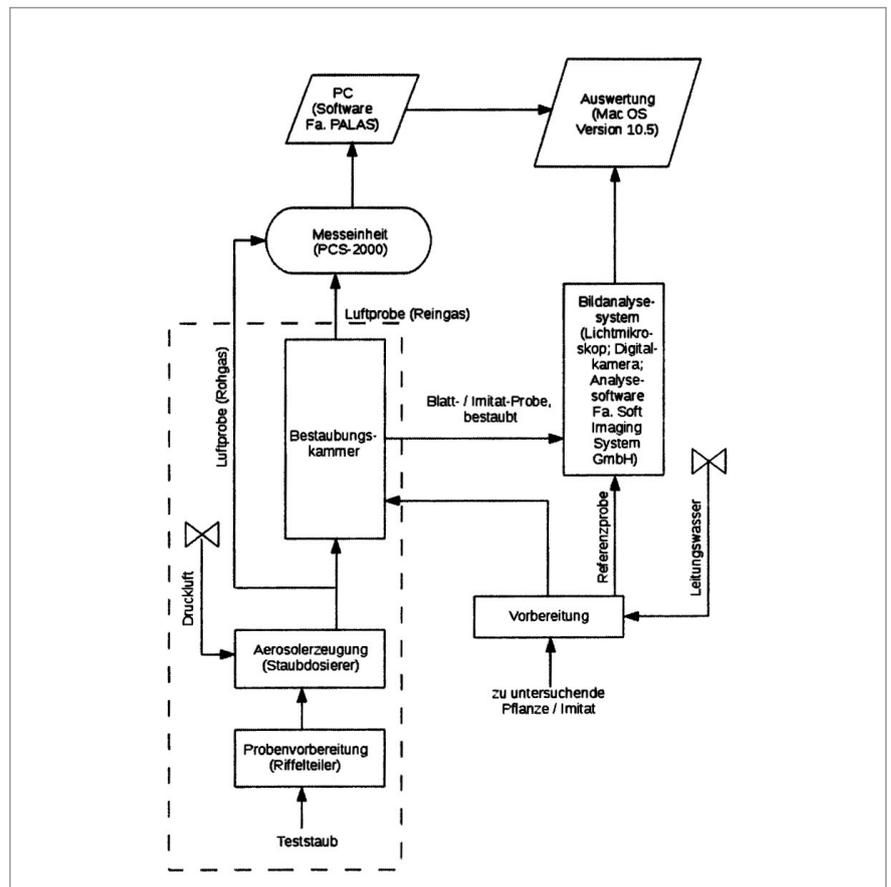


Abbildung 33: Schematische Darstellung einer Bestäubungsanlage zur Bestäubung von Pflanzen und anderen Oberflächen (Reznik 2012).

Abbildung 34: Versuch zur Bindung von Feinstaub durch Dachbegrünungsvegetationsmatten in einer Messkammer mit ausgerichteten Partikelmessgeräten (Gorbachevskaya 2013).

3.5 Zusammenfassung

Zur Analyse der Luftqualität in städtischen Räumen werden verschiedene Parameter betrachtet. Neben Klimadaten, werden Luftschadstoffe wie Feinstaub in verschiedenen Größensfraktionen, Stickstoffdioxid und Ozon als wesentliche Kennwerte einbezogen. Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung der Umweltparameter im urbanen Raum.

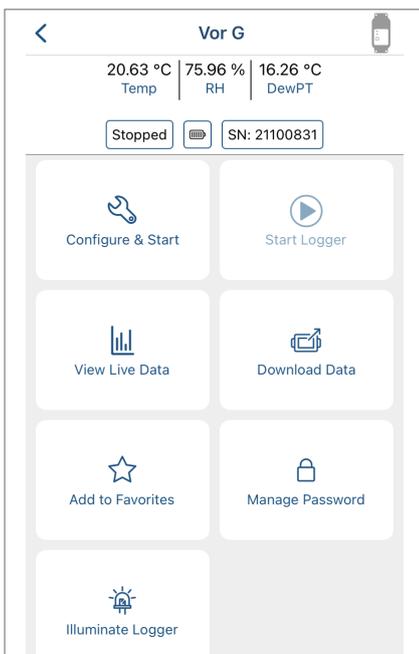
Hierbei wird zwischen aktiven und passiven Messverfahren unterschieden. Üblicherweise ermitteln Messungen die Gesamtkonzentration der Schadstoffe in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Bei den aktiven Verfahren zur Ermittlung von Stäuben in der Umgebungsluft wird die Luft von den Messgeräten angesaugt und die Staubmenge größenselektiv erfasst. Bei den passiven Verfahren wird der Umgebungsstaub über einen bestimmten Probennahmezeitraum in einem Auffanggefäß oder auf einer Akzeptor-

berfläche gesammelt und anschließend messtechnisch analysiert. Je nach Analyseverfahren können unterschiedliche Auswertungen vorgenommen werden. Bei der Verwendung eines Rasterelektronenmikroskops in Verbindung mit einem Partikel-Klassifikator können die Partikel anhand ihrer morphologischen und chemischen Eigenschaften Partikelgruppen zugeordnet werden. Neben Feldversuchen werden Laborversuche eingesetzt, um die Funktionsweise und Effizienz von Pflanzen zur Partikelabscheidung zu beurteilen. Die Vitalitätsbestimmung von Pflanzen kann anhand verschiedener Methoden erfolgen. Neben der Messung der Enzymaktivität, des Chlorophyllgehalts oder der Photosynthesaktivität kann der Zustand von Pflanzen auch aufgrund rein optischer Merkmale beurteilt werden.

Beschreibung der Versuchseinrichtungen

4. Beschreibung der Versuchseinrichtungen

Abbildung 35: Hobo Datenlogger mit Alarm LED, Status LED, Start-Taste und Montagelöchern, Erfassung der relativen Feuchte und der Temperatur.
Abbildung 36: Übersicht der HOBOMobile App.



Im Kapitel 3 wurden unterschiedliche Verfahren zur messtechnischen Erfassung von Umweltparametern dargestellt. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Betrachtung der Partikelabscheidung von Pflanzen in wandgebundenen Bauweisen. Dazu werden im ersten Teil dieses Kapitels die eingesetzte Messtechnik und die

Versuchsgeräte für die Feldversuche näher beschrieben. Im zweiten Teil werden die ausgewählten Versuchsflächen aufgeführt und hinsichtlich der räumlichen Einordnung, Konstruktion und Technik erörtert. Im Fokus stehen dabei die eingesetzte Bepflanzung und die Anordnung der Messgeräte.

4.1 Beschreibung der Messtechnik und Versuchsgeräte

In den Kapiteln 3.1 bis 3.3 erfolgte eine detaillierte Darstellung der unterschiedlichen Methoden zur Untersuchung von Umgebungsdaten und Stäuben auf Oberflächen. Gemäß den erläuterten Methoden wurden folgende Versuchsgeräte für die Untersuchung ausgewählt:

- Hobo-Datenlogger zur Ermittlung von Temperatur und relativer Feuchte
- Sigma-2-Sammler zur passiven Probenahme mit unterschiedlichen Akzeptoroberflächen

- Hawa Dawa Sentience Messgeräte zur Messung von Echtzeit Umweltdaten
- Zeitrafferkamera zur kontinuierlichen Überwachung des Wachstums von Stauden
- technische Konstruktion zur Wachstumsmessung bei Moosen nach der Cranked-Wires-Methode
- DustTrak DRX für Modellversuch zur Feinstaubbindung in Messkammer.

4.1.1 Hobo Datenlogger zur Ermittlung von Temperatur und relativer Feuchte

Die Datenlogger der Hobo-Serie MX 2301 A wurden dazu verwendet, die Temperatur und die relative Luftfeuchte im Außenraum zu erfassen. Sie sind mit einer Bluetooth-Funktion für die Verbindung mit einem Mobilgerät vorgesehen und können über eine eigene App eingerichtet und ausgelesen werden (Abbildung 36). Der Datenlogger besitzt interne Sensoren, die in einem vordefinierten Intervall Messungen durchführen. Die Temperatur kann in einem Bereich von -40 °C bis 70 °C erfasst werden. Die Genauigkeit der Geräte wird mit 0,2 °C angegeben. Die

relative Luftfeuchte wird zwischen 0 bis 100 % im zum definierten Temperaturbereich angegeben. Das Zeitintervall zwischen den Messungen kann von 1 Sekunde bis 18 Stunden variiert werden. Die interne Speicherkapazität reicht für maximal 84.650 Datensätze. Vor der Auslieferung werden die Geräte technisch überprüft und kalibriert.

4.1.2 Sigma-2-Sammler zur passiven Probennahme mit unterschiedlichen Akzeptoroberflächen

Zur passiven Probennahme wurden mehrere Passivsammler von Particle Vision eingesetzt. Die Sigma-2-Passivsammler von Particle Vision sind für den Außeneinsatz gemäß (VDI 2119:2013) geeignet. Die Passivsammler sind zylindrische Probenhalter mit einer Abdeckkappe am oberen Ende des Sammlers (Abbildung 37). Die Passivsammler werden frei anströmbar in vergleichbaren Höhen aufgestellt. Die Montage kann auf einem Pfahl, einer Stange oder mithilfe einer Bride mit

50 mm Innendurchmesser und einer Gewindestange an einer beliebigen Oberfläche erfolgen [Particle Vision GmbH 2017, S. 1].

Die Standorte sowie die Zuordnung zu den jeweiligen Testflächen der Passivsammler sind in Kapitel 4.2 beschrieben. Die Passivsammler wurden zur Beprobung mit Glassubstrat für die Lichtmikroskopie und mit C-Pad und Bor-Substrat für die Analyse mittels Rasterelektronenmikroskop bestückt.



Abbildung 37: Installierter Sigma-2-Passivsammler im Citytunnel Darmstadt.

4.1.3 Hawa Dawa Sentience Messgeräte zur Messung von Echtzeit-Umweltdaten

Die IoT-Sentience-Messgeräte von Hawa Dawa können als Messnetzwerk die wichtigsten Luftschadstoffe in Echtzeit messen. Die Geräte liefern permanent umfangreiche Daten zu den Luftschadstoffen NO_2 , O_3 , PM_{10} , und $\text{PM}_{2,5}$ sowie den zusätzlichen Umgebungsparametern Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit. Das Gerät ist für den kontinuierlichen, automatischen Einsatz konzipiert und verfügt über Funkschnittstellen zur Datenübertragung. Die Energieversorgung wird tagsüber durch wiederaufladbare Batterien sichergestellt [Hawa Dawa GmbH 2019, S. 3].

Die Geräte erfüllen die Qualitätsziele der 39. Bundesimmissionsschutz-Verordnung (BImSchV). Sie sind zudem für das langfristige Umweltmonitoring von Luftschadstoffen in urbanen Räumen konzipiert [Hawa Dawa GmbH 2020, S. 1f.]. Die Messeinheiten verfügen über einen zweistufigen Kalibrierungsprozess zur Sicherstellung der korrekten Datenerfassung. Die Daten werden in einer Plattform zusammengeführt und sind digital aus dem Browser abrufbar. In die Plattform lassen sich weitere Umweltdaten, beispielsweise zum Verkehr, sowie Daten öffentlicher Messstationen integrieren.

Die Messboxen sind herstellerseitig zur Montage an Lichtmasten vorgesehen, können aber auch an anderen geeigneten Stellen positioniert werden, sofern eine Stromversorgung sichergestellt ist. Mit der kompakten Abmessung von $358 \times 373,52 \times 93$ (L x B x T in mm) und dem geringen Gewicht von 3,2 kg sind die Geräte flexibel einsetzbar.

Wegen der einfachen Installation und anschließenden automatischen Kalibrierung über den Remote-Zugriff durch einen Hawa Dawa-Mitarbeiter eignen sich diese Geräte zur Umsetzung einer Vergleichsmessung. Folgende Kriterien sollten bei der Montage der Geräte erfüllt sein:

- Luftstrom an den seitlichen Auslässen der Messbox sollte nicht beeinträchtigt sein, sowie Hindernisse mit einem Abstand von weniger als 0,5 m, im Winkel von 270° oder 180° um den Messeinlass, sollten vermieden werden.
- Die Geräte sollten an einem offenen Ort montiert werden, keine Innenhöfe oder ähnliche Standorte, die stark von der Umgebung abgegrenzt sind.
- Die Messeinheiten sollten nicht neben einer ungewöhnlichen Emissionsquelle (Aschenbecher,

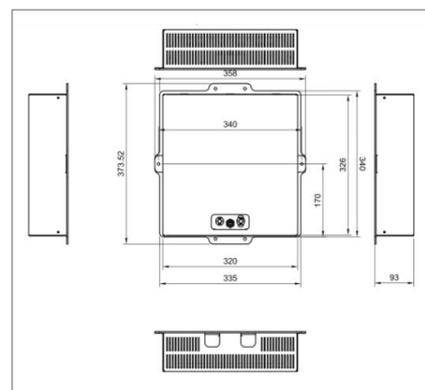


Abbildung 38: Technische Zeichnung der Hawa Dawa Messbox (Hawa Dawa 2019).



Abbildung 39: Seitliche Ansicht einer montierten Hawa Dawa Messbox in der Gladbecker Straße in Essen.

- Abzug, Schornstein, o.Ä.) installiert werden.
- Ideale Höhe der Geräte liegt bei etwa 2,80 m.
 - Zum Einsatz in einem Monitoring-Programm sollten die Geräte idealerweise an Straßen, Bürgersteigen oder Orten positioniert werden, wo sich Menschen aufhalten [Hawa Dawa GmbH 2019, S. 3].

Die Montage der Geräte kann mithilfe eines Sensorhaltersets und Bandverschlüssen erfolgen. Der Strom wird über einen verschraubten Stecker mit der Messbox angeschlossen. Nach erfolgreicher Installation können die Sensordaten auf der Webplattform überprüft werden. Die Messgeräte sowie deren Daten können mit einem

Abonnement-Modell über zwölf Monate in der Luftqualitätsplattform abgerufen werden.

Die sogenannten Basis-Funktionalitäten der Plattform umfassen die folgenden Leistungen:

- Luftqualitätsdaten der fünf Messboxen
- Luftqualitätsdaten weiterer Hawa Dawa Geräte in der Umgebung, sowie aller öffentlichen Messstationen
- Ausgabe der Daten, Analysen und Prognosen als dokumentierte API, JSON, XLS und CSV-Datei
- Datenhistorie jederzeit abrufbar
- Berechnung des AQI (Europäischer Air Quality Index) [Hawa Dawa GmbH 2020, S. 4].

4.1.4 Kamerasysteme zur Wachstumsüberwachung von Stauden



Abbildung 40: Zeitrafferkamera Brinno BCC2000 mit Wetterschutzgehäuse und verstellbarer Klemmhalterung (Brinno 2022).

Zur Überwachung der Entwicklung der Vegetationssysteme während der Messungen wurden zwei Kamerasysteme eingesetzt. Ein Vegetationssystem wurde kontinuierlich mit einer Zeitrafferkamera überwacht. Hierzu wurde eine Baustellen-Überwachungskamera BCC2000 von Brinno genutzt. Die Kamera erzeugt in festen Intervallen Einzelbilder, die anschließend zu einer

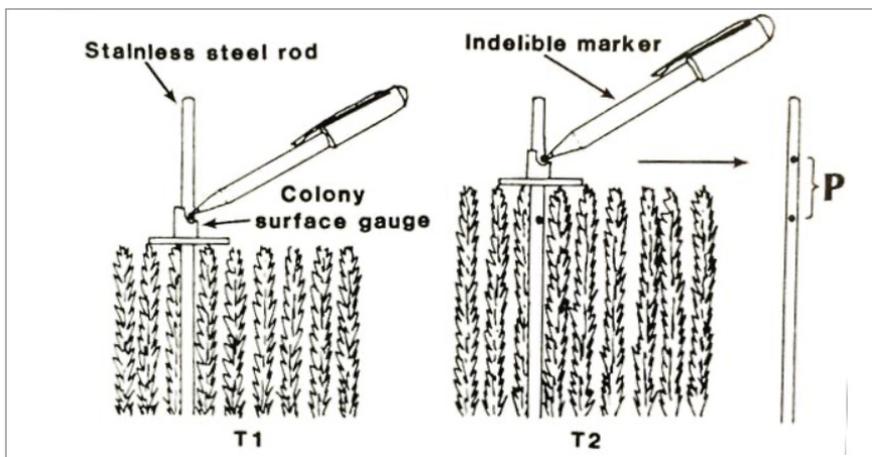
Gesamtaufnahme zusammengefügt werden. Je nach Einstellungsmodus kann die Kamera mit dem zusätzlichen Akku für bis zu 300 Tage autark betrieben werden. Zudem verfügt sie über ein Wetterschutzgehäuse und eine verstellbare Klemmhalterung, sodass eine flexible Montage ermöglicht wird (Abbildung 40).

4.1.5 Technische Konstruktion zur Wachstumsmessung bei Moosen nach der Cranked-Wires-Methode

Zur Wachstumsmessung von Moosen wurde die *Cranked-Wires-Methode* nach Russell angewendet [Thielen 2018, S. 16]. Aus Sicherheits- und Genehmigungsgründen wurden statt der im Versuch angegebene Edelstahlstäbe einseitig Schrauben an der

Unterkonstruktion der Moosmatten befestigt. Zur Wachstumsmessung wurden Rändelmutter bis zur Wuchshöhe der Moose aufgeschraubt. Nach der Messung der Schraubenlänge und der Wuchshöhe der Moose wurde die Rändelmutter wieder entfernt.

Abbildung 41 (links): *Cranked-Wires-Methode* zur Messung des Längenzuwachses von Moosen nach Russell 1984 (in Thielen 2018).
Abbildung 42 (rechts): Aufgedrehte Rändelmutter auf Schraubengewinde zur Wachstumsmessung nach *Cranked-Wires-Methode*
Abbildung 43 (unten): Integration des *Dust Trak DRX* in die Messkammer.



4.1.6 Modellversuch zur Feinstaubbindung in einer Messzelle

In diesem Abschnitt wird die verwendete Messtechnik für den Versuch erläutert. Der Modellversuch orientiert sich bezüglich Aufbau und Durchführung an eine Versuchsreihe des IASP der Humboldt-Universität in Berlin an. Die Versuchsreihe wurde an diesem Institut mit unterschiedlichen Vegetationsmatten aus der Dachbegrünung durchgeführt. Messgeräte und Einrichtung wurden von der Humboldt-Universität zur Verfügung gestellt. Aus Kompatibilitätsgründen wurde auf ein anderes Feinstaubmessgerät der TH

OWL zurückgegriffen. Das *DustTrak DRX*, das für diesen Versuch verwendet wurde, ist ein mehrkanaliges Laser-Photometer für Aerosolmessungen in Echtzeit [TSI GmbH 2024, o.S.]. Das Gerät kann die relevanten Massenanteilkonzentrationen an PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀ sowie die Gesamtgrößenfraktion messen. Es ist als tragbares Aerosolmessgerät konzipiert und eignet sich daher zur Integration in die für den Versuch vorgesehene Messkammer.



4.2 Beschreibung der ausgewählten Versuchsflächen

Die Untersuchung der Forschungsstellen erfolgte über den Zeitraum einer Vegetationsperiode, wobei der Beginn der Messungen projektspezifisch unterschiedlich war. Mit der angestrebten Langzeitmessung sollten mögliche Unterschiede im jahreszeitlichen Verlauf berücksichtigt werden. Gegenstand der Untersuchung waren unterschiedliche Flächen wandgebundener Begrünungen. Die Bauweisen unterschieden sich an den verschiedenen Standorten zum Teil. Die beiden Hauptstandorte der Untersuchungen waren eine Begrünung an der Gladbecker Straße

in Essen sowie eine Begrünung im Citytunnel in Darmstadt. Bei den Laborversuchen mit der Bestäubung unterschiedlicher Vegetationsflächen wurde zudem der Parameter Feinstaub betrachtet (Tabelle 3).

Die Versuchsflächen sind an verschiedenen Orten positioniert. Ziel war es seit Beginn der Forschungstätigkeit, mindestens eine Referenzfläche für die Staubbetrachtung zu wählen. Durch eine Forschungs Kooperation mit der Stadt Darmstadt wurde als erstes Projekt der Citytunnel in Darmstadt begleitet. Im Citytunnel wurden 2020/2021 verschiedene wandgebundene Begrünungen mit künstlicher Beleuchtung installiert. Als zweites Projekt wurde eine Begrünung an der Gladbecker Straße in Essen gewählt. Dieses von der *Allbau GmbH* in Essen betriebene Objekt hat 2019/2020 eine umfassende modulare wandgebundene Begrünung erhalten. Beide Standorte verfügen über eine hohe Staubbelastung, die schon vermehrt in der Presse thematisiert wurde [u.a. Funke Medien 2018, o.S.]. Aufgrund der hohen Belastungssituation steigt die Wahrscheinlichkeit zur Messung einer Differenz infolge der Begrünung [Krahl 2019, o.S.]. Zudem bestehen an beiden Standorten zusätzliche öffentliche Messstationen, deren Daten in die Untersuchung eingeflossen sind. Für die Klimadaten sollten ebenfalls Referenzmessungen erfolgen. Da die Tunnelsituation aufgrund der fehlenden Sonneneinstrahlung hierfür wenig aussagekräftig ist, wurde ein weiteres Projekt zur wissenschaftlichen Untersuchung ausgewählt. Der Laborversuch zur künstlichen Bestäubung

Abbildung 44: Räumliche Übersicht der Versuchsflächen (Google Maps, geändert).



bung unterschiedlicher Vegetationsflächen wurde im Bodenlabor der TH OWL durchgeführt. Die Anlage wurde dazu für den Zeitraum der Versuche vom IASP in Berlin ausgeliehen. Im

Folgenden werden die Projekte, die verwendeten Begrünungssysteme und die Messtechnik spezifisch erläutert.

	Versuchsstandort	Temperatur	Luftfeuchtigkeit	Stickstoffdioxid	Feinstaub
1.	Citytunnel Darmstadt	X	X	X	X
2.	Gladbecker Straße Essen	X	X	X	X
3.	Laborversuch TH OWL				X

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Versuchsstandorte und untersuchten Parameter.

4.2.1 Wandgebundene Begrünung Citytunnel Darmstadt

Seit einigen Jahren stehen der Citytunnel Darmstadt und die angrenzenden Straßenbereiche wegen zu hoher Luftbelastungen im Fokus der Öffentlichkeit. Gemeinsam mit der Initiative Essbares Darmstadt e.V., Dr. Florian Schneider, Kilian Lingen (Vertiko GmbH), Prof. Dr.-Ing. Nicole Pfoser und der Stadt Darmstadt wurde die Konzeption zur Begrünung des Citytunnels im Herbst 2019 erstellt. Die

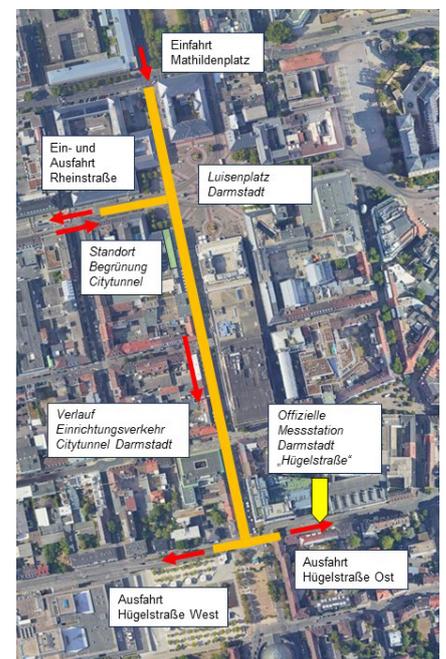
Umsetzung erfolgte im Dezember 2020. Das Projekt ist Teil einer Vision für die Stadt Darmstadt für einen integrierten Umwelt- und Biodiversitätsschutz im urbanen Raum [Initiative Essbares Darmstadt (Hrsg.) 2021, o.S.]. Durch die frühe Einbindung dieses Forschungsvorhabens in die Planungsphase der Citytunnelbegrünung konnte Einfluss auf die Pflanzenauswahl an der Begrünung genommen werden.

4.2.1.1 Räumliche Einordnung

Der Wilhelminentunnel in Darmstadt, auch Citytunnel genannt, führt die B26 unter dem Luisenplatz und der Wilhelminenstraße hindurch. Er hat eine Gesamtlänge von 540 m und wird täglich von etwa 20.000 PKW durchfahren [BHM Planungsgesellschaft GmbH 2021, o.S.]. Er ist für Darmstadt eine wichtige Verkehrsverbindung in nord-südlicher Richtung und führt im Einrichtungsverkehr vom Mathilden-

platz bis zur Hügelstraße. Der Citytunnel kann sowohl über die Rheinstraße im Westen als auch über den Cityring im Norden (am Mathildenplatz) befahren werden. Der Citytunnel endet mit der westlichen und östlichen Ausfahrt an der Hügelstraße. Zudem besteht im Citytunnel Anbindung an zwei Parkhäuser mit Ein- und Ausfahrten sowie an einen Anlieferungsbereich für das Luisencenter.

Abbildung 45: Übersicht Citytunnel Darmstadt mit Kennzeichnung der Ein- und Ausgänge (Google Earth, geändert).



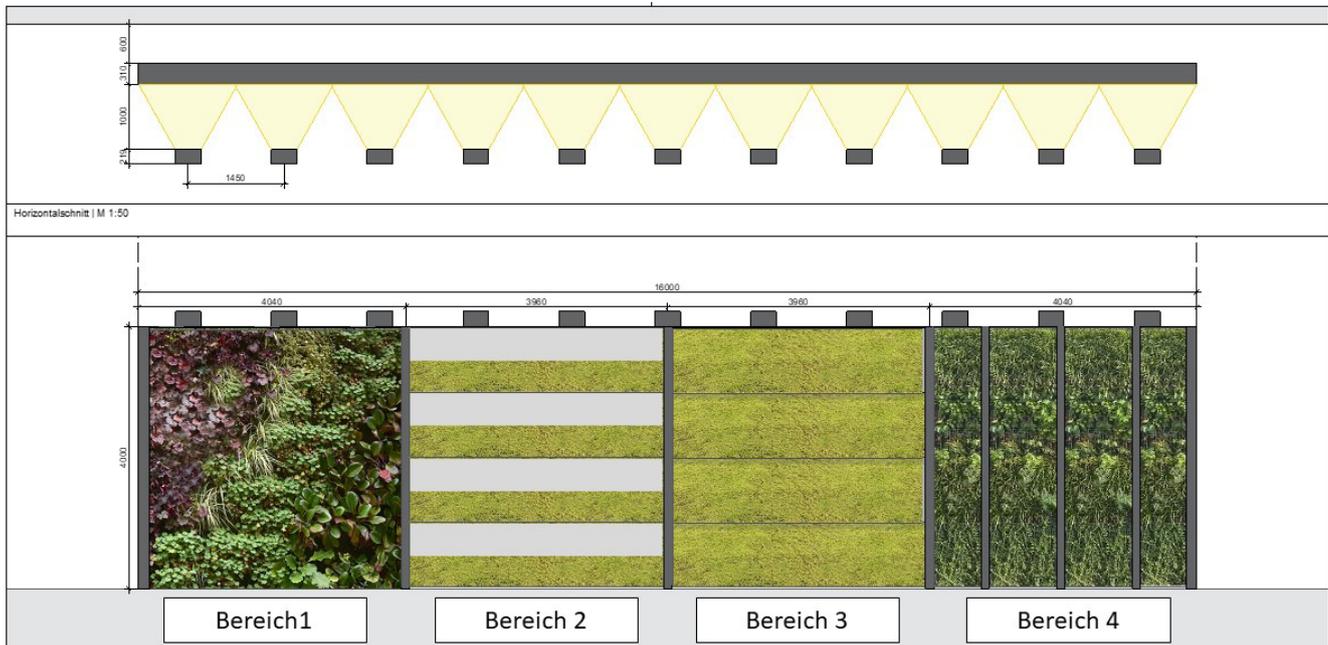
4.2.1.2 Konstruktion und Technik

Die Begrünung besteht aus insgesamt vier Bereichen, die sich in Art und Aufbau der Begrünung unterscheiden. Die Planung der vier Begrünungen und der dazugehörigen Bewässerungsanlage wurde von der *Vertiko GmbH* durchgeführt.

Die Konstruktion zur Befestigung der Begrünungsbauweisen ist eine freistehende und -tragende Aluminiumkonstruktion (*Anlage 2*). Im oberen Bereich der Konstruktion wurden Kragarme zur Befestigung der Beleuchtung installiert. Zwischen zwei Begrünungsbereichen befindet sich jeweils eine vertikale Stütze. Insgesamt verfügt die Anlage über zehn Pflanzenleuchten von BLV, Modell Amalion LED WW. Die Leuchten verfügen über ein pho-

tosynthetisch wirksames Lichtspektrum geeigneter Intensität, das an die Bedürfnisse unterschiedlicher Pflanzen angepasst ist [BLV Licht- und Vakuumtechnik GmbH 2016, o.S.]. Hinter der Begrünung von *Bereich 1* wurde eine Bewässerungstechnik der Vertiko GmbH in einem Technikraum installiert. Dort ist die Bewässerungsanlage mit den vier Bewässerungskreisen zur individuellen Bewässerung der vier Bereiche aufgebaut. Zur Vorbehandlung des Wassers wurde eine Osmoseanlage integriert (*Anlage 3*). Die Technischeinheit wird mit einer Frischwasserleitung und einem Stromanschluss versorgt. Zusätzlich wurde ein Notüberlauf mit Ablaufstutzen eingebaut.

Abbildung 46: Technische Zeichnung der Begrünung im Citytunnel Darmstadt mit den vier unterschiedlichen Bauweisen der Begrünung (*Vertiko GmbH 2020, geändert*).



4.2.1.3 Erläuterung der Begrünungsbauweisen und Bepflanzung

Bereich 1 (Abbildung 47) ist ein flächiges Living Wall-System der Firma Vertiko GmbH in der klassischen Bauweise mit einem PE-Kunststofftextil. Der Aufbau besteht aus mehreren Lagen Textil unterschiedlicher Stärke. In der Mitte des Aufbaus befinden sich Taschen, die mit einem Substrat gefüllt sind. Als Trägerplatte für das System wird eine Alucobond-Verbundplatte zur Befestigung des Textil-Substrat-Systems verwendet. In regelmäßigen horizontalen Abständen befinden sich Bewässerungsleitungen mit Tropfern, die Bereich 1 in regelmäßigen Abständen über die Bewässerungsanlage befeuchten. Die Begrünung hat eine Größe von insgesamt 4,00 m² (4,00 m x 4,00 m) und wurde mit insgesamt 400 Pflanzen vor Ort bepflanzt. Die eingesetzten Stauden wurden wurzelnackt mit Edelstahl-Heftklammern im System fixiert, um den natürlichen Wurzelschluss zu simulieren. Die Bepflanzung für den Bereich 1 erfolgte, im Gegensatz zum Bereich 4, nach einem festen Pflanzplan. Die Arten wurden auf Grundlage von Erfahrungswerten der Vertiko GmbH ausgewählt. Entscheidender Faktor für die Pflanzenauswahl war eine besondere Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen sowie eingeschränkten Lichtbedingungen.

Bereich 2 ist ein Prototyp zur Begrünung mit Moosen des Unternehmens Vertiko GmbH. Die Bauweise wurde gemäß Vorversuchen und auf Basis der Begrünungsversuche am Neckartor in Stuttgart [Vogt/Thielen 2018, o.S.], in einer leichten Neigung ausgeführt, eine bessere Wasserverteilung auf den Moosoberflächen gewährleisten soll. Die vier geneigten Alucobond-Verbundplatten sind in ihrer Oberflächenbeschaffenheit horizontal geteilt. Der obere Bereich ist mit einer Titandioxidbeschichtung ausgestattet. Im unteren Bereich wurden Hypnum-Moosmatten flächig mit der Alucobond-Trägerplatte befestigt. Die Bewässerung erfolgt

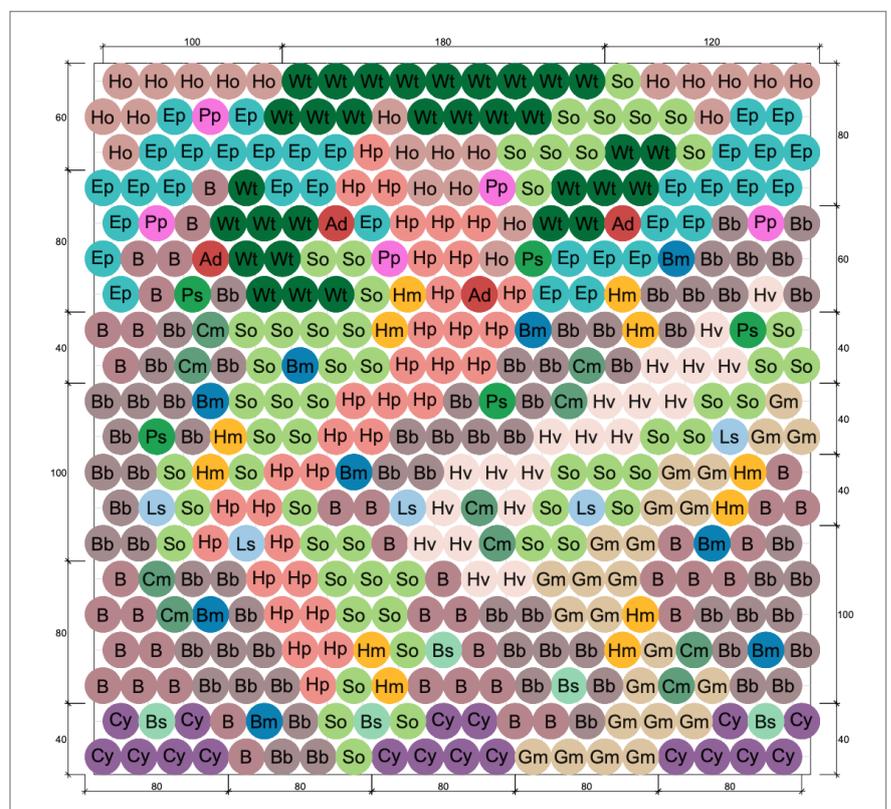
über Sprühdüsen mit einem Abstand von etwa 50 cm und einen zwischengeschalteten Druckminderer.

Bereich 3 wurde in der gleichen Bauweise wie Bereich 2 ausgebildet. Jedoch wurden hier keine Platten mit Titandioxidbeschichtung verbaut. Stattdessen wurde eine vollflächige Begrünung mit Hypnum-Moosmatten gewählt. Die Bewässerung erfolgt ebenfalls über Sprühdüsen wie im Bereich 2.

Bereich 4 wurde mit einem modularen wandgebundenen System der Firma Gelsenroth (heute Vertuss: System Vertiwall) gebaut. Das System besteht aus modularen Gabionen-Kassetten, die aus feuerverzinktem Stahl produziert werden. Die Kassetten sind mit einem Textil ausgelegt und mit Substrat verfüllt. Sie wurden mit einer Breite von 994 mm und eine Höhe von 490 mm eingebaut. Bedingt durch eine

Abbildung 47: Bepflanzungsplan Bereich 1 Begrünung Citytunnel Darmstadt (Vertiko GmbH 2020).

Ad	Aruncus dioicus	4 St.
B	Bergenia Hybr. 'Oeschberg'	39 St.
Bb	Bergenia Hybr. 'Baby Doll'	67 St.
Bm	Brunnera macrophylla	9 St.
Bs	Blechnum spicant	5 St.
Cy	Cymbalaria muralis	18 St.
Cm	Carex morrowii	10 St.
Ep	Epimedium x rubrum 'Galadriel'	33 St.
Gm	Geranium macrorrhizum 'Spessart'	24 St.
Ho	Heuchera Hybr. 'Obsidian'	22 St.
Hp	Heuchera Hybr. 'Paris'	34 St.
Hv	Heuchera villosa var. macrorrhiza	20 St.
Hm	Hemerocallis minor	12 St.
Ls	Luzula sylvatica 'Auslese'	5 St.
Ps	Phyllitis scolopendrium (syn. Asplenium s.)	5 St.
Pp	Polystichum setiferum 'Proliferum'	5 St.
So	Soleirolia soleirolii	56 St.
Wt	Waldsteinia geoides	32 St.



Bautiefe von 200 mm ist das System im Vergleich zur flächigen Bauweise mit Textil schwer. Insgesamt wurden in der Breite vier Kassetten und jeweils sechs Kassetten übereinander eingebaut. In die Bepflanzung im oberen Bereich mit Kletterpflanzen und Sträuchern wurde ein Edelstahl-Rankgitter mit einem Raster von 100 x 100 mm und einer Gesamthöhe von 1,00 m eingebaut. Der gesamte Bereich 4 wird mit horizontal verlegten Tropfschläuchen zwischen den Gabionen bewässert. Die Bepflanzung wurde nicht nach einem festen

Pflanzplan ausgeführt. Insgesamt wurden in jede Kasette bei der Vorkultivierung 22 Pflanzen eingesetzt. Damit haben die Gabionen eine Deckung von 44 Pflanzen je Quadratmeter und etwa 80 % mehr Pflanzen als bei der Vertiko-Bauweise. In der Gesamtfläche von *Bereich 4* wurden demnach etwa 700 Pflanzen verwendet, die sich wie in *Tabelle 4* dargestellt, in acht Arten aufschlüsseln lassen.

	Wissenschaftlicher Name:	Deutscher Name:	Stückzahl:
1.	<i>Ajuga reptans</i>	Kriechender Günsel	72
2.	<i>Carex morrowii</i> ssp. <i>foliosissima</i> 'Ice Dance'	Teppich-Japan-Segge 'Icedance'	48
3.	<i>Cotoneaster dammeri</i> 'Radicans'	Teppichmispel/Kriechmispel	100
4.	<i>Euonymus fortunei</i> 'Emerald Gaiety'	Kletter-Spindelstrauch 'Emerald Gaiety'	156
5.	<i>Euphorbia polychroma</i> 'purpurea'	Braunrote Wolfsmilch	144
6.	<i>Jasminum nudiflorum</i>	Echter Winter-Jasmin	12
7.	<i>Lonicera nitida</i>	Heckenmyrthe	72
8.	<i>Waldsteinia ternata</i>	Niedrige Golderdbeere	96

Tabelle 4: Auflistung der Pflanzarten (modulare Bauweise Citytunnel Darmstadt) nach wissenschaftlichem Namen, deutschem Namen und Stückzahl.

4.2.1.4 Feinstaubproblematik am Standort

Die Begrünung des Citytunnels Darmstadt ist ein Modellvorhaben, bei dem das Thema Fassadenbegrünung an einem Extremstandort wie dem Tunnel getestet werden soll. Die Begrünung ist Teil eines Maßnahmenpakets zur Luftschadstoffreduzierung in Darmstadt [Lingen/Schneider 2021, S. 4].

In Darmstadt gibt es vier offizielle Messstationen, die Daten zur Luftreinhaltung erheben:

- Rudolf-Müller-Anlage, 64287 Darmstadt (kontinuierliche Luftmessstation; 49,87230278 geogr. Breite; 8,66461944 geogr. Länge) Standortparameter: PM2,5, PM10,

Stickstoffdioxid (NO₂)

- Hügelstraße, 64283 Darmstadt (kontinuierliche Luftmessstation; 49,86945564 geogr. Breite; 8,6537515 geogr. Länge) Standortparameter: Kohlenmonoxid (CO), Ozon (O₃), PM2,5, PM10, Stickstoffdioxid (NO₂)
- Hügelstraße, 64283 Darmstadt (Passivsammler; 49,869426 geogr. Breite; 8,653275 geogr. Länge) Standortparameter: Stickstoffdioxid (NO₂)
- Heinrichstraße, 64283 Darmstadt (Passivsammler; 49,865418 geogr. Breite; 8,648409 geogr. Länge) Standortparameter: Stickstoffdioxid (NO₂) [HLNUG 2024, o.S.].

Der Standort Citytunnel Darmstadt ist aus mehreren Gründen prädestiniert für eine Begrünung mit wissenschaftlicher Begleitung. Die Begrünung eines Extremstandortes ermöglicht Rückschlüsse auf Bauweise sowie Pflanzenverwendung bei vertikaler Begrünung. Zudem kam es an der Messstation „Hügelstraße“ über mehrere Jahre zu Überschreitungen der Grenzwerte für Stickoxide und Feinstaub [Föll 2016, S. 1] Die Messstation „Hügelstraße“ liegt etwa 100 m hinter der Ausfahrt des Citytunnels. Durch die hohe Bebauungsstruktur und den starken Verkehr wird die Durchlüftung der Straße erschwert. Das hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) hat in den Jahren 2014 und 2015 daher eine detaillierte Betrachtung der Stickstoffdioxidbelastungen mit Passivsammlern vorgenommen. Dazu wurde eine Rastermessung mit mehreren Messpunkten vorgenommen.

Die Berechnung der Jahresmittelwerte hat durchschnittliche 60 bis 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ergeben. Demnach wurde der Jahresgrenzwert von 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bereits vor einigen Jahren um etwa 20 bis 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten.

Aufgrund der stetig hohen Belastungen wurden nach einer Klage durch die Deutsche Umwelthilfe Maßnahmen von der Stadt Darmstadt eingeleitet. Mit der Fortschreibung des Luftreinhalteplans zum 1. April 2019 wurden Minderungsmaßnahmen des Verkehrs im Bereich der Hügelstraße durchgesetzt. Daraufhin waren die Überschreitungen im Bereich des Cityrings und der Hügelstraße rückläufig [HLNUG (Hrsg.) 2019, S. 38]. Dennoch ist die Schadstoffkonzentration für Feinstaub und Stickoxide im Bereich des Cityrings der Hügelstraße nicht unbedenklich, weshalb unter anderem die Begrünung des Citytunnels angeregt wurde. Zusammenfassend eignet sich die Begrünung im Citytunnel aus den folgenden Gründen für eine Untersu-

chung im Rahmen dieser Forschungsarbeit:

- Hohes Verkehrsaufkommen von etwa 20.000 Autos/Tag
- Begrünung ist angrenzend zur Fahrbahn angeordnet
- hohe Grundbelastung mit Luftschadstoffen am Standort
- Tunnelsituation mit Einrichtungsverkehr sorgt für gleichmäßige Luftströmung
- Nähe zu öffentlicher Messstelle Hügelstraße für Vergleichsmessungen.

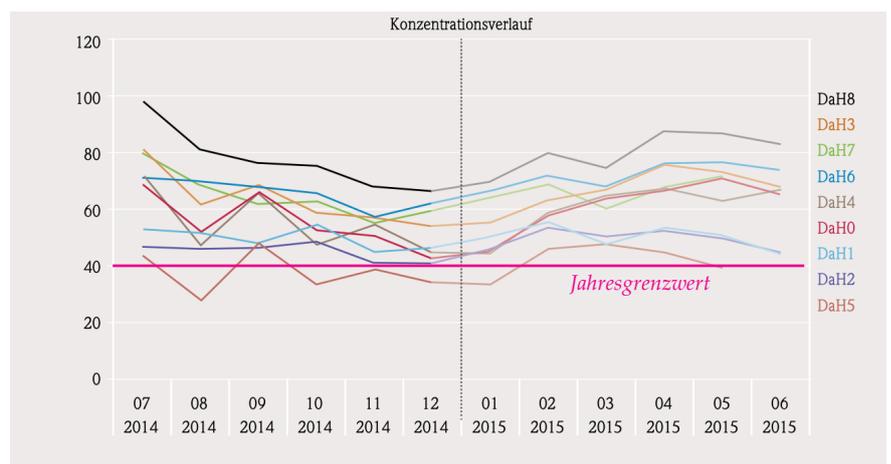


Abbildung 48: Konzentrationsverlauf der acht Messpunkte im Rahmen der Rastermessung am Tunnelportal Hügelstraße in Darmstadt. Zu erkennen sind die acht Messpunkte im Verlauf der Jahresmessung sowie der Jahresgrenzwert von 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Föll 2016; geändert).

4.2.1.5 Anordnung der Messgeräte



Abbildung 49: Verortung der Hawa Dawa Messgeräte im Citytunnel.

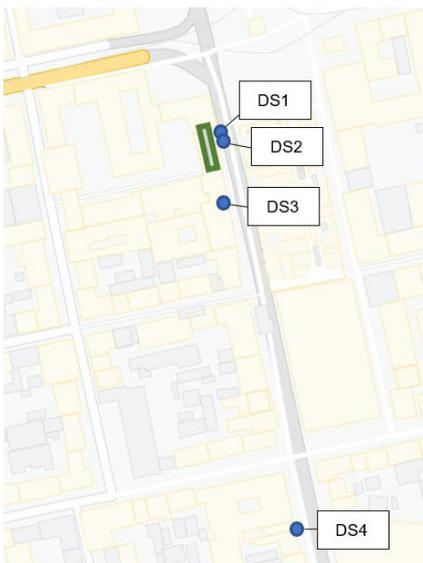


Abbildung 50: Verortung der Sigma-2 Passivsammler im Citytunnel.

Neben der öffentlichen Messstelle im Bereich der Hügelstraße wurden weitere Messgeräte im Bereich des Citytunnels installiert. Die Messungen beruhen auf dem Prinzip von Vergleichsmessungen zwischen den begrünten und nicht begrünten Flächen im Citytunnel. Um die Ergebnisse im Anschluss vergleichen zu können, sollten die Messgeräte in gleicher Höhe montiert werden. Die Standorte der Messgeräte wurden schließlich mangels Montagemöglichkeiten an der Infrastruktur des Citytunnels und behördlicher Genehmigungen eingeschränkt. Die in Tabelle 5 aufgeführten Messgeräte wurden im Citytunnel installiert.

Für die Montage der Sigma-2-Passivsammler wurde eine Halterung zur Montage benötigt. Da keine zusätzlichen Montagepunkte an der Tunnelwand gesetzt werden konnten, wurden die Passivsammler im Bereich der Verkehrsschilder montiert. Montage und Demontage konnten eigenständig durchgeführt werden.

Insgesamt wurden zwei Sigma-2-Passivsammler im Bereich der Begrünung übereinander auf unterschiedlichen Höhen installiert. Zwei weitere Sammler wurden im weiteren Verlauf des Tunnels angebracht (Abbildung 50). Zur Benennung der Passivsammler und zur Beschriftung der späteren Proben wurden die Sammler mit Akronymen bezeichnet: (D)Darmstadt (S)Sammler,

mit der Nummerierung 1 bis 4 für die vier Passivsammler im Citytunnel. DS1, DS3 und DS4 wurden auf einer Höhe von 3,0 m installiert. Um eine Referenzmessung vor der Begrünung durchzuführen, wurde DS2 auf einer Höhe von 1,50 m installiert. Damit befinden sich die Sammler in der nach VDI 2119:2013 vorgesehenen Montagehöhe. Die Montage der Sammler wurde am 1. April 2021 durchgeführt.

Für die aktiven Messgeräte von *Hawa Dawa* war neben der Halterung auch eine Stromversorgung notwendig. Da keine zusätzlichen Stromleitungen im Tunnel verlegt werden konnten, wurden die Messgeräte die vorhandenen Stromleitungen der Verkehrsschilder angeschlossen. Zur Montage der Messgeräte wurde der Citytunnel kurzfristig gesperrt. Die Montage und Demontage der Messgeräte wurde fachgerecht vom Unternehmen *E-Netz Südhessen AG* (Netzbetreiber Südhessen) durchgeführt. Die Bezeichnung der Messgeräte erfolgte ebenfalls anhand von Akronymen: (H)Hawa (D)Dawa (D)Darmstadt + dreistellige Nummer nach Herstellerangaben.

Das erste Messgerät (HDD 174) wurde im Tunnelportal (Einfahrtsbereich B2, „Vorfahrt-achten“ – Schild) installiert. Ein weiteres Gerät (HDD 172) wurde im mittleren Bereich des Citytunnels, ebenfalls an einem Verkehrsschild

	Messgerät/Einsatzmittel:	Zweck:	Anzahl:	Montagedatum:
1.	Sigma-2 Sammler	Passiven Probennahme mit unterschiedlichen Akzeptor Oberflächen	4	01.04.2021
2.	Hawa Dawa Sentience Messgerät	Messung von Echtzeit Umweltdaten	3	21.03.2021
3.	Zeitrafferkamera	Überwachung des Wachstums von Stauden	1	28.04.2021
4.	Schraubenkonstruktion	Wachstumsmessung bei Moosen nach der <i>Cranked-Wires-Methode</i>	6	01.04.2021

Tabelle 5: Übersicht der eingesetzten Messgeräte und Einsatzmittel im Citytunnel.

(„Vorfahrt achten“) montiert. Ein drittes Messgerät (HDD169) wurde direkt an der Begrünung zwischen Bereich 1 und Bereich 2 installiert. Das ursprüngliche Messkonzept sah für HDD174 eine andere Position, ca. 30 m weiter, im Bereich der Tunneleinfahrt vor. Zudem sollten HDD174 und HDD172 etwa 1,50 m unter der jetzigen Position montiert werden. Aufgrund der Verortung der Kabelanschlüsse und Montagemöglichkeiten war diese Anordnung nicht möglich. Die Montage der Echtzeitmessgeräte erfolgte am 21. März 2021.



Abbildung 51: Passivsammler DS1 (oben) und DS2 (unten).

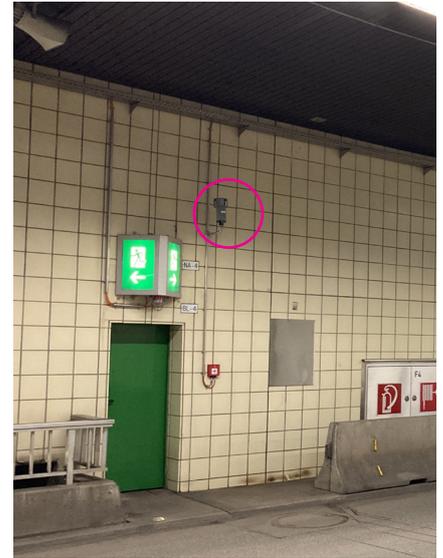


Abbildung 52: Passivsammler DS3.

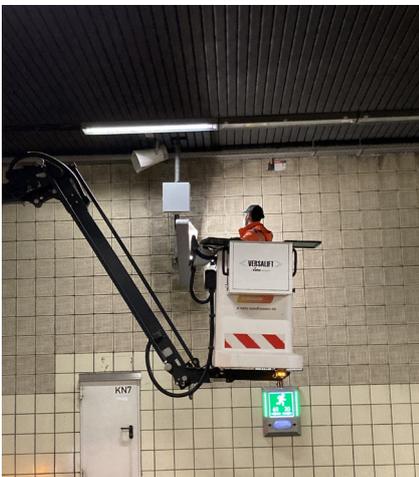


Abbildung 53: Montage des Messgerätes HDD174 im mittleren Bereich des Citytunnels.



Abbildung 54: Montiertes Messgerät HDD169 vor der Begrünung zwischen Bereich 1 und Bereich 2.



Abbildung 55: Montage des Messgerätes HDD172 im Eingangsportal „Rheinstraße“ des Citytunnels.



Abbildung 56: Ursprünglicher Standort für die Zeitrafferkamera (pink gekennzeichnet).

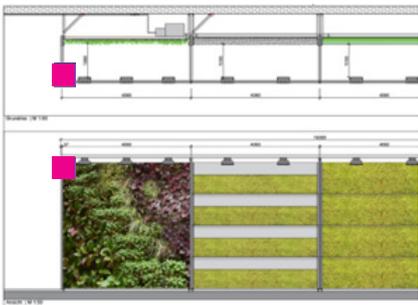


Abbildung 57: Standort für die Zeitrafferkamera (pink gekennzeichnet).

Die Zeitrafferkamera sollte gegenüber der Begrünung im Bereich der Fahrbahn zur Aufnahme der gesamten Begrünung montiert werden (Abbildung 56). Der Standort wurde zwar datenschutzrechtlich genehmigt, konnte aber aufgrund fehlender Montagemöglichkeiten nicht ausgeführt werden. Die Montage im Bereich der Deckenhalterung für die Leitungsführung hätte zu einer weiteren Tunnelsperrung geführt und konnte deshalb nicht realisiert werden. Um die Kamerafunktion im laufenden Probenzeitraum überprüfen zu können, wurde ein anderer Standort im Bereich der Kragarme der Begrünung gewählt. Dadurch konnte das Vertiko-System im Bereich 1 in einer Nahaufnahme im jahreszeitlichen Verlauf aufgenommen werden. Montage und Demontage konnten eigenständig durchgeführt werden. Aufgrund pandemiebedingter Lieferschwierigkeiten wurde die Zeitrafferkamera erst

am 28. April 2021, etwa vier Wochen nach offiziellem Messbeginn, in Betrieb genommen.

Die Schraubenkonstruktion zur Wachstumsmessung wurde an insgesamt sechs Stellen in den Bereichen 2 und 3 der Begrünung montiert. Die Standorte für die Wachstumsmessung wurden auf den Moosflächen frei gewählt. Es sollten zu Forschungszwecken unterschiedliche Licht- und Wasserkonditionen bei den Wachstumsmessungen abgebildet werden. Daher wurden die Messpunkte auf verschiedenen Moosmatten und in unterschiedlichen Abständen zum Licht und zur Bewässerung montiert. Auch für die Wachstumsmessungen wurden Akronyme verwendet: (C)Cranked - (W)Wires (M)Methode + Nummerierung der einzelnen Messpunkte (Abbildung 57).



Abbildung 58: Anordnung der Messpunkte zur Wachstumsmessung von Moosen nach der Cranked-Wires-Methode.

4.2.2 Wandgebundene Begrünung Wohnbebauung Gladbecker Straße in Essen

An der Gladbecker Straße in Essen zwischen dem Berthold-Beitz-Boulevard und der Hövelstraße befinden sich Gebäude der *Allbau GmbH*. Aufgrund verschiedener öffentlicher Förderprogramme entschied die Allbau GmbH, mehrere Gebäude mit wandgebundenen Begrünungen auszustatten. Begonnen wurde im Frühjahr 2020 mit dem Reihenhause Gladbecker Straße 250 – 256. Ursprünglich war eine voll-

flächige Begrünung der Fassade mit einem modularen wandgebundenen Begrünungssystem geplant. Aufgrund der zahlreichen Fensterbereiche und der Auswahl des Begrünungssystems wurde abweichend von den ersten Planungen eine Begrünung in vertikal angeordneten Streifen realisiert.

4.2.2.1 Räumliche Einordnung

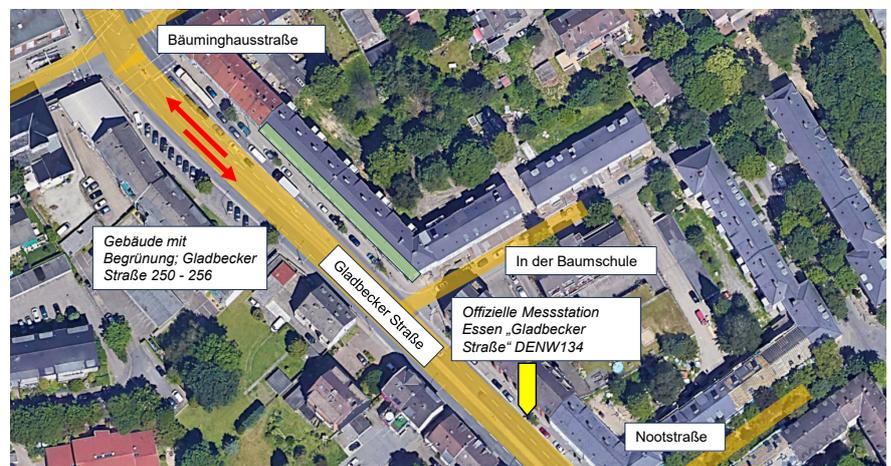
Die Gladbecker Straße in Essen befindet sich im Stadtteil Altenessen-Süd. Sie ist Teil der Bundesstraße B224 und wichtiges Verbindungsstück zwischen der A40 südlich der Innenstadt und der A42, nördlich der Gladbecker Straße. Sie ist eine der Hauptverkehrsachsen in Essen. In einer Verkehrszählung aus dem Jahr 2017 wurde an der Ecke Gladbecker Straße – Hövelstraße ein Verkehrsaufkommen von 45.200 KFZ/24h gezählt [BASt (Hrsg.) 2017, o.S.].

Wegen der angrenzenden Bebauungsstruktur, die vorwiegend aus Mehrfamilienhäusern mit drei bis fünf Geschossen besteht, erhält die Gladbecker Straße in vielen Bereichen den Charakter einer Straßenschlucht. Der Straßenabschnitt zwischen den Querstraßen Berthold-Beitz-Boulevard und Hövelstraße, in dem sich auch die Testfläche befindet, ist seit Jahren wegen zu hoher Luftschadstoffkonzentrationen Teil der medialen Berichterstattung. Die EU-weit geltenden Grenzwerte für Stickoxid und Feinstaub wurden mehrfach überschritten. Auch wenn es in den letzten Jahren zu einem Rückgang durch die Fahrverbote und das geänderte Fahrverhalten während

der Coronapandemie kam, zählen die Konzentrationswerte an Feinstaub und Stickstoffdioxid im Bereich der Gladbecker Straße nach wie vor zu den höchsten in Nordrhein-Westfalen [BASt (Hrsg.) 2017, o.S.].

Das *Vertuss*-Begrünungssystem wurde von der Firma *Terra Verde* mit Nils van Steenis (ehem. Fa. *Gelsenroth*) installiert. Alle zehn Begrünungsbereiche wurden in der gleichen Bauweise und in gleicher Größe ausgeführt. Insgesamt hat die wandgebundene Bauweise eine Größe von 81,96 m². Zusätzlich wurden etwa 58,60 m² Rankgitter aus Edelstahl für angrenzende Bereiche installiert.

Abbildung 59: Übersicht Straßenabschnitt Gladbecker Straße (Google Earth).



4.2.2.2 Konstruktion und Technik



Abbildung 60: Montage einer vorkultivierten Gabione an der Fassade Gladbecker Straße.



Abbildung 61: Montage der Fassadenbegrünung Gladbecker Straße. Paralleles Arbeiten mit mehreren Hebe-Arbeitsbühnen.

Geplant hat die Begrünungen Nils van Steenis. Der Bau der Fassadenbegrünungen erfolgte nach der modularen, wandgebundenen Bauweise mit Gabionen-Kassetten als Trägersystem. Das Schema der Begrünung ist baugleich mit Bereich 4 im Citytunnel (Kapitel 4.2.1.2). Abweichend vom Citytunnel wurde die Begrünung in der Gladbecker Straße komplett wandhängend montiert. Dadurch müssen die entstehenden Lasten komplett in die Wand eingeleitet werden. Zur Montage der Metall-Gabionen werden U-Profile aus Stahl mit Schwerlastverankerungen an der Fassade befestigt, um anschließend die vorkultivierten Metall-Gabionen von oben in die gegenüberstehenden U-Profile einzuführen. Die Kassetten (Maße: 1230 mm x 490 mm x 200 mm (B x H x T)) sind mit einem Textil ausgelegt und mit Substrat verfüllt. Insgesamt wurden 14 Kassetten übereinander eingebaut. Seitlich und oberhalb wurden Edelstahlgitter mit jeweils sechs Einzelpunkthaltern montiert. Zwischen jeder Kassettenreihe liegt ein Tropfschlauch zur Bewässerung. Die Montage der wandgebundenen Begrünung wurde in mehreren Abschnitten zwischen September und Oktober 2020 ausgeführt. Die Planung und Ausführung der Bewässerungs-

anlage wurde vom Unternehmen *HB Wassertechnologie* (NL) ausgeführt. Die Bewässerungsanlage kann ebenfalls per Mobilfunkgerät oder Internet mit dem Programm *IMC Irrigation Moisture Control* fernüberwacht und gewartet werden. Die Technischeinheit wird mit einer Frischwasserleitung und einem Stromanschluss versorgt. Zusätzlich wurde ein Notüberlauf mit Ablaufstutzen eingebaut. Durch den nachträglichen Einbau einer Zisterne wurde das System im Sommer 2022 auf die Nutzung von Zisternenwasser umgerüstet.



Abbildung 62: Planung der Begrünung an der Gladbecker Straße 250-256 in Essen mit Nummerierung, geändert (Allbau GmbH).

4.2.2.3 Erläuterung der Bepflanzung

Die Bepflanzung wurde nicht nach einem festen Pflanzplan ausgeführt. Insgesamt wurden in jede Kassette bei der Vorkultivierung etwa 36 Pflanzen eingesetzt. Damit hat das System eine

Deckung von etwa 60 Pflanzen je m². In der Gesamtfläche wurden etwa 4920 Pflanzen verwendet, die sich wie in *Tabelle 6* dargestellt in 23 Arten aufschlüsseln lassen.

	Wissenschaftlicher Name:	Deutscher Name:	Stückzahl:
1.	<i>Ajuga reptans</i>	Kriechender Günsel	288
2.	<i>Anaphalis triplinervis</i>	Perlkörbchen	168
3.	<i>Calamintha nepeta subs' nepeta</i>	Bergminze	384
4.	<i>Carex morrowii ssp. foliosissima 'Ice Dance'</i>	Teppich-Japan-Segge 'Icedance'	240
5.	<i>Clematis Armandii</i>	Immergrüne Waldrebe	72
6.	<i>Cotoneaster dammeri 'Radicans'</i>	Teppichmispel/Kriechmispel	192
7.	<i>Eragrostis spectabilis</i>	Purpur-Liebesgras	168
8.	<i>Euonymus fortunei 'Emerald Gaiety'</i>	Kletter-Spindelstrauch 'Emerald Gaiety'	192
9.	<i>Euonymus fortunei 'Minimums'</i>	Kleinblättrige Teppichspindel 'Minimums'	288
10.	<i>Euphorbia characias subsp. wulfenii</i>	Palisaden-Wolfsmilch	336
11.	<i>Euphorbia polychroma 'purpurea'</i>	Braunrote Wolfsmilch	336
12.	<i>Festuca glauca</i>	Blauschwingel	120
13.	<i>Geranium x cantabrigiense 'Biokovo'</i>	Storchenschnabel 'Biokovo'	384
14.	<i>Hakonechloa macra 'Aureola'</i>	Gold-Japan-Berggras 'Aureola'	144
15.	<i>Hemerocalis citrina</i>	Zitronen-Taglilie	120
16.	<i>Jasminum nudiflorum</i>	Echter Winter-Jasmin	144
17.	<i>Kniphofia uvaria 'Orange Vanilla Popsicle'</i>	Fackellilie 'Orange Vanilla Popsicle'	120
18.	<i>Liriope muscari</i>	Lilientraube	120
19.	<i>Lonicera henryi</i>	Immergrünes Geißblatt	120
20.	<i>Lonicera nitida</i>	Heckenmyrthe	336
21.	<i>Photinia fraseri 'Little Red Robin'</i>	Glanzmispel 'Little Red Robin'	96
22.	<i>Prunus laurocerasus 'Mount Vernon'</i>	Bodendecker Kirschlorbeer 'Mount Vernon'	192
23.	<i>Waldsteinia ternata</i>	Niedrige Golderdbeere	360

Tabelle 6: Auflistung der Pflanzarten nach wissenschaftlichem Namen, deutschem Namen und geschätzter Stückzahl.

4.2.2.4 Feinstaubproblematik am Standort

Die Begrünung der Wohnbebauung an der Gladbecker Straße wurde nicht explizit zur Reduzierung der Luftschadstoffe gefördert. Vielmehr sollte der Standort in Gänze von der Begrünung profitieren. Das Projekt wurde zu einem Großteil aus dem NRW-Landesprojekt „Klimaresiliente Region mit internationaler Strahlkraft“ gefördert. Die Fassadenbegrünung befindet sich etwa 60 m von der offiziellen Messstation DENW134, Gladbecker Straße Essen, entfernt. Insgesamt werden in Essen 14 offizielle Messstationen zur Überwachung der Luftqualität verwendet. Die meisten befinden sich entlang der Autobahn A40. Für diese Forschungsarbeit ist ausschließlich die offizielle Messstation an der Gladbecker Straße relevant. Eine weitere Messstelle DENW427 im Bereich der Altenessener Straße 255 wird nur mit einem NO₂-Passivsammler und mit diskontinuierlichen Messungen betrieben [HLNUG (Hrsg.) 2024, o.S.]. Die Messstelle befindet sich in etwa einem Kilometer Entfernung zur Fassadenbegrünung an der Gladbecker Straße. Aufgrund der eingeschränkten Datengrundlage und der räumlichen Entfernung zur Testfläche wurde daher nicht mit den Daten der Messstelle DENW427 gearbeitet. Die Messstelle DENW134 hat die folgenden Kenndaten:

- DENW 134, Essen, Verkehr, städtisches Gebiet, Gladbecker Straße

244, 45326 Essen-Altenessen, (51,477899 geogr. Breite; 7,005276 geogr. Länge), kontinuierliche Luftmessstation

Standortparameter: Benzol, Feinstaub PM10, Stickstoffoxid (NO_x), Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂)

Seit einigen Jahren ist die Gladbecker Straße aufgrund ihres hohen Verkehrsaufkommens und der häufig überschrittenen Grenzwerte an Luftschadstoffen in den Medien präsent [Ratmann 2023, o.S.]. Die gemessenen Konzentrationen an Feinstaub haben 2023 bis Mitte Mai bereits zehn mal den Tagesgrenzwert von 50 µg/m³ überschritten [LANUV (Hrsg.) 2024, o.S.]. Damit fällt die Station unter die Messstationen mit den höchsten Grenzwertüberschreitungen in NRW. Zusammenfassend eignet sich die Begrünung aus folgenden Gründen für eine Untersuchung im Rahmen dieser Forschungsarbeit:

- hohes Verkehrsaufkommen von über 40.000 Autos/Tag,
- vierspurige Bundesstraße in unmittelbarer Nähe zu Gehweg und der angrenzender Begrünung,
- hohe Grundbelastung mit Luftschadstoffen am Standort,
- Nähe zu öffentlicher Messstelle DENW134 für Vergleichsmessungen.

	Messgerät/Einsatzmittel:	Zweck:	Anzahl:	Montagedatum:
1.	Sigma-2 Sammler	Passiven Probennahme mit unterschiedlichen Akzeptor Oberflächen	2	31.05.2021
2.	Hawa Dawa Sentience Messgerät	Messung von Echtzeit Umweltdaten	2	26.04.2021
3.	Hobo Datenlogger MX2301A	Überwachung von Temperatur- und Luftfeuchtigkeit	2	29.06.2021

Tabelle 7: Übersicht der eingesetzten Messgeräte und Einsatzmittel an der Gladbecker Straße 250-256 in Essen.

4.2.2.5 Anordnung der Messgeräte

Neben der öffentlichen Messstelle im angrenzenden Bereich der Gladbecker Straße 244 wurden weitere Messgeräte im Bereich der Begrünung installiert. Die Messung beruht auf dem Prinzip von Vergleichsmessungen zwischen der Fassadenbegrünung und Bereichen, in denen keine Begrünung installiert wurde.

Um die Messwerte mit denen der öffentlichen Messstation vergleichen zu können, wurden die Geräte etwa 1,00 m oberhalb der Auffangrinne installiert. Damit liegt der Messeinlass der öffentlichen Messstation etwa 0,30 m unterhalb der Einlässe an der begrünten Fassade.

Für die Montage der Sigma-2-Passivsammler wurde eine Halterung aus Rohrleitungen zusammengesetzt. Die Montage und Demontage konnten eigenständig durchgeführt werden. Zur Benennung der Passivsammler und zur Beschriftung der späteren Proben wurden die Sammler mit Akronymen bezeichnet: (E)Essen (S)Sammler, in der Nummerierung 1 bis 2 für die beiden eingesetzten Passivsammler. Der Sammler mit der Kennzeichnung ES1 wurde direkt auf der Begrünung, ES2 an einem Fallrohr im unbegrünten

Bereich montiert (Abbildung 63).

Die Hobo-Datenlogger MX2301A wurden im Bereich der Passivsammler mit einem Abstand von etwa 40 cm montiert. Die Bezeichnung der Datenlogger erfolgte ebenfalls mit einem Akronym: (H)Hobo (L)Logger (E)Essen + grün (grüne Fassade) / grau (unbegrünte Fassade).

Die Standorte sind in Abbildung 65 gekennzeichnet.



Abbildung 63 (links): Sigma-2 Passivsammler ES1 vor der Putzfassade.

Abbildung 64 (rechts): Sigma-2 Passivsammler ES2 vor der Begrünung.



Abbildung 65: Verortung der Sigma-2 Passivsammler und Hobo-Datenlogger an der Fassade Gladbecker Straße 250-256, Essen.



Da der Bereich im Erdgeschoss des Gebäudes nicht begrünt wurde, konnte auf Vergleichsmessungen in unterschiedlichen Höhen verzichtet werden. Mit der Montagehöhe von etwa 3,20 m über Bodenhöhe befinden sich die Sammler in der nach VDI 2119:2013 vorgesehenen Montagehöhe. Die Montage der Sammler wurde am 31. Mai 2021 ausgeführt.

Die Montage der Messgeräte erfolgt mit einem Akronym: (H)Hawa (D)Dawa (E)Essen + dreistellige Nummer nach Herstellerangaben.

Das Messgerät HDE 173 wurde im Bereich der Begrünung B5, ebenfalls etwa 1,0 m oberhalb der Rinne montiert. Das Gerät HDE 176 wurde an einem Fallrohr zwischen B6 und B7 installiert (Abbildung 66 und 67).

Für die aktiven Messgeräte von *Hawa Dawa* war neben der Halterung eine Stromversorgung notwendig. Die Stromleitungen wurden nachträglich vom Bereich der Technischeinheit im Dachgeschoss hin zu den Montageorten entlang der Bewässerungsleitungen gelegt. Montage und Demontage der Messgeräte erfolgten daher zeitlich versetzt zur Tunnelbegrünung am 26. April 2021 und konnte neigenständig durchgeführt werden. Die Bezeich-



Abbildung 66 (oben): Montiertes Messgerät HDE 173 vor der Begrünung B5.

Abbildung 67 (unten): Montiertes Messgerät HDE 176 vor der Begrünung zwischen B6 und B7.

4.2.3 Versuchsaufbau Laborversuch Bestäubung

Zur Untersuchung und Gegenüberstellung wandgebundener Begrünungsbauweisen wurden zusätzlich zu den Praxisversuchen Labormessungen unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Dazu wurde ein Verfahren mit einer Messkammer des IASP

angewendet. Die Versuchseinrichtung wurde gemäß der Einrichtung in Berlin am Bodenlabor der TH OWL eingerichtet. Mit der Messkammer wurden in Berlin Versuche zum Filterpotenzial verschiedener Dachbegrünungsmatten durchgeführt [Sempel et al. 2013, S.1].

4.2.3.1 Konstruktion, Technik und Prüfgegenstände

Für den Versuch wurde eine 1 m³ große Plexiglaskammer verwendet, die für die Integration des Versuchsmaterials und der Messgeräte zu einer Seite geöffnet werden kann. Auf der gegenüberliegenden Seite kann durch eine weitere Öffnung der Teststaub eingeführt werden. Im oberen Bereich der Messkammer, an der Messzellendecke, befindet sich ein Ventilator, mit dem unterschiedliche Windgeschwindigkeiten in der Kammer erzeugt werden können (Abbildung 68).

it dem Ventilator wird die Luft nicht nach unten gedrückt, stattdessen wird wegen seiner geringen Größe und der Ausrichtung eine Luftzirkulation an den inneren Glasscheiben erzeugt. Mit Veränderung der Drehzahl des Ventilators werden im Versuch Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 2 m/s erzeugt. Die Einstellungen der Windgeschwindigkeiten wurden im Vorfeld mit einem Windmesser gemessen. Über einen Zeitraum von zehn Minuten traten Schwankungen von etwa 0,45 m/s auf. Als Teststaub wurde der

Prüfstaub Arizona A3 fine eingesetzt. Er findet Anwendung in verschiedenen Normprüfungen aus dem Bereich Filtration und Umweltsimulation. Der Staub besteht zu 69 bis 77 % aus Quarz und wird hauptsächlich zur Bewertung von Filtern bei Straßenfahrzeugen eingesetzt [DMT GmbH & Co. KG 2024, o.S.].

Für den Versuch wurden drei Vegetationssysteme ausgewählt. Neben einer wandgebundenen Begrünung mit Stauden in der flächigen Bauweise, wurde auch eine *Sedum*-Matte sowie eine Moosmatte für den Versuch ausgewählt. Die Vegetationselemente hatten eine Größe von jeweils 1m² und wurden an der innenliegenden Seitenwand der Messkammer fixiert. Ursprünglich sollte ein viertes Vegetationssystem untersucht werden. Aufgrund des hohen Gewichts der modularen gabionen gebundenen Fassadenbegrünung von etwa 200 kg/m² wurde dieses System nicht in der Messkammer untersucht.

Abbildung 68 (oben): 1 m³-Plexiglaskammer mit integriertem Ventilator.

Abbildung 69 (unten, links.): *Sedum*-Matte mit unterschiedlichen *Sedum*-Arten.

Abbildung 70 (unten, Mitte): Textilgebundene wandgebundene Fassadenbegrünung Vertiko GmbH; Bepflanzung mit unterschiedlichen Stauden (Aufnahme zum Zeitpunkt unmittelbar nach der Bepflanzung).

Abbildung 71 (unten, rechts): *Racomitrium*-dominierte Moosmatte.



4.2.3.2 Anordnung der Messgeräte



Abbildung 72: Messkammer mit aufgestelltem Messgerät und eingesetztem Vegetationselement.

Die Partikelkonzentration in der Messkammer wurde mit einem Aerosolmonitor 8534 *DustTrak DRX* der Marke TSI gemessen. Das Gerät ist ein mehrkanaliges Laser-Photometer, mit dem Aerosolmessungen in Echtzeit durchgeführt werden können. Mit dem Gerät können gleichzeitige Messungen größendifferenzierter Massenanteilkonzentrationen gemessen werden.

Zudem ist die Datenprotokollfunktion beliebig programmierbar. Mit dem Gerät können Aerosole im Konzentrationsbereich zwischen $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $150 \text{mg}/\text{m}^3$ erfasst werden [TSI 2023, o.S.]. Für den Versuch wurde insgesamt ein Gerät eingesetzt. Dieses wurde in der Messkammer gegenüber der Versuchswand erhöht auf etwa 25 cm aufgestellt.

4.3 Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Umgebungsluft dienten verschiedene Messgeräte. Neben Hobo-Datenloggern zur Ermittlung von Temperatur und relativer Feuchte, wurden auch *Hawa Dawa Senticence*-Messgeräte zur Messung von Echtzeit-Umweltdaten eingesetzt. Mit diesen Geräten können die Parameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Ozon, Stickstoffdioxid und Feinstaub in den Größenfraktionen PM10 und PM2.5 erfasst werden. Beide Geräte eignen sich, um quantitative Daten zu den jeweiligen Parametern aufzunehmen.

Neben den aktiven Verfahren fanden auch passive Probennahmesammler Verwendung. Diese sind mit unterschiedlichen Akzeptoroberflächen ausgestattet, was die Durchführung weiterer Analysen zur qualitativen Zusammensetzung von Stäuben (neben der Anzahl sedimentationsrate) ermöglicht.

Für die Vitalitätsbetrachtung wurden die wandgebundenen Begrünungen fotografiert, verglichen und darüber der Deckungsgrad in verschiedenen Zeitabständen ermittelt. Bei den Moosflächen kam ebenfalls die Cranked-Wires-Methode, zur Messung der Triebblängen zur Anwendung. Eine Zeitrafferkamera erfasste den Zuwachs über den gesamten Zeitraum mit Fotos in kurzen Intervallen.

Am Standort in Darmstadt wurden drei *Hawa Dawa*-Messgeräte, sowie vier Passivsammler, sechs Messstellen für die *Cranked-Wires*-Methode, zur Wachstumsmessung und eine Zeitrafferkamera für die Beobachtung der Vitalitätsentwicklung eingesetzt. Am Standort in Essen wurden zwei *Hawa Dawa*-Messgeräte, sowie zwei Passivsammler und zwei Hobo-Datenlogger verwendet.

Die Vitalitätsbetrachtung wurde aufgrund der Zugänglichkeit und Erreichbarkeit der Pflanzen nur in Darmstadt durchgeführt.

Das Kapitel verdeutlicht mithilfe des durchgeführten Messkammerversuchs die Wirksamkeit der Staubabscheidung von Moosen und anderen Bauweisen wandgebundener Begrünung.

Versuchsdurchführung

5. Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen in dieser Forschungsarbeit beruhen auf dem Prinzip von Vergleichsmessungen. In diesem Kapitel wird die Durchführung an den beiden Standorten in Essen und

Darmstadt dargestellt und die jeweiligen Probennahmeintervalle werden aufgeführt. Zudem werden die eingesetzten Analysemethoden präsentiert.

5.1 Untersuchung von Parametern in der Umgebungsluft

Zur Messung von Umgebungsparametern an den beiden Versuchsstandorten Citytunnel Darmstadt und Gladbecker Straße in Essen wurden *Hawa Dawa Sentience* Echtzeitmessgeräte (siehe Kapitel 4.2.1.5) verwendet. Die Untersuchung beruht auf Vergleichsmessungen zwischen begrünten und unbegrünten Bereichen an den jeweiligen Standorten. Mit den Geräten werden die folgenden Parameter in Intervallen von 60 Minuten erfasst:

- Temperatur in °C
- Luftfeuchtigkeit in %
- Luftdruck in hPa
- Ozon (O₃) in µg/m³

- Stickstoffdioxid (NO₂) in µg/m³
- Feinstaub (PM₁₀) in µg/m³
- Feinstaub (PM_{2,5}) in µg/m³.

Zur weiteren Analyse wurden die Werte Luftdruck und Ozon nicht mehr betrachtet. Der Fokus lag auf der Betrachtung der quantitativen Feinstaubkonzentrationen von PM₁₀ und PM_{2,5}. Zusätzlich wurde die Konzentration von Stickstoffdioxid untersucht. Da die meteorologischen Parameter ebenfalls Einfluss auf die lokale Schadstoffkonzentration haben, wurden auch die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit bei der Analyse ausgewertet. Die Ge-

Monat	03/21	04/21	05/21	06/21	07/21	08/21	09/21	10/21	11/21	12/21	01/22	02/22	03/22
HDD 172 „Eingangportal“	Start: 23.03.21							20.10.21 – 28.01.22 keine Daten aufgrund von technischer Störung					Ende: 25.03.22
HDD 169 „Begrünung“	Start: 23.03.21												Ende: 25.03.22
HDD 174 „Mitte Citytunnel“	Start: 23.03.21												Ende: 25.03.22
HDE 173 „Begrünung“			Start: 26.05.21										Ende: 25.03.22
HDE 176 „Wand“			Start: 26.05.21										Ende: 25.03.22
HLE „grau“			Start: 26.05.21										Ende: 25.03.22
HLE „grün“			Start: 26.05.21										Ende: 25.03.22

Tabelle 8: Untersuchungszeitraum der eingesetzten *Hawa Dawa Sentience* Messgeräte und *Hobo* Datenlogger an den Standorten Citytunnel Darmstadt und Gladbecker Straße Essen zur Messung von Parametern in der Umgebungsluft.

räte haben im Zeitraum in einem Intervall von 60 Minuten (24 Daten/Gerät/Tag) Daten erfasst. Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte sowohl auf täglicher als auch auf stündlicher Basis. Die Daten wurden an eine IoT-Plattform übertragen.

Durch einen technischen Defekt von HDD 172 „Eingangportal“ konnten im Zeitraum vom 20. Oktober 2021 bis zum 28. Januar 2022 keine Daten erhoben werden. Dieser lange Zeitraum wurde durch die komplexen technischen Maßnahmen zur Deinstallation und Installation der Messgeräte im Tunnel verursacht.

An der Gladbecker Straße in Essen wurden neben den zwei *Hawa Dawa Sentience* Messgeräten (siehe Kapitel 4.2.2.5) zwei *Hobo*-Datenlogger Typ MX2301A eingesetzt. Diese arbeiten mit kürzeren Intervallen und wurden auf ein Messintervall von fünf Minuten eingestellt. Aufgrund notwendiger technischer elektrischer Einrichtungen an der Fassade, konnte die Messung der Echtzeit-Umweltdaten in Essen erst später vorgenommen werden.

5.2 Untersuchung der Staubkonzentrationen auf Oberflächen

Zur quantitativen und qualitativen Untersuchung von Stäuben auf Oberflächen wurden zur Probennahme Sigma-2 Passivsammler gemäß VDI-Richtlinie 2119 verwendet. Um eine geeignete Belegung der unterschiedlichen Proben zu gewährleisten, wurden im Vorfeld Probeversuche zur Festlegung der Probenintervalle durchgeführt. Die Proben wurden anschließend gemeinsam mit der *Particle Vision GmbH* abgestimmt. Im Citytunnel in Darmstadt wurden insgesamt vier Passivsammler eingesetzt, an der Gladbecker Straße in Essen wurden zwei Passivsammler für die Probennahme installiert.

Die Probennahme in Darmstadt erfolgte zwischen dem 1. April 2021 und dem 26. März 2022. In diesem

Zeitraum wurden insgesamt 14 Probenintervalle durchgeführt. In Essen wurden die Proben im Zeitraum vom 31. Mai 2021 bis zum 29. März 2022 genommen. Die exakten Intervalle der einzelnen Probennahmen mit den jeweiligen Zeiten finden sich in *Anlage 4 bis 5*. Der Wechsel der Proben wurde an beiden Standorten immer nach dem gleichen Schema durchgeführt. Dadurch sind die Untersuchungszeiträume der Proben vergleichbar. Für die quantitative und qualitative Untersuchung wurden zwei Verfahren mit unterschiedlichen Akzeptoroberflächen gewählt. Die optische Analyse wurde aufgrund ihrer einfachen Handhabung, geringen Fehlerwahrscheinlichkeit und Reproduzierbarkeit angewendet.

5.2.1 Quantitative Untersuchung auf Glasoberflächen

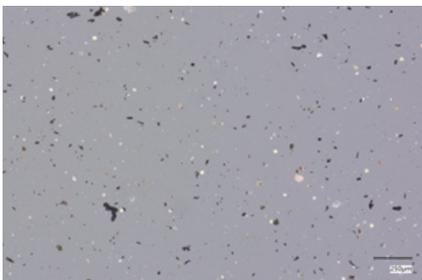
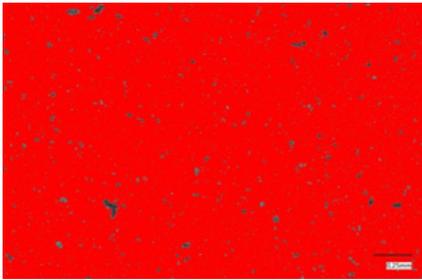


Abbildung 73: Beispielhafte automatische Bild-erstellung mit Keyence VHX-7000. Durch die Veränderung der Kontrastwerte (oben) können Partikel exakt klassifiziert werden.

Für diese Untersuchung wurde gemäß VDI 2119 die optische Analyse mit einem vollautomatischen Lichtmikroskop (Keyence VHX 7000 im Biologiela-
bor TH OWL Höxter) gewählt. Als Ak-
zeptorflächen wurden Glasobjektträger
verwendet und in den Sigma-2-Gehä-
usen über einen Zeitraum von etwa vier
Wochen exponiert. Die Proben wurden
nach der Probenentnahme in einem
Probenbehälter luftdicht verschlossen
und vor äußeren Einflüssen geschützt.
Anschließend wurden alle Proben mit
dem Lichtmikroskop untersucht. Von
jeder Probe wurde mit einer 250-fachen
Vergrößerung eine Aufnahme von
einer beliebigen Stelle des exponierten
Glasobjektträgers aufgenommen. Dazu
wurden Einzelaufnahmen in einer
Panoramaaufnahme zusammengesetzt,
sodass ein lückenloses Gesamtbild mit
einer Fläche von 6,563 mm² untersucht

werden konnte. Innerhalb dieses fest-
gelegten Bereiches wurde anschließend
eine automatische Flächenmessung
der Proben durchgeführt. Die erfass-
ten Partikel wurden dabei nach Größe
sortiert. Im Zusammenhang mit den
Zeitintervallen der exponierten Proben
können Aussagen über die sedimen-
tierte Partikelanzahl pro Fläche und
Zeit, die Anzahl sedimentationsrate,
getroffen werden. Eine Umrechnung
in die Massensedimentationsrate oder
die Massenkonzentration ist aufgrund
verschiedener Unsicherheiten in der
Methodik nur unzureichend darstell-
bar. Die Qualitätssicherung ist durch
die Anwendung der DIN 2119 sicher-
gestellt. Für das verwendete optische
Verfahren wird eine relative Messun-
sicherheit von 19,3 % angegeben [VDI
2119 2013, S.41].

5.2.2 Qualitative Untersuchung auf Kohlenstoffoberflächen (C-Pad)



Abbildung 74: Haftoberfläche mit verschiedenen Substraten (Bor: unten rechts, C-Pad: oben rechts und Glasoberfläche: links) (Particle Vision GmbH 2020).

Für die morpho-chemische Unter-
suchung und Charakterisierung der
sedimentierten Partikel (1-80 µg) und
die Massenkonzentrationsberechnung
wurden anstatt der reinen Glasobjekt-
träger Haftoberflächen mit verschie-
denen Substraten in die Passivsammler
eingesetzt. Die Haftoberflächen
wurden durch Particle Vision bereitge-
stellt. Die Untersuchung der Proben
wurden gemeinsam im Partikellabor in
Fribourg (CH) durchgeführt.
Das von Particle Vision entwickelte Ver-

fahren zur morpho-chemischen Ana-
lyse von Einzelpartikeln arbeitet mit
Bor-Substraten. Der Vorteil gegenüber
herkömmlichen Probenahmeober-
flächen wie Kohlenstoffpads besteht
darin, dass auch Stoffe mit Kohlenstoff-
elementen bestimmt werden können.
Zudem besteht bei kohlenstoffhaltigen
Substraten der Nachteil, dass kleine
Partikel mit einem geringeren Durch-
messer als 2µg nicht bestimmt werden
können. Die Bor-Substrate bestehen zu
99,7 % aus Bor und können nach der

Intervall	Standort	Name	Probennahme Anfang		Probennahme Ende		Probenahmedauer [Tage]	Probenahme dauer [min]	Probenahme dauer [sek]
			Datum	Uhrzeit	Datum	Uhrzeit			
Periode 2	Essen	ES102	29.06.21	10:32 Uhr	25.07.21	15:25 Uhr	26 Tage, 4 Stunden, 53 Minuten	37.733	2.263.980
Periode 2	Essen	ES202	29.06.21	10:37 Uhr	25.07.21	15:15 Uhr	26 Tage, 4 Stunden, 38 Minuten	37.713	2.263.080
Periode 5	Darmstadt	DS105	30.06.21	08:17 Uhr	26.07.21	15:12 Uhr	26 Tage, 6 Stunden, 55 Minuten	37.855	2.271.300
Periode 5	Darmstadt	DS205	30.06.21	08:15 Uhr	26.07.21	15:11 Uhr	26 Tage, 6 Stunden, 56 Minuten	37.856	2.271.360
Periode 5	Darmstadt	DS305	30.06.21	08:21 Uhr	26.07.21	15:18 Uhr	26 Tage, 6 Stunden, 57 Minuten	37.857	2.271.420
Periode 5	Darmstadt	DS405	30.06.21	08:29 Uhr	26.07.21	15:24 Uhr	26 Tage, 6 Stunden, 55 Minuten	37.855	2.271.300

Tabelle 9: Angaben zu den Probennahmeperioden für die Haftoberflächen mit verschiedenen Substraten in den Sigma-2-Passivsammlern. Alle Proben wurden analysiert und ausgewertet.

Benutzung gereinigt und wiederverwendet werden [Particle Vision GmbH 2024, o.S.].

Nachdem die Proben im jeweiligen Probenintervall exponiert wurden (Tabelle 9), wurden sie mittels automatisierter Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM/EDX) untersucht. Dabei können Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung und morphologischen Eigenschaften gezogen werden [Particle Vision GmbH 2020, S. 36]. Die Borsubstrate wurden zur Analyse in den euzentrischen Tisch des Zeiss Gemini SEM 300 eingespannt (Abbildung 75).

Die Auswertung der ermittelten Daten wurde mit einem von Particle Vision entwickelten Verfahren, basierend auf einem KI-gestützten Partikelklassifikator, durchgeführt. Mithilfe der

chemischen und morphologischen Informationen können Rückschlüsse auf die Herkunft der Partikel abgeleitet werden [Particle Vision GmbH 2020, S. 36].

Neben den Untersuchungen der verschiedenen Substrate wurden weitere Tests im Labor durchgeführt. Unter anderem wurde ein Abwaschverfahren an der Oberseite eines Blattes von *Bergenia Hybr. 'Baby Doll'* durchgeführt. Das Blatt wurde vor und nach dem Abwaschverfahren unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Zur Untersuchung wurden die Proben mit einem AGAR Auto Carbon Coater vorbereitet. Dadurch wurden die Proben mit einer dünnen, gleichmäßigen Schicht Kohlenstoff an der Oberfläche überzogen. Zudem wurde eine Wasserprobe mit einem Whatman Filter mit einer Größenklassifikation von $0,2 \mu\text{m}$ gefiltert.



Abbildung 75: Euzentrischer Tisch des Zeiss Gemini SEM 300.



Abbildung 76: Filtration der Flüssigkeit aus dem Ultraschallreinigungsbecken.



Abbildung 77: Negativer Ausschnitt der Untersuchungsfläche auf der Oberseite von *Bergenia Hybr. 'Baby Doll'*.

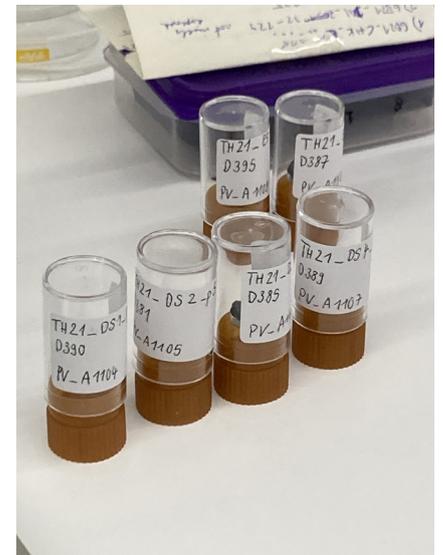


Abbildung 78: Vorbereitung der Bor-Substrate zur Untersuchung im Zeiss Gemini SEM 300.

5.3 Untersuchung der Vitalität der ausgewählten Vegetationssysteme

Eine Vitalitätsbetrachtung wurde aus Gründen der Praktikabilität ausschließlich im Citytunnel Darmstadt durchgeführt. Hier konnten die unterschiedlichen Vegetationssysteme vollumfänglich ohne zusätzlichen technischen Aufwand betrachtet werden. Zudem konnte das Monitoring der

Flächen unabhängig von Genehmigungen und externen Geräten wie Arbeitsbühnen oder Ähnlichem sichergestellt werden. Als Basis der Untersuchungen wurden die Termine der Probennahme der Sigma-2-Sammler gewählt. Die Pflegegänge wurden gemeinsam mit der Vertiko GmbH durchgeführt.

5.3.1 Vitalitätsuntersuchung Stauden

Zur Vitalitätsbestimmung der beiden Vegetationssysteme mit Stauden wurden die Flächen in regelmäßigen zeitlichen Abständen fotografisch dokumentiert. Anschließend wurden über ein CAD-Programm die Flächen ausgewählt, die nicht vital und begrünt sind. Über diese Methode kann der Flächendeckungsgrad der Fassadenbegrünung bestimmt werden. Da die Auswertung mit dem CAD-Programm Ungenauigkeiten und Überdeckungen einzelner Arten nicht ausschließt, sind die prozentualen Auswertungen lediglich als Annäherungswerte zu verstehen. Insgesamt wurden sechs Aufnah-

men der Vegetationsflächen innerhalb von 12 Monaten ausgewertet. Zusätzlich wurde eine Zeitrafferkamera an der Stahlkonstruktion in Höhe der Beleuchtung installiert. Aus den stündlichen Einzelaufnahmen in der Zeit zwischen dem 28. April 2021 und dem 28. Februar 2022 ist eine Gesamtaufnahme entstanden. Bei den Pflegegängen wurden Zählungen der vitalen Pflanzen durchgeführt und der Austausch der Pflanzen wurde gemeinsam umgesetzt. Zudem wurde Schädlingsbefall dokumentiert und aufgezeichnet.

5.3.2 Vitalitätsuntersuchung Moosmatten

Bei den Moosflächen wurde die Vitalität ebenfalls fotografisch dokumentiert und anschließend mit einem CAD-Programm ausgewertet. Zusätzlich wurden Wachstumsmessungen nach der *Cranked-Wires*-Methode durchgeführt. Hierzu wurden insgesamt sechs Messstellen in sechs Intervallen gemessen und der Zuwachs ausgewertet.

5.4 Versuchsdurchführung Laborversuch Bestäubung

Der Versuch in der Messkammer wurde mit vier verschiedenen Aufbauten jeweils dreifach durchgeführt:

- Erster Versuch: „Ohne Begrünung“
- Zweiter Versuch: „Moosmatte *Hypnum*“
- Dritter Versuch: „Flächige Begrünung Stauden“
- Vierter Versuch: „*Sedum*-Matte“

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden die Begrünungen etwa 24 Stunden vor dem Versuch gewässert, sodass die Testflächen anschließend oberflächlich trocknen konnten. Die 1 m² großen Prüfgegenstände wurden in der Messkammer platziert und der Partikelzähler wurde aufgestellt. Anschließend wurde die Kammer fest verschlossen. Der Ventilator der in der Kammer eine gleichmäßige Luftumwälzung erzeugt

hatte, wurde nach zwei Minuten ausgeschaltet. Über ein Applikationsrohr wurden anschließend 0,5 g Prüfstaub mit einem Staubdispersierger in die Messkammer geleitet. Der Prüfstaub wurde vor jedem Versuch 20 Minuten im Muffelofen getrocknet. Nach fünf Minuten wurde der Ventilator ausgeschaltet. Die gesamte Versuchsdauer betrug 90 Minuten. Nach 30 Minuten wurde erneut 0,5 g Prüfstaub in die Messkammer geleitet. Der Ventilator wurde dazu erneut zehn Sekunden vor dem Einleiten für insgesamt fünf Minuten eingeschaltet. Der Versuch „ohne Begrünung“ wurde im Vorfeld vier mal durchgeführt. Dadurch können die Auswirkungen auf die Partikelkonzentration mit und ohne Vegetationsträger ermittelt werden. Nach jedem Durchgang wurde die Messkammer gereinigt und getrocknet.

5.5 Zusammenfassung

Zur Durchführung der Untersuchungen an den beiden Standorten Citytunnel Darmstadt und Gladbecker Straße Essen wurden Vergleichsmessungen über den Zeitraum einer Vegetationsperiode durchgeführt. Die Untersuchungen fanden zwischen März 2021 und März 2022 statt. Aufgrund der beschriebenen örtlichen Verzögerungen konnte die Installation der Messgeräte und die Durchführung der Messungen an beiden Standorten nicht zeitgleich erfolgen. Die Datenerhebung mit den *Hobo*-Datenloggern fand in Zeitintervallen von fünf Minuten statt, das Messintervall der *Hawa Dawa* Messgeräte betrug 60 Minuten. Bei den eingesetzten Passivsammlern wurden die sedimentierten Stäube über maximal 14 Probenintervalle von jeweils etwa 26 Tagen auf verschiedenen Akzeptoroberflächen gesammelt.

Im Nachhinein erfolgte eine quantitative Untersuchung der exponierten Glasobjektträger aus den Passivsammlern mit einem vollautomatischen Lichtmikroskop. Zur qualitativen Untersuchung konnten verschiedene Substrate in einem Rasterelektronenmikroskop analysiert werden.

Die Partikel wurden im Anschluss mithilfe einer Software ausgewertet und in verschiedene Partikelgruppen eingeordnet.

Zur Auswertung der Vitalität der eingesetzten Begrünungsbauweisen im Citytunnel Darmstadt, wurde die Entwicklung einzelner Arten fotografisch dokumentiert und die Flächen ganzheitlich zur Analyse mit einem CAD-Programm aufgenommen.

Bei den Moosmatten wurde der Längenzuwachs der Moostriebe mit der *Cranked-Wires*-Methode ermittelt. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen sowie die Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Standorten aufgezeigt.

Ergebnisbetrachtung

6. Ergebnisbetrachtung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Praxisversuche an den Standorten Citytunnel Darmstadt und Gladbecker Straße Essen aufgezeigt. Grundlegend für die Untersuchungen waren Vergleichsmessungen zwischen begrünten und unbegrünten Flächen am jeweiligen Standortsowie die Annahme, eine Abscheidung von Partikeln an den Fassadenbegrünungen messtechnisch erfassen zu können. Die jeweiligen Standorte eignen sich aufgrund ihrer hohen Grundbelastung bedingt durch den hohen Verkehrsfluss für eine Untersuchung.

Der lange Untersuchungszeitraum soll jahreszeitliche Veränderungen der Vegetation und die gegebenenfalls daraus resultierenden Veränderungen in der Abscheideleistung sichtbar machen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen zu den Parametern Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Stickstoffdioxid und Feinstaub dargestellt.

6.1 Messung von Parametern in der Umgebungsluft

Die Messung von Parametern in der Umgebungsluft ist wesentlicher Bestandteil der empirischen Forschungsinhalte dieser Arbeit. Neben Vergleichsmessungen zwischen begrünten und unbegrünten Fassaden sollten Erkenntnisse zum Einfluss von Bauwerksbegrünung auf die Minderung von Luftschadstoffbelastungen im urbanen Raum gewonnen werden. Da die meteorologischen Parameter auch Einfluss auf die Schadstoffkonzentration haben, wurden die Tempe-

ratur und die Luftfeuchtigkeit ebenfalls ausgewertet. Als Basis für die Ergebnisse im folgenden Kapitel dienten die Messungen der Echtzeitmessgeräte von *Hawa Dawa*.

6.1.1 Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Die Messung der Temperatur und relativen Feuchte wurde parallel zu den anderen Parametern mit den Messgeräten aufgenommen. Aufgrund der ungeschützten Lage im Straßenbereich in Essen wurden dort zusätzlich zwei Datenlogger von *Hobo* installiert, die ebenfalls die relative Feuchte und die Lufttemperatur aufnehmen.

6.1.1.1 Standort Darmstadt

Bei den vergleichenden Messungen in Darmstadt wurden die drei Standorte HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“ und HDD 174 „Eingangsportal“ im Zeitraum von März 2021 bis März 2022 messtechnisch verglichen. Wie in *Abbildung 79* zu erkennen ist, wurden im Eingangsportal zwischen dem 19. Oktober 2021 und dem 6. Februar 2022 keine Daten erfasst. Durch die spezielle Lage wurden keine vergleichbaren Daten von umliegenden Messstationen herangezogen, da die Situation „Tunnel“ keinen objektiven Vergleich zulässt. Der Feuchtigkeitswert vor der Begrünung liegt durchgehend über den beiden anderen Messpunkten. Dies kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Neben der Transpirationsleistung der Pflanzen sorgt auch die spezielle Bewässerungstechnik zur Versorgung der Moose für eine dauerhaft hohe Feuchtigkeit im Bereich vor der Begrünung. Im Jahresdurchschnitt kommt die

Begrünung auf 60,71 % relative Feuchte. Hingegen wurden in der Mitte des Citytunnels mit dem Messgerät HDD 172 im Jahresdurchschnitt eine relative Feuchte von 54,42 % gemessen. Die Messungen im Eingangsportal haben eine relative Feuchte von 53,74 % im Jahresdurchschnitt ergeben. Damit lag die relative Feuchte vor der Begrünung etwa 11,5 % über dem Wert im Citytunnel und etwa 10,4 % über dem Eingangsportal.

Die Temperatur verhält sich an allen Messstationen gleich. Die mittleren Temperaturen zwischen der Messstation HDD 172 „Mitte Citytunnel“ und HDD 169 „Begrünung“ weichen ab August geringfügig voneinander ab. Zwischen dem Monat August 2021 und März 2021 ist fast durchgehend eine erhöhte Temperatur von bis zu 1,3 °C zu beobachten.

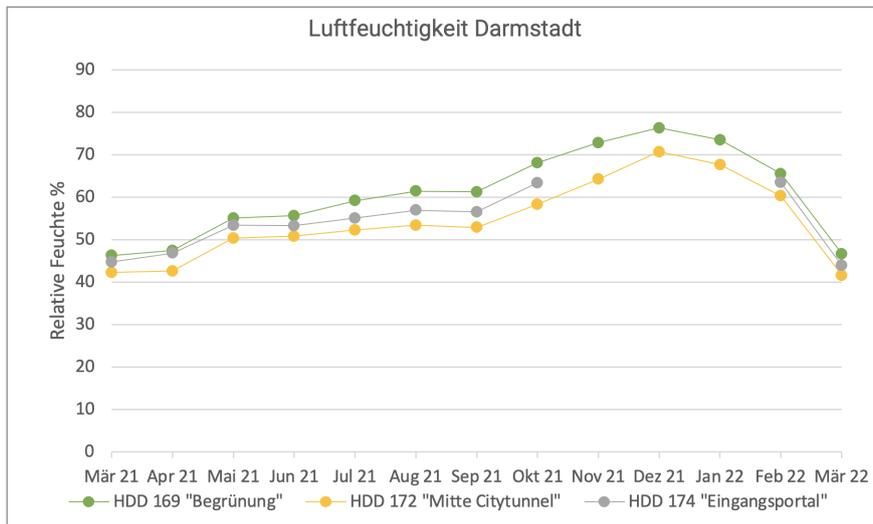


Abbildung 79: Vergleich der Luftfeuchtigkeit an den drei Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“ und HDD 174 „Eingangsportal“ im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot IQR$) eliminiert.

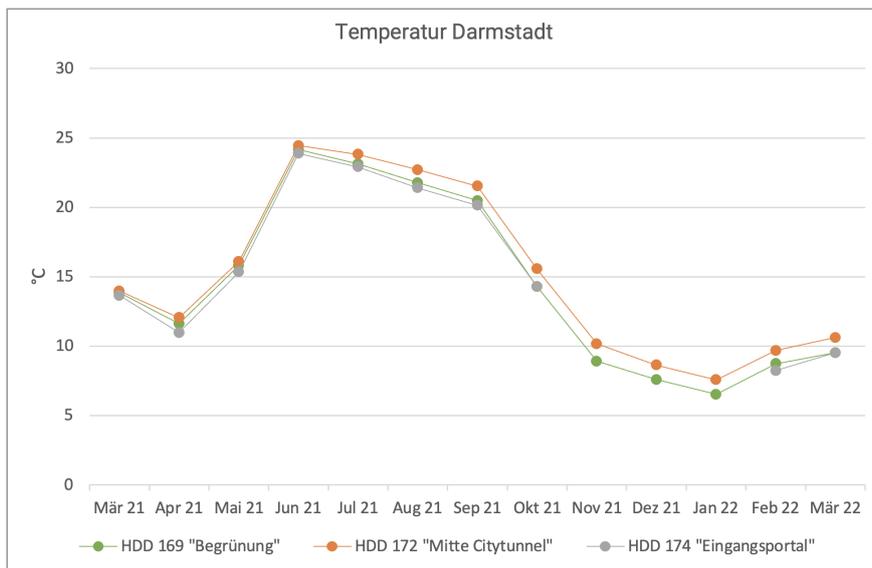


Abbildung 80: Vergleich der Lufttemperatur an den drei Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“ und HDD 174 „Eingangportal“ im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot IQR$) eliminiert.

6.1.1.2 Standort Essen

In Essen wurden ebenfalls die meteorologischen Parameter Temperatur und Luftfeuchtigkeit messtechnisch erfasst. Neben den beiden Echtzeitmessgeräten von *Hawa Dawa* wurden hier zusätzlich zwei *Hobo*-Datenlogger für die Aufnahme von Temperatur und Luftfeuchtigkeit installiert. Durch die schmalen Bereiche der Begrünung im Verhältnis zur breiten Fassadenfläche konnten dadurch umfangreichere Messdaten erhoben werden. Wie anhand von *Abbildung 81* zu erkennen ist, liegen die Messwerte näher beieinander, als am Tunnelstandort in Darmstadt. Ein größerer Unterschied ist ausschließlich in den Monaten Mai bis August zu erkennen. Im Mai liegt die Luftfeuchtigkeit vor den Begrünungen im Durchschnitt um 3,79 % über den Messwerten vor der Putzfassade. Ab Mai nimmt die Differenz in der Luftfeuchtigkeit gleichmäßig ab. Im September und den darauffolgenden Monaten liegt die Differenz bei etwa 1

%. Bei der Auswertung der Temperaturen in *Abbildung 82* ist am Standort Essen kein signifikanter Unterschied zwischen den Messdaten erkennbar.

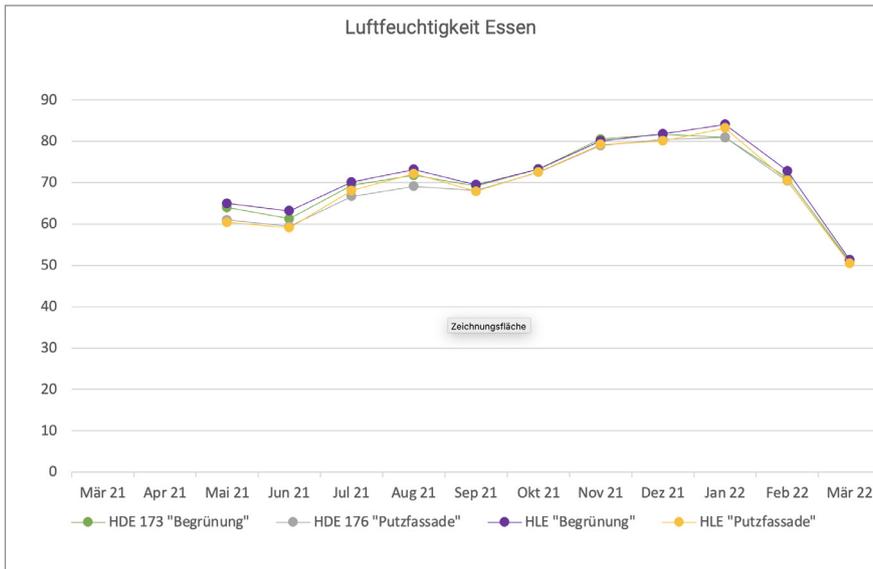


Abbildung 81: Vergleich der Luftfeuchtigkeit an den vier Standorten HDE 173 „Begrünung“, HDE 176 „Putzfassade“, HLE „Begrünung“ und HLE „Putzfassade“ im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot IQR$) eliminiert.

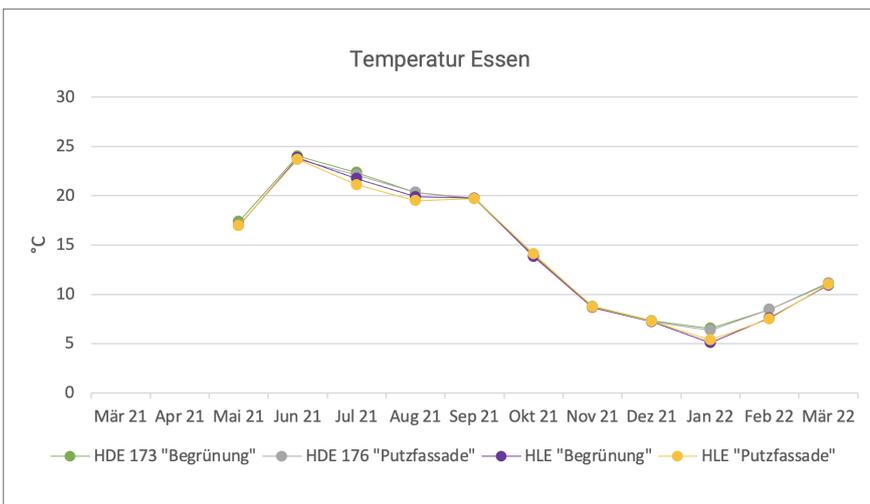


Abbildung 82: Vergleich der Lufttemperatur an den vier Standorten HDE 173 „Begrünung“, HDE 176 „Putzfassade“, HLE „Begrünung“ und HLE „Putzfassade“ im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot IQR$) eliminiert.

6.1.2 Messung der Stickstoffdioxidkonzentration in der Umgebungsluft

Die Untersuchungen der Stickstoffdioxidkonzentrationen werden in dieser Arbeit mit aufgeführt, da sie mit den Hawa Dawa Messgeräten automatisch erfasst wurden und da diesem Luftschadstoff ebenso eine große Bedeutung im städtischen Lufthaushalt zukommt. Zudem werden die

verschiedenen Parameter miteinander verglichen, um so Zusammenhänge und Unterschiede zwischen den Schadstoffkonzentrationen festzustellen.

6.1.2.1 Standort Darmstadt

Bei Betrachtung von *Abbildung 83*, ist deutlich zu erkennen, dass die monatlichen Mittelwerte der NO_2 -Konzentration in einigen Monaten deutlich über dem Jahresgrenzwert liegen. Für die Umgebungsluft gilt ein Grenzwert für Stickstoffdioxid von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Jahresmittelwert (39.BImSchV). An der nahegelegenen Messstelle Darmstadt Hängelstraße ist ein Jahresmittelwert von $27,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Untersuchungszeitraum von März 2021 bis März 2022 erfasst worden. Im gleichen Zeitraum lagen Messungen im Citytunnel und am Eingangsportal deutlich über diesem Wert. Am Eingangs-

portal (Messstelle HDD 174) wurde ein NO_2 -Jahresmittelwert von $30,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erfasst. In der Mitte des Citytunnels (Messstelle HDD 172) wurde ein Mittelwert von $43,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und vor der Begrünung (Messstelle HDD 169) ein Mittelwert von $35,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen. Insgesamt lag der Mittelwert an der Messstelle HDD 172 damit etwa 21,9 % über dem Vergleichswert vor der Begrünung. Ähnlich wie an der Messstelle Darmstadt Hängelstraße sind auch am Eingangsportal des Tunnels eine Luftzirkulation und ein Austausch mit umgebenden Luftmassen vorhanden. Auch wenn die Messstelle HDD 174 im

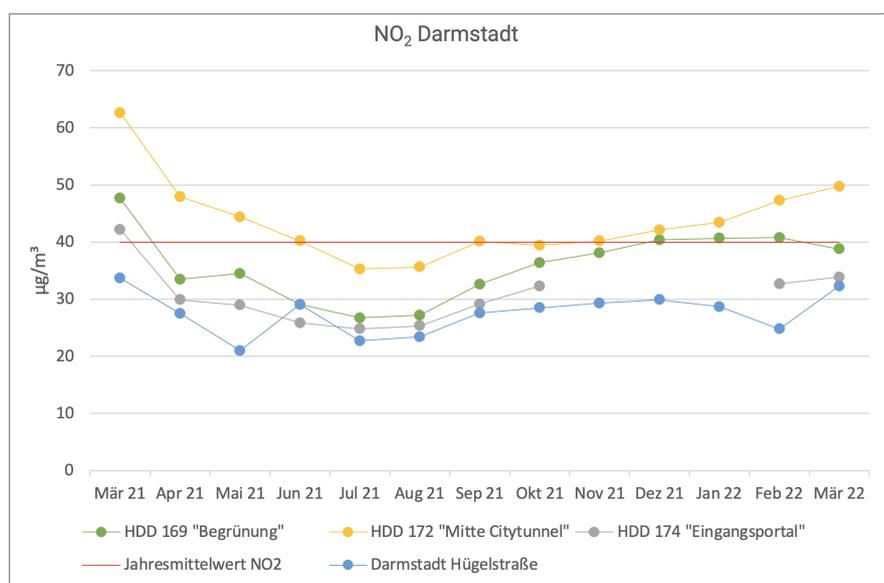


Abbildung 83: Vergleich der NO_2 -Konzentrationen an den drei Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“ und HDD 174 „Eingangsportal“ im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert.

Jahresmittelwert über dem Jahresgrenzwert liegt, sind die Messstellen im Tunnel differenziert zu betrachten. Für Darmstadt sind jedoch nur Messstellen relevant, an denen die Bevölkerung der Schadstoffkonzentration direkt oder indirekt über einen gewissen Zeitraum ausgesetzt ist. Der Tagesgrenzwert von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde an keiner Messstelle überschritten.

Dennoch sind die hohen Konzentrationen als gesundheitsgefährdend einzustufen. Insgesamt zeigen alle drei Messgeräte einen ähnlichen Verlauf in der Konzentrationsentwicklung. Für Juni 2021 hatte die Messstation Darmstadt Hügelstraße im Verlauf jedoch einen deutlich erhoherten Wert zu verzeichnen.

6.1.2.2 Standort Essen

Am Standort in Essen ist ebenfalls ein paralleler Verlauf der NO_2 -Konzentrationen erkennbar. Allerdings weichen im Monat Mai 2021 die Konzentrationen stark voneinander ab. Im Zeitraum zwischen Mai 2021 und Oktober 2021 liegt die NO_2 -Konzentration an der Putzfassade durchgehend, im Durchschnitt um 18 % höhere als am Messstandort vor der Begrünung. Im darauffolgenden Zeitraum zwischen Oktober 2021 und Februar 2022

verändert sich das Verhältnis und es wurde eine höhere Konzentration vor der Begrünung, im Durchschnitt um 9 %, gemessen. Aufgrund der verkurzten Messdauer im Monat Mai wird dieser Zeitraum hier nicht angegeben. Im Vergleich der Jahresmittelwerte liegt die öffentliche Messstation mit $33,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ knapp unter dem Wert vor der Begrünung mit $34,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und der Putzfassade mit $35,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

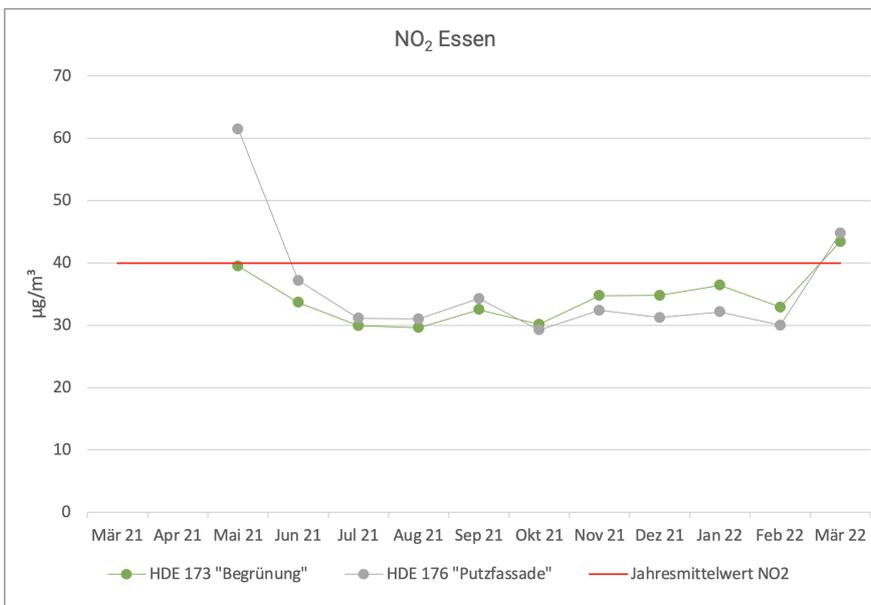


Abbildung 84: Vergleich der NO_2 -Konzentrationen an den zwei Standorten HDE 173 „Begrünung“ und HDE 176 „Putzfassade“, im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Zusatztlich wurde der Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert.

6.1.3 Messung der Staubkonzentration in der Umgebungsluft

Eine zentrale Fragestellung dieser Arbeit gilt der Untersuchung von Feinstaubkonzentrationen vor wandgebundenen Fassadenbegrünungen im Vergleich zu unbegrünter Fassadenbereiche. Anhand von messtechnischen Untersuchungen wurde die Massenkonzentration an Feinstäuben der Größenordnungen PM10 und PM2.5

an zwei Standorten und mit mehreren Messgeräten erfasst. Die Massenkonzentration [Cm] bezieht sich auf die Masse von Partikeln in einem Kubikmeter Luft. Anhand der messtechnisch erfassten Massenkonzentration kann ein quantitativer Vergleich zwischen den Standorten erstellt werden.

6.1.3.1 Standort Darmstadt

Bei Betrachtung der erfassten Feinstaubdaten in der Größenordnung PM10, ist ein deutlicher Zusammenhang der Konzentrationsverläufe zwischen März 2021 und März 2022 ersichtlich. Zudem korrelieren die Datenreihen mit den Messwerten an der Messstation „Darmstadt Hügelstraße“. Alle Werte zeigen einen gleichmäßigen Jahresverlauf, außer im Monat Mai 2021. Hier wurde im Vergleich zu den übrigen Monaten ein deutlich niedrigerer Wert gemessen. In allen Monaten ist das Verhältnis der Messpunkte, wie in *Abbildung 85* zu erkennen ist, ähnlich. Die Analyse der Jahresmittelwerte an

PM10 zeigt, dass der durchschnittliche Wert an der Messstation HDD 172 „Mitte Citytunnel“ mit $23,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (38,40 %) über dem Jahresdurchschnitt der Messstation HDD 169 „Begrünung“ mit $17,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt. Der Jahresmittelwert am Eingangportal liegt mit $19,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (16,0 %) über dem Wert der Begrünung. Der geringste Wert wurde an der Messstation „Darmstadt Hügelstraße“ mit einem Jahresmittelwert von $13,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erfasst. Die üblichen Grenzwerte wurden an allen Stationen eingehalten.

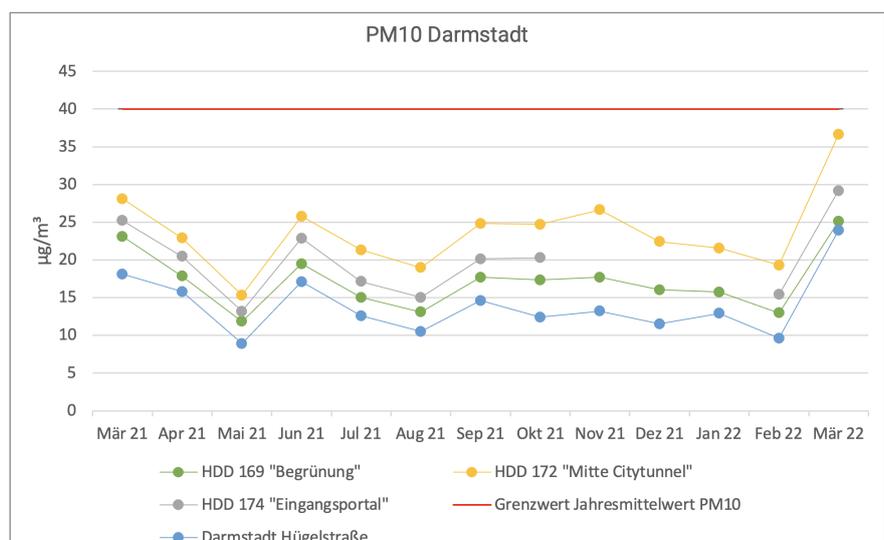


Abbildung 85: Vergleich der PM10-Konzentrationen an den vier Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“, HDD 174 „Eingangportal“ und Messstation „Darmstadt Hügelstraße“, im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilsabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert.

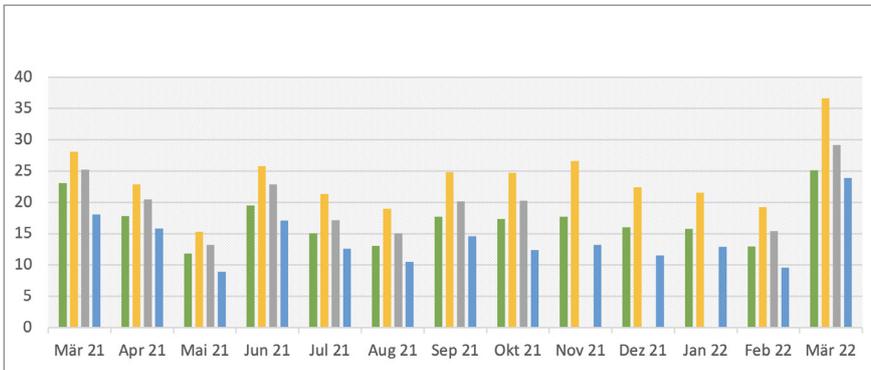


Abbildung 86: Vergleich der PM10-Konzentrationen an den vier Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“, HDD 174 „Eingangsportal“ und Messstation „Darmstadt Hügelstraße“ als Säulendiagramm, im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot IQR$) eliminiert.

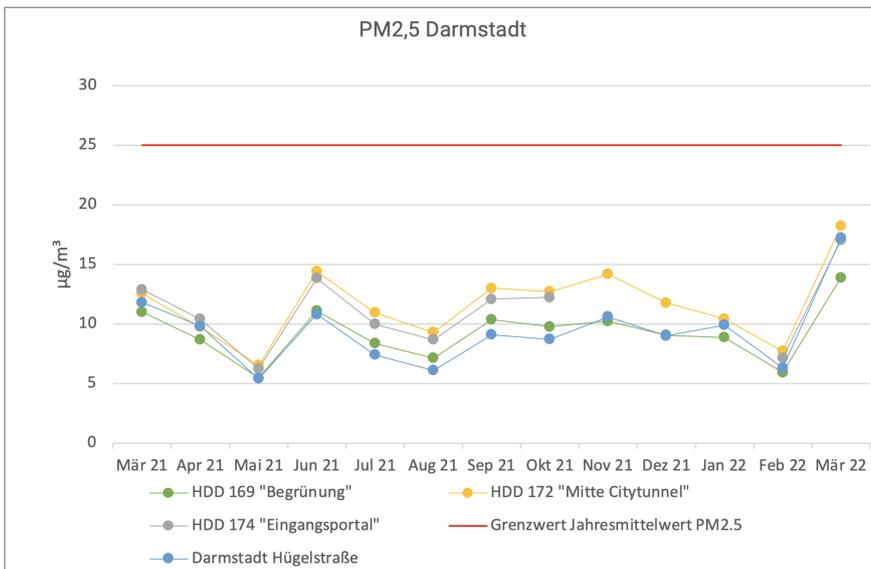


Abbildung 87: Vergleich der PM2,5-Konzentrationen an den vier Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“, HDD 174 „Eingangsportal“ und Messstation „Darmstadt Hügelstraße“, im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot IQR$) eliminiert.

Verglichen mit PM_{2,5} ist ein deutlicher Zusammenhang im Verlauf der PM₁₀ Konzentration erkennbar. Der durchschnittliche Wert an der Messstation HDD 172 „Mitte Citytunnel“ liegt mit 11,65 µg/m³ (26,4 %) über dem Jahresdurchschnitt der Messstation HDD 169 „Begrünung“, mit 9,22 µg/m³. Der Jahresmittelwert am Eingangsportal

liegt mit 11,05 µg/m³ (19,8 %) über dem Wert der Begrünung. Die Messstation „Darmstadt Hügelstraße“ liegt mit 9,4 µg/m³ etwa 2 % über dem Jahreswert der Begrünung. Die PM_{2,5}-Konzentrationen haben den gesetzlich festgelegten Grenzwert von 25 µg/m³ im Jahresdurchschnitt nicht überschritten.

6.1.3.2 Standort Essen

Für den Standort Essen sind die beiden Konzentrationsverläufe von PM₁₀ zwischen Mai 2021 und März 2022 dargestellt (Abbildung 88). Zwischen den beiden Messpunkten ist ein Zusammenhang im Verlauf und ein deutlicher Unterschied in den Konzentrationen zu erkennen. Der Messwert für PM₁₀ vor den Begrünungen liegt dauerhaft unter dem Messwert der Putzfassade. Jedoch schwanken die Werte im jahreszeitlichen Verlauf stark. Mit einem Durchschnittswert von 19,94 µg/m³ liegt der Messpunkt HDD173 „Begrünung“ 22 % unter den Messwerten von HDD 176 „Putzfassade“, mit 24,32 µg/m³. Die

Jahresgrenzwerte für PM₁₀ wurden ganzjährig eingehalten. Die Grenzwerte für den 24-Stunden-Durchschnitt mit 50 µg/m³ an bis zu 35 Tagen wurden an der Messstation HDE 176 „Putzfassade“ an insgesamt 16 Tagen überschritten. An der öffentlichen Messstelle in der Gladbecker Straße wurde dieser Wert insgesamt 21-mal überschritten [LANUV (Hrsg.) 2024, o.S.]. Vor der Begrünung wurde der 24-Stunden-Durchschnitt an insgesamt vier Tagen überschritten.

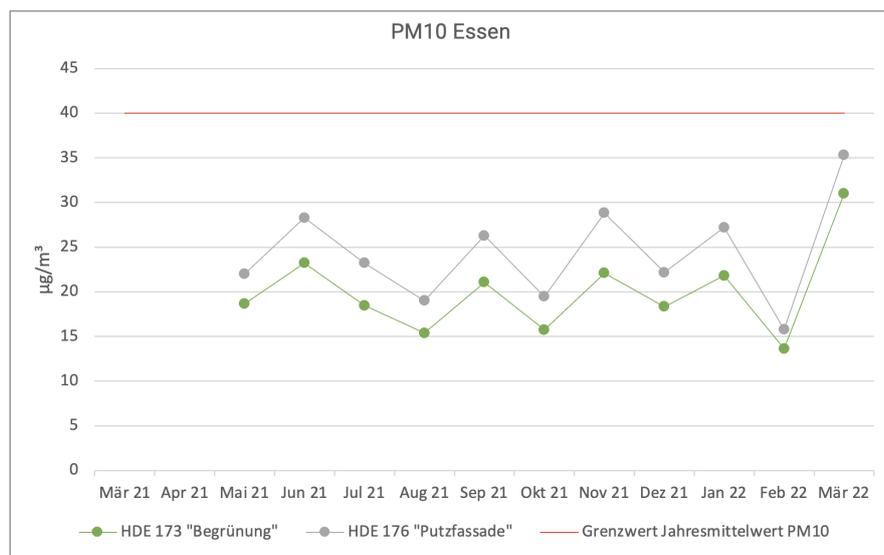
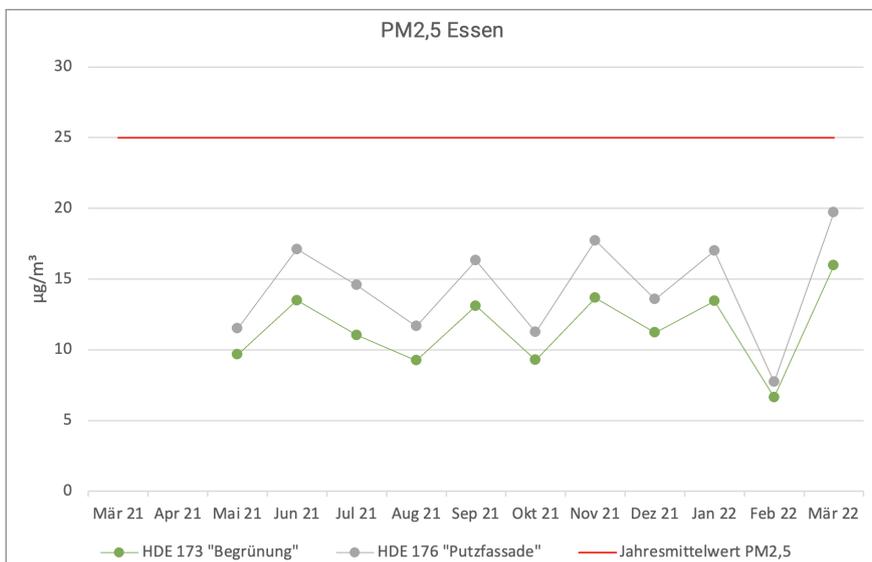


Abbildung 88: Vergleich der PM₁₀-Konzentrationen an den zwei Standorten HDE 173 „Begrünung“ und HDE 176 „Putzfassade“, im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Zuzusatzlich wurde der Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands (1,5*IQR) eliminiert.

In *Abbildung 89* ist der jahreszeitliche Verlauf der PM_{2,5}-Messungen am Standort Essen aufgezeichnet. Auch bei der PM_{2,5}-Konzentration lässt sich ein deutlicher Zusammenhang der beiden Messreihen im jahreszeitlichen Verlauf erkennen. Der durchschnittliche Wert für PM_{2,5} vor der Begrünung liegt mit

11,52 µg/m³, rund 24,7 % unter der durchschnittlichen Konzentration vor der Putzfassade, mit 14,37 µg/m³. Die Grenzwerte von 25 µg/m³ im Jahresdurchschnitt wurden damit eingehalten.



*Abbildung 89: Vergleich der PM_{2,5}-Konzentrationen an den zwei Standorten HDE 173 „Begrünung“ und HDE 176 „Putzfassade“, im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands (1,5*IQR) eliminiert.*

6.2 Messung von Staubkonzentrationen auf Oberflächen

Neben der Erfassung von Echtzeit-Umweltdaten ist die Bindung von Staubkonzentrationen auf unterschiedlichen Oberflächen Teil der Untersuchungen. Mit der Probennahme in Sigma-2 Passivsammlern sollen zum einen Erkenntnisse zur quantitativen Bestimmung von Stäuben erlangt wer-

den. Mit den Erkenntnissen lassen sich Aussagen zur Anzahl und Klassifizierung der Partikel treffen. Zum anderen ermöglichen qualitative Analysen eine Betrachtung von Einzelpartikeln und deren Ursprungsbestimmung.

6.2.1 Quantitative Untersuchung auf Glasoberflächen

Die lichtmikroskopische Analyse der Anzahl sedimentationsrate [D_n in $\text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$] ist eine Möglichkeit, eine Aussage zur sedimentierten Partikelanzahl zu treffen. Dazu wird die Partikelanzahl [n] bestimmt, die auf einer Auswertefläche [F] in einer Expositionszeit [t] sedimentiert sind. Für die Auswertungen wurden in Darmstadt im Zeitraum vom 1. April 2021 bis zum 26. März 2022 insgesamt 14 Proben in

den vier Sigma-2-Sammlern exponiert. In Essen wurden im Zeitraum vom 31. Mai 2021 bis zum 29. März 2022 insgesamt elf Proben exponiert. Die Bestäubungsintervalle liegen bei etwa vier Wochen.

6.2.1.1 Standort Darmstadt

In Darmstadt wurden jeweils zwei Sigma-2-Sammler vor der Begrünung und zwei weitere im Verlauf des Tunnels installiert. In *Abbildung 90* ist die Anzahl sedimentationsrate im Jahresverlauf dargestellt. Anhand der Verläufe ist erkennbar, dass die Anzahl der Partikel in den ersten drei Intervallen stark abfällt, mit einem zwischenzeitlichen Anstieg vor der Begrünung im achten Messintervall. Die Verläufe der Messpunkte vor der Begrünung liegen mit Ausnahme von Messintervall 8 durchgehend unterhalb der beiden Messpunkte im Tunnel.

An beiden Messpunkten vor der Begrünung (DS1 und DS2) besteht im Mittel eine Anzahl sedimentationsrate von $571,20 \text{ n cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Im gleichen Zeitraum lag die mittlere Anzahl sedimentationsrate am Messpunkt DS3 bei $802,21 \text{ n cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ und am Messpunkt DS4 bei $1699,22 \text{ n cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Im gesamten Untersuchungszeitraum (*Tabelle 10*) wurden am Sammler DS2 (Begrünung unten) im Vergleich zum Sammler DS1 (Begrünung oben) 13,39 % mehr deponierte Partikel erfasst. Im Vergleich zum Sammler DS1 wurden am Sammler DS3 (Mitte Citytunnel) 52,93 % und am Sammler DS4 (Ende Citytunnel) 230,35 % mehr Partikel erfasst.

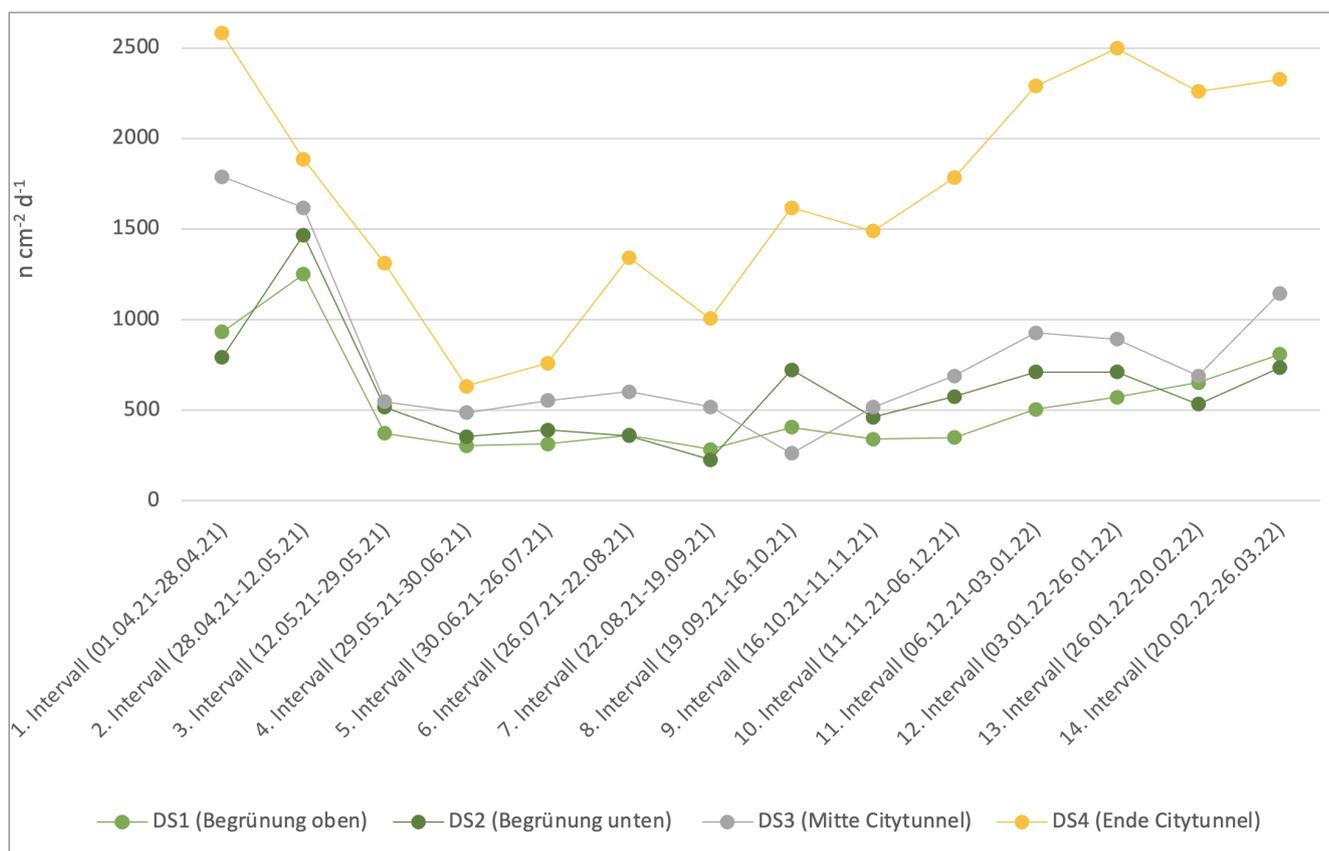


Abbildung 90: Vergleich der Anzahlsedimentationsrate an den vier Standorten DS1 (Begrünung oben), DS2 (Begrünung unten), DS3 (Mitte Citytunnel) und DS4 (Ende Citytunnel), im Zeitraum vom 1. April 2021 bis zum 26. März 2022.

Sigma-2 Sammler:	Installationshöhe:	Partikelanzahl gesamt [n _{Ges} cm ⁻²]:	Prozentuale Veränderung (zum Sammler DS1):
DS1 (Begrünung oben)	3,00 m	183937	
DS2 (Begrünung unten)	1,50 m	208572	+13,39 %
DS3 (Mitte Citytunnel)	3,00 m	281291	+52,93 %
DS4 (Ende Citytunnel)	3,00 m	607632	+230,35 %

Tabelle 10: Aufschlüsselung der Gesamtzahl an exponierten Partikeln in Darmstadt im gesamten Untersuchungszeitraum.

6.2.1.2 Standort Essen

Am Standort Essen wurden insgesamt zwei Sigma-2 Passivsammler installiert. *Abbildung 91* stellt die beiden Anzahl-sedimentationsraten im zeitlichen Verlauf dar. Anhand der Verläufe ist erkennbar, dass die Anzahl-sedimentationsrate der Begrünung ES2 durchgehend unterhalb der Werte des Sammlers ES1 (Putzfassade) liegen. Die zeitlichen Verläufe sind mit Ausnahme

des 4. bis 6. Intervalls überwiegend parallel. Zwischen dem 21. August 2021 und dem 15. November 2021 wurde eine deutliche Steigerung von rund 88 % in den Anzahl-sedimentationsraten erfasst. Im erfassten Zeitraum (*Tabelle 11*), wurden am Passivsammler ES1 43,77 % mehr Partikel erfasst als am Passivsammler ES2 vor der Begrünung.

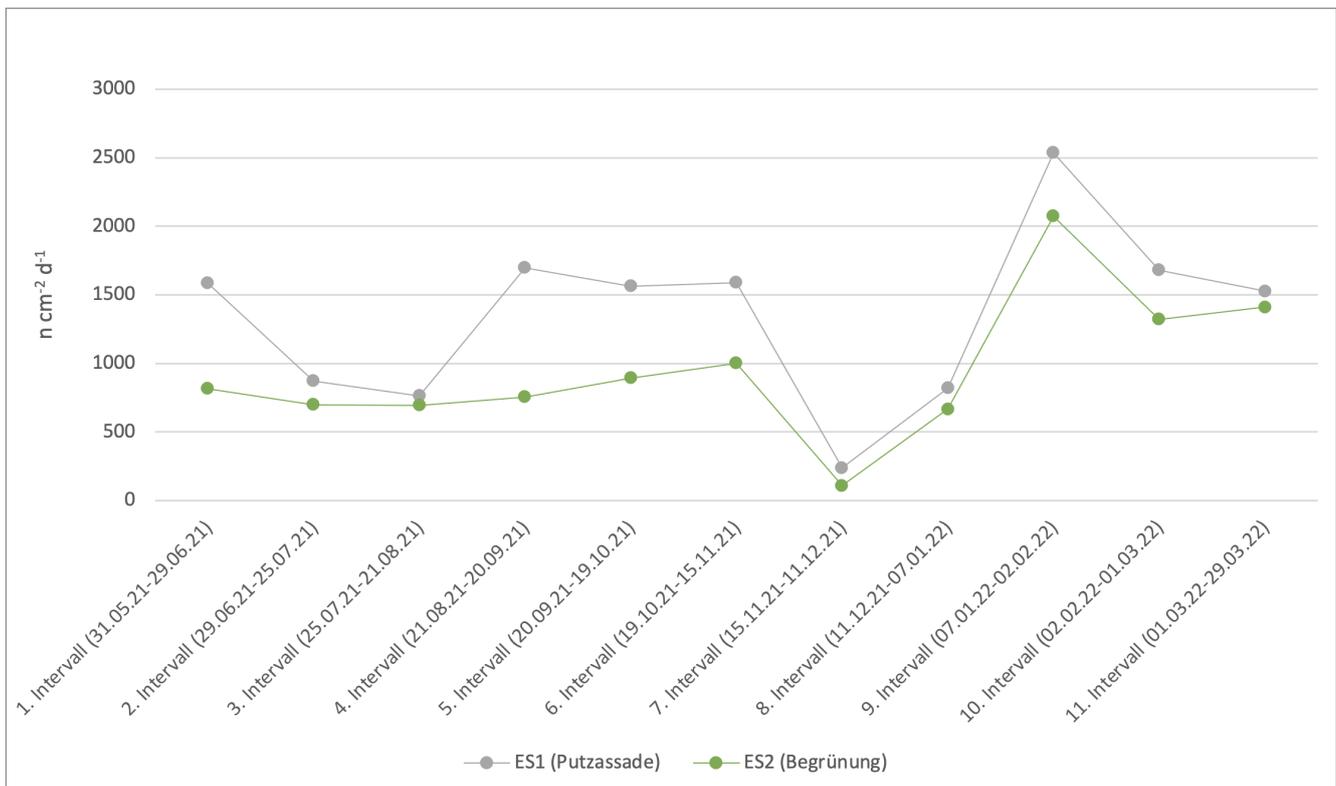


Abbildung 91: Vergleich der Anzahl-sedimentationsrate an den zwei Standorten in Essen: ES1 (Begrünung) und ES2 (Fassade), im Zeitraum vom 31. Mai 2021 bis zum 29. März 2022.

Sigma-2 Sammler:	Installationshöhe:	Partikelanzahl gesamt [n _{Ges} cm ⁻²]:	Prozentuale Veränderung (zum Sammler ES2):
ES1 (Putzfassade)	3,50m	410639	+43,77
ES2 (Begrünung)	3,50m	285618	

Tabelle 11: Aufschlüsselung der Gesamtzahl an exponierten Partikeln in Essen im gesamten Untersuchungszeitraum.

6.2.2 Qualitative Untersuchung auf Kohlenstoffoberflächen (C-Pad) und Bor-Substraten

Durch die passive Probennahme mit Sigma-2 Sammlern können Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von ca. 1 bis 80 μm auf Kohlenstoffoberflächen (C-Pad) und Borsubstraten gesammelt werden. Mit der automatisierten Analyse mittels Rasterelektronenmikroskopie werden anschließend Form, Struktur und chemische Zusammensetzung untersucht. Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse für die Standorte Darmstadt und Essen vom 30. Juni 2021 bis zum 26. Juli 2021 vorgestellt.

Die Grafiken beinhalten eine Auswertung der Partikel mit unterschiedlichen

Größenfraktionen (x-Achse) und der Massenkonzentration (y-Achse) auf Basis von vier Partikelgruppen. Unterschieden werden die deponierten Partikel in Metallabrieb, Pneu- oder Reifenabrieb, mineralische und biologische/biogene Partikel. Die Ausprägung der vier Partikelgruppen kann *Abbildung 92* entnommen werden. Die Gruppen lassen sich anhand ihrer morphologischen und chemischen Eigenschaften unterscheiden.

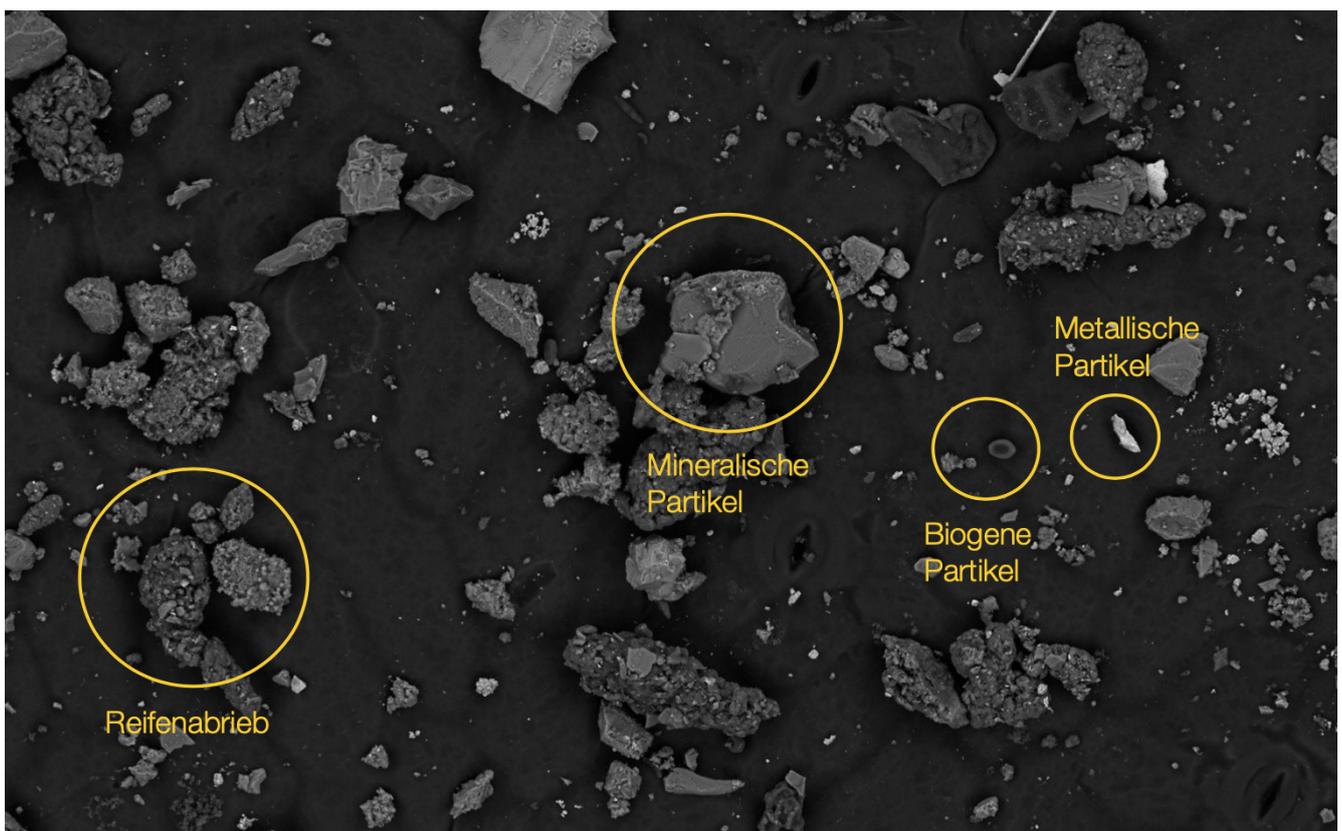


Abbildung 92: Hochauflösende REM-Aufnahme der Blattoberfläche einer *Bergenia cordifolia* 'Baby Doll', vor dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken; Markierung der vier häufigsten Partikelgruppen: Reifenabrieb, mineralische Partikel, biogene Partikel und metallische Partikel; Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt; kein Maßstab.

Partikelgruppe:	Herkunft & Quellen:	Beschreibung:
Pneu-/ Reifenabrieb	Reifenabrieb	<ul style="list-style-type: none"> - Überwiegender Teil Partikel über 10 Mikrometer, welche nicht zu Feinstaub zählen - Wird erzeugt durch Reibung von Straßenoberfläche und Pneu - Partikel bestehen aus verschiedenen Fraktionen von Gummi, sowie mineralischen und metallischen Bestandteilen (Gummi macht ca. 50 % der Gesamtmasse der Pneuartikel aus)
Metallabrieb	Schiene, Rad- und Bremsabrieb von Eisenbahn, sowie Bremsabrieb im Straßenverkehr und Schweißarbeiten	<ul style="list-style-type: none"> - treten als Einzelpartikel, als aggregierte oder als kugelförmige Partikel auf - Partikel bestehen aus Eisen mit Anteilen von Sauerstoff, und anteilig Kupfer, Zink, Barium, Zinn, Antimon und Mangan, etc. - Häufige Korrelation mit Pneuabriebpartikeln
Mineralische Partikel	Straßenabrieb, Bauarbeiten, geogener Hintergrund	<ul style="list-style-type: none"> - Partikel bestehen hauptsächlich aus Sauerstoff, Silizium oder Kalzium - Treten häufig als Silikate, Kalziumcarbonate oder Gemische auf. - Sowohl Einzelkristalle als auch aggregierte Partikel möglich
Biogene Partikel	Sporen, Pollen, Pflanzenrückstände, tierische oder menschliche Partikel	<ul style="list-style-type: none"> - Partikel bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff und Wasserstoff - Morphologie kann je nach Partikelherkunft sehr unterschiedlich ausfallen

Tabelle 12: Aufschlüsselung und Beschreibung von Staubpartikeln aus dem Straßenverkehr (in Anlehnung an Particle Vision GmbH 2020).

6.2.1.1 Standort Darmstadt

Am Standort Citytunnel Darmstadt wurden in den vier verwendeten Sigma-2 Sammlern jeweils eine Probe exponiert (siehe Kapitel 3.2). In Abbildung 93 bis 97 werden die Ergebnisse der Messungen aufgezeigt.

Anhand folgender Grafiken ist eine deutliche Zunahme der Partikelanzahl in den Größenfraktionen unter 10 µg erkennbar. Aufgrund der Exposition der Sigma-2-Sammler im Citytunnel ist von einem sehr hohen Anteil an

Partikeln aus dem Straßenverkehr auszugehen. Besonders auffällig an allen Proben ist die deutlich erhöhte Anzahl an metallischen Partikeln im Verhältnis zu den anderen Partikelgruppen.

Der größte Teil der Partikel ist metallischer Herkunft und aufgrund eines hohen Anteils an Partikeln mit einem geringen Durchmesser der Kategorie Feinstaub zuzuordnen. Die zweitgrößte Gruppe bilden Partikel aus mineralischen Bestandteilen, gefolgt

von organischen Partikeln. Mit großem Abstand bildet der Reifenabrieb den geringsten Anteil an der Staubbelastung im Citytunnel.

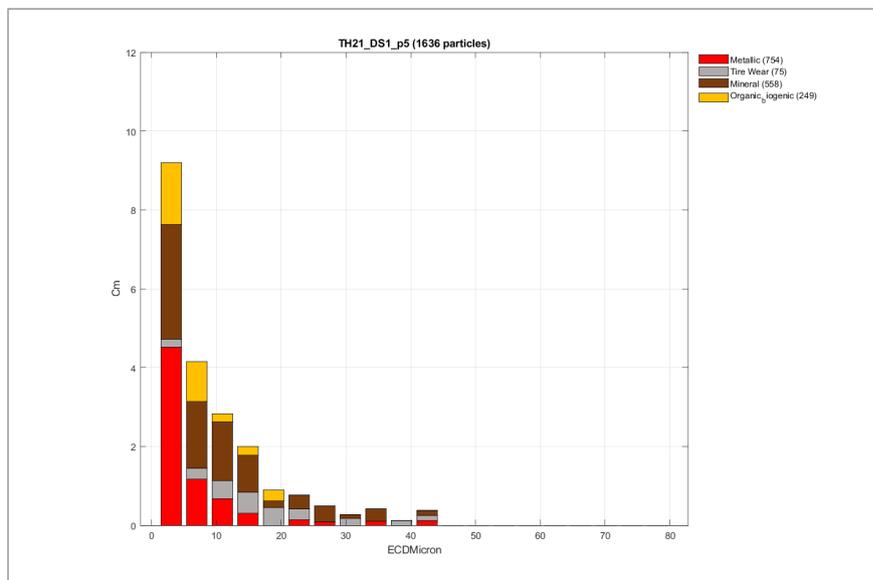


Abbildung 93: Morpho-chemische Partikelanalyse der DS1-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 30.06.2021 bis 26.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.

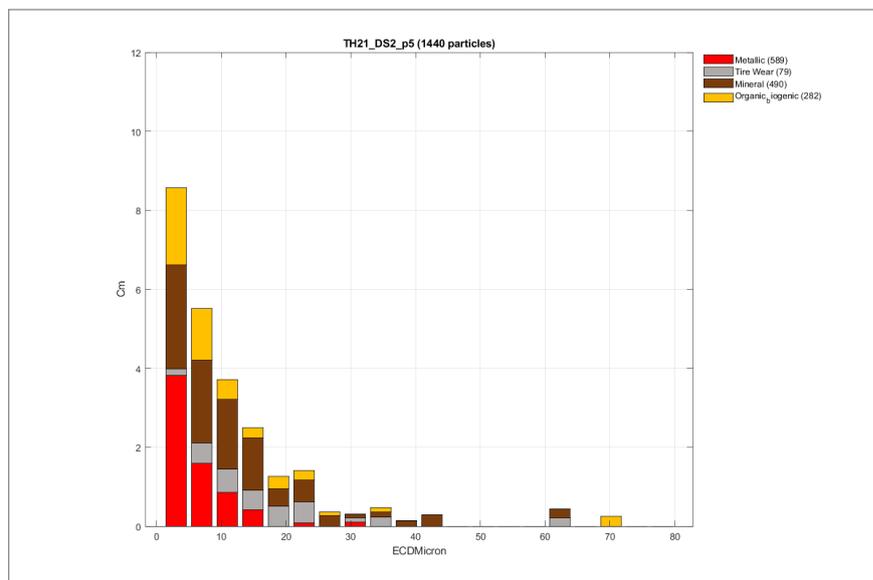


Abbildung 94: Morpho-chemische Partikelanalyse der DS2-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 30.06.2021 bis 26.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.

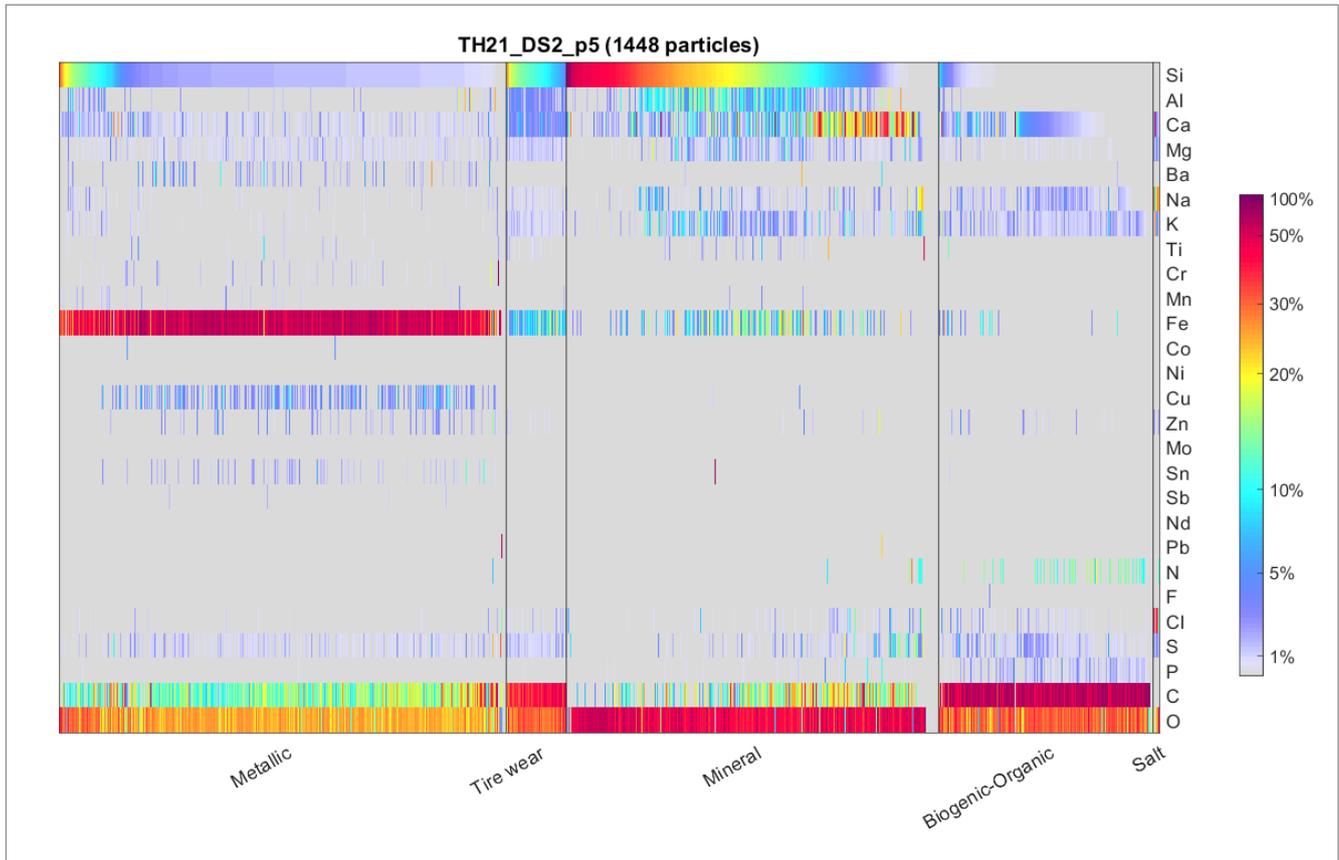


Abbildung 95: Graphische Darstellung (Heatmap) der chemischen Zusammensetzung von DS2 im Zeitraum vom 30.06.2021 bis 26.07.2021. Die Partikel sind nach morpho-chemischen Gruppen zugeordnet; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.

Abbildung 93 schlüsselt die Zusammensetzung aller im Zeitraum vom 30. Juni bis zum 26. Juli 2021 deponierten Partikel auf. Anhand der sogenannten *Heatmap* ist deutlich erkennbar, aus welchen Element-Bestandteilen die einzelnen Partikelgruppen hauptsächlich bestehen. Bei den metallischen

Partikeln sind vorwiegend Eisen (Fe), Sauerstoff (O) und Kohlenstoff (C) gekennzeichnet. Zusätzlich aufgeführt ist die Partikelgruppe Salz. Die *Heatmap* zeigt einen erhöhten partikulären Eintrag von Streusalz im Winter.

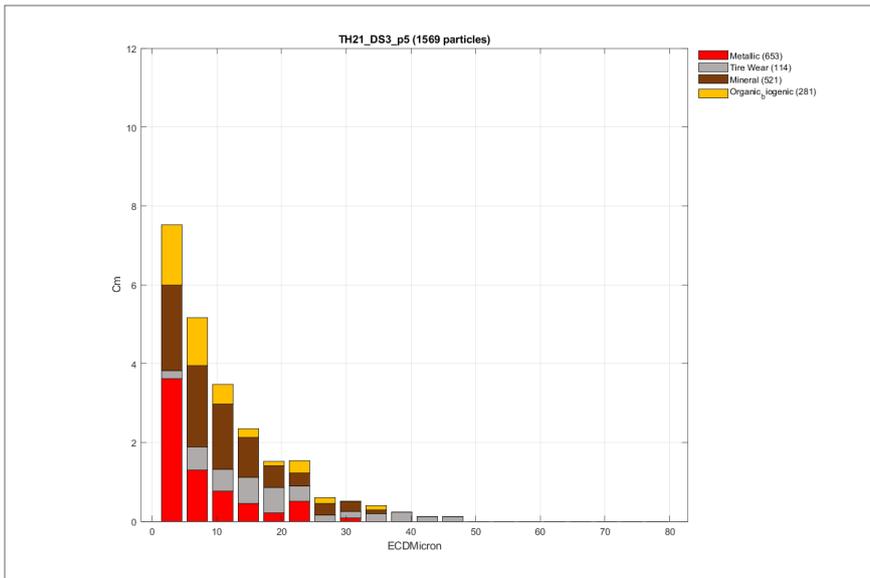


Abbildung 96: Morpho-chemische Partikelanalyse der DS3-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 30.06.2021 bis 26.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.

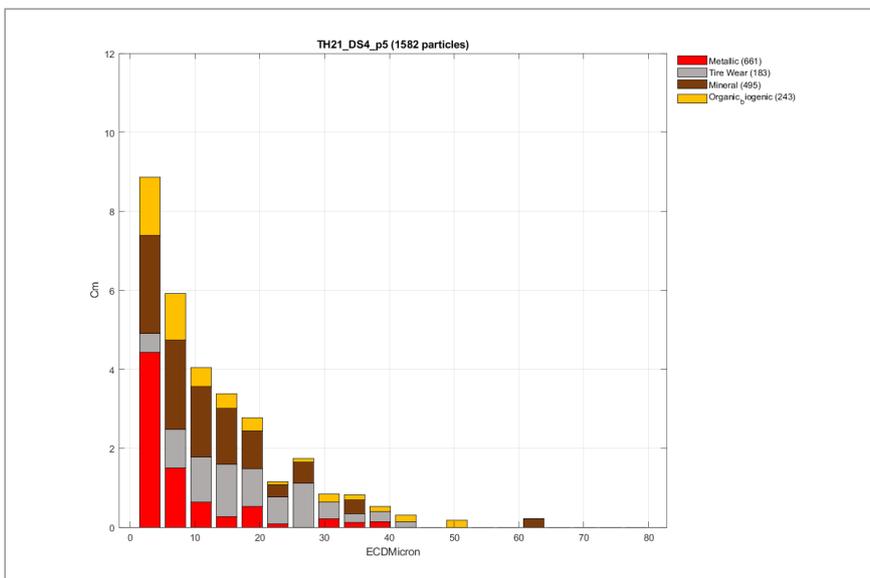


Abbildung 97: Morpho-chemische Partikelanalyse der DS4-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 30.06.2021 bis 26.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.

6.2.2.2 Standort Essen

Am Standort Essen wurde im Zeitraum vom 29. Juni 2021 bis zum 25. Juli 2021 jeweils eine Akzeptoroberfläche mit unterschiedlichen Substraten, wie in Darmstadt exponiert. Die Abbildungen *Abbildung 98 und 99* zeigen eine unterschiedliche Ausprägung der Partikelgruppen im Vergleich zu Darmstadt. Am Standort in Essen sind mineralische Partikel der prozentuale Hauptbestandteil in den Proben, ge-

folgt von metallischen und organischen Partikeln sowie Reifenabrieb. Anhand der Abbildungen ist in der Probe ES1 ein besonders hoher Anteil an feinen, mineralischen Partikeln enthalten. Während die Partikel von Reifenabrieb mit Größenzuwachs auch in der Anzahl zunehmen, nehmen alle anderen Partikelgruppen mit geringerem aerodynamischem Durchmesser zu.

Abbildung 98: Morpho-chemische Partikelanalyse der ES1-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 29.06.2021 bis 25.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDCMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.

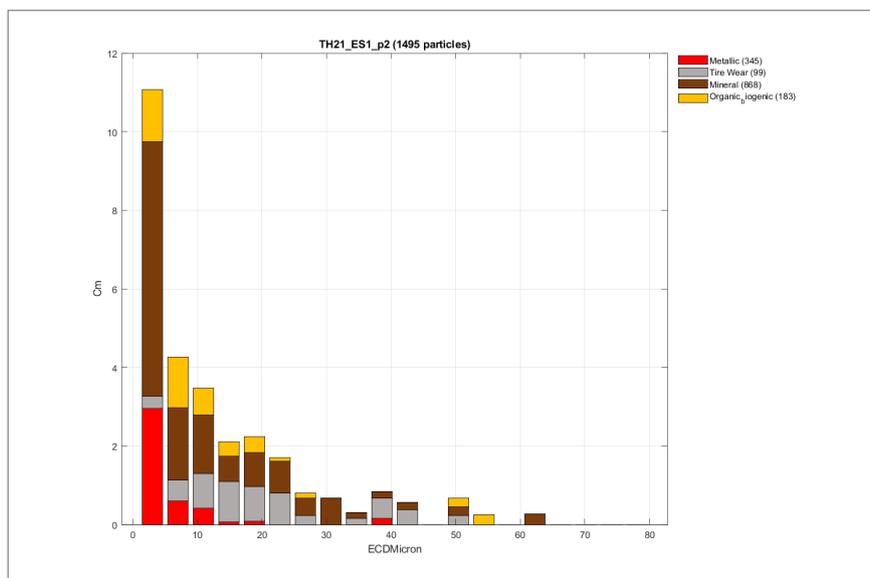
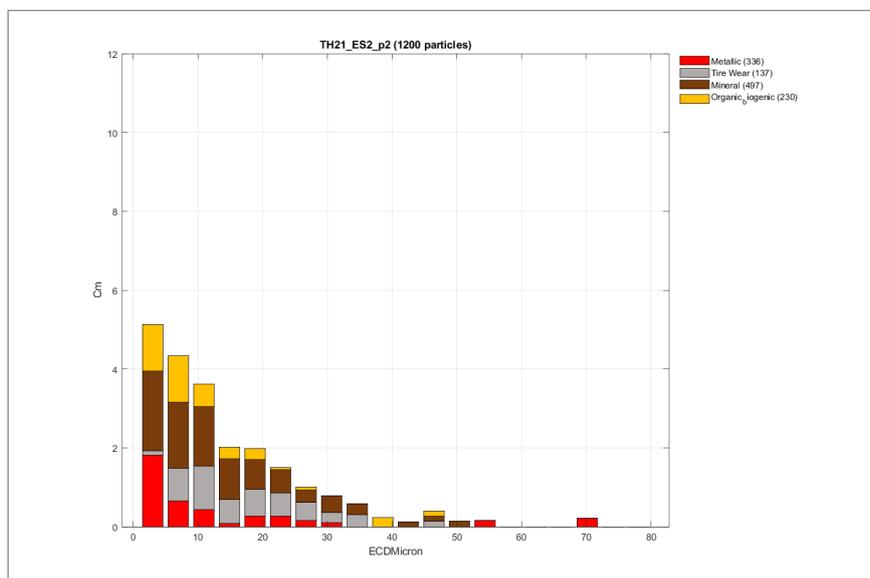


Abbildung 99: Morpho-chemische Partikelanalyse der ES2-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 29.06.2021 bis 25.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDCMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.



Neben den Elementkonzentrationen wurde in Essen ebenfalls eine Zuordnung der einzelnen Partikel in morpho-chemische Gruppen vorgenommen. Auf Basis der chemischen Analysen können die Partikel auch am Standort in Essen auf die jeweiligen Elementzusammensetzungen hin analysiert werden. Wenngleich die Verteilung der Partikel in den Gruppen unterschiedlich ist, deutet die chemi-

sche Elementzusammensetzung in beiden *Heatmaps* auf eine erhöhte Konzentration verkehrsbedingter Partikel hin.

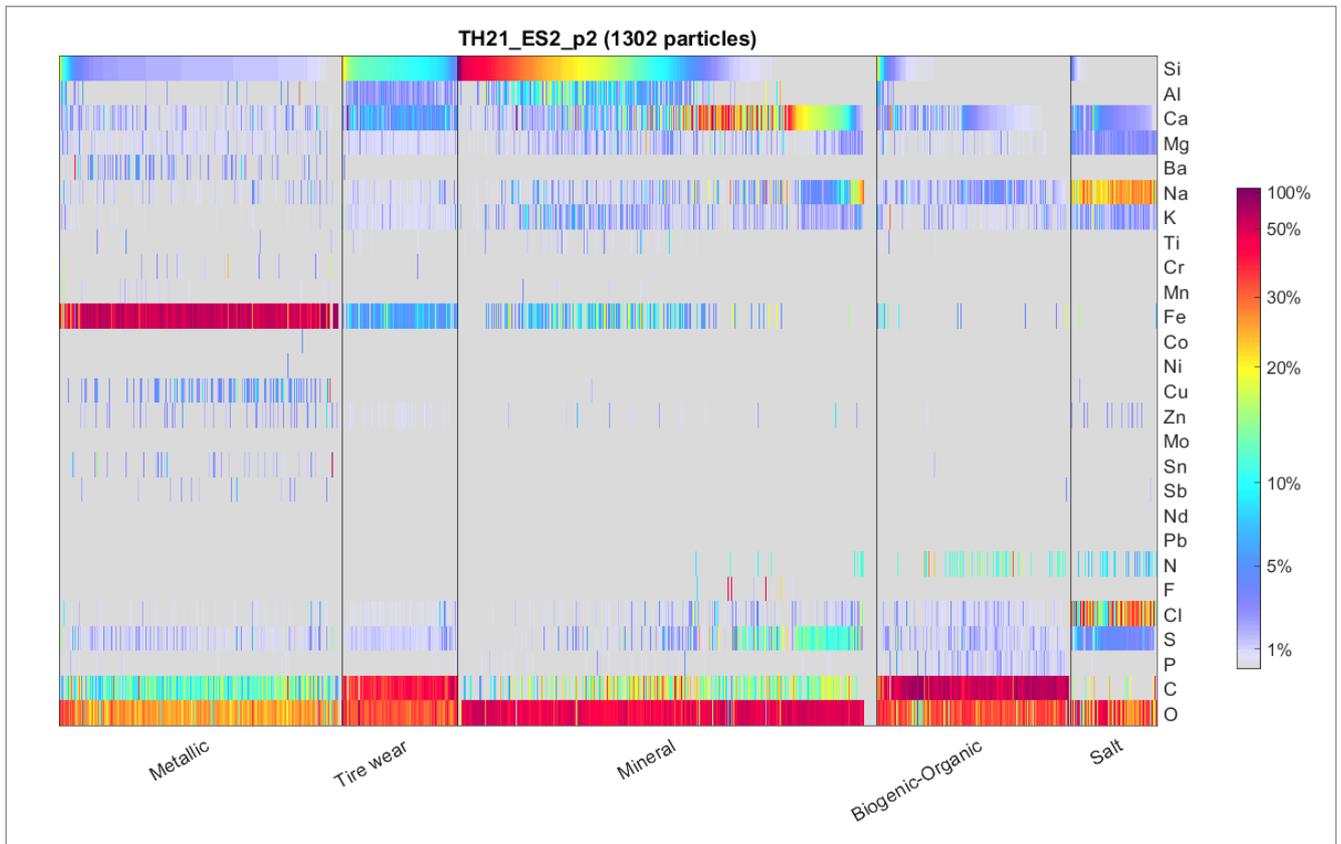


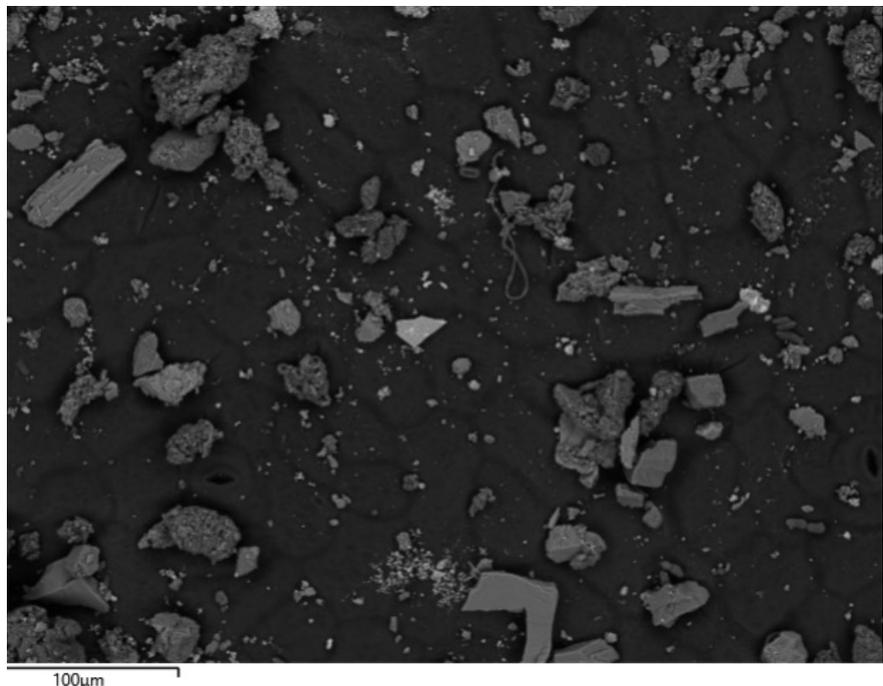
Abbildung 100: Graphische Darstellung (Heatmap) der chemischen Zusammensetzung von ES1 im Zeitraum vom 06.06.2021 bis 25.07.2021. Die Partikel sind nach morpho-chemischen Gruppen zugeordnet; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.

6.2.3 Betrachtung von Blattoberflächen in gewaschenem und ungewaschenem Zustand

Bei der Durchführung der morpho-chemischen Untersuchungen im Partikellabor in Fribourg (CH) wurden neben der Analyse der Substrate auch Blattoberflächen untersucht. Dabei wurden Ausschnitte der Blattoberflächen von *Geranium macrorrhizum* 'Spessart' und *Bergenia Hybr.* 'Baby Doll' unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht und die Partikelanhaftung dokumentiert. Partikel haften in unterschiedlichen Größenfraktionen an den Blattoberflächen (Abbildung 101 und 103). Beide untersuchten Pflanzenarten weisen sehr hohe Konzentrationen von adsorbierten Partikeln auf den Oberflächen auf. Dabei ist die Größenverteilung sehr ähnlich wie auf den Akzeptoroberflächen in den Sigma-2 Sammlern. In *Abbildung 103* wurde ein Partikel aufgrund seiner Morphologie

genauer betrachtet. Die chemische Zusammensetzung und die morphologische Gestalt als Kugel deuten auf ein thermisch geformtes Bremspartikel hin, das sich bei hoher Hitzeeinwirkung im Bremsvorgang bildet. Das Diagramm zeigt die Zusammensetzung des Partikels (*Abbildung 102*). Deutlich erkennbar sind der hohe Eisengehalt (Fe) in Verbindung mit Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O).

Abbildung 101: Hochauflösende REM-Aufnahme der Blattoberfläche von *Bergenia cordifolia* 'Baby Doll', vor dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken, Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt; Maßstab = 100 µm.



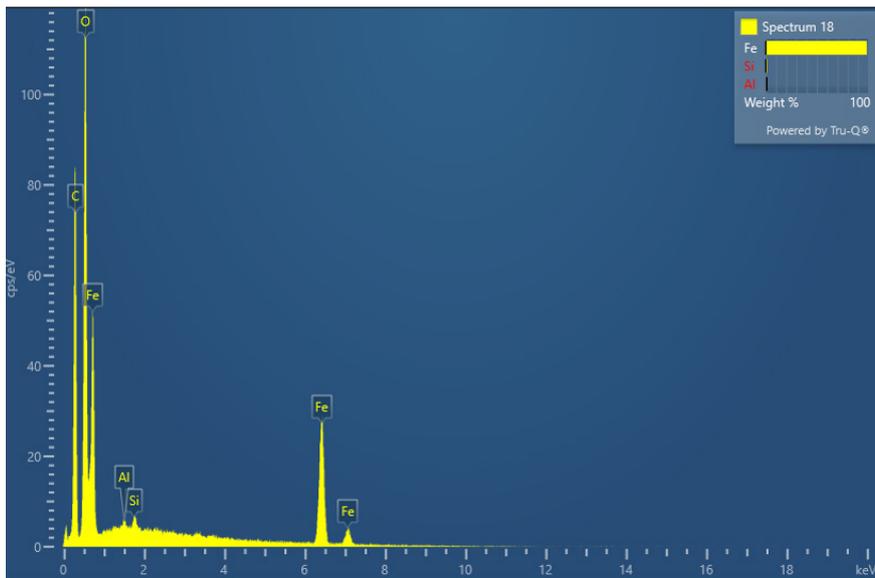


Abbildung 102: Einzelpartikelanalyse eines thermisch geformten Bremspartikels. Hauptbestandteile sind Eisen, Kohlenstoff und Sauerstoff.

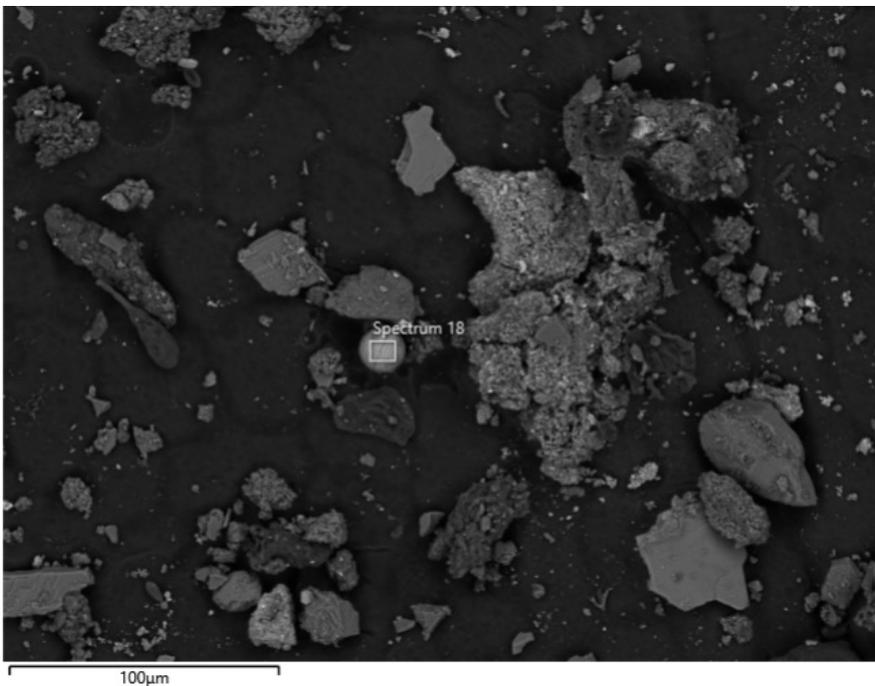


Abbildung 103: Hochauflösende REM-Aufnahme der Blattoberfläche von *Geranium macrorrhizum* 'Baby Doll' vor dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken, Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt. Partikelanalyse eines thermisch geformten Bremspartikels; Maßstab = 100µg.

Neben der Untersuchung ungewaschener Blattoberflächen im Rasterelektronenmikroskop, wurden auch Blattproben von *Bergenia Hybr. 'Baby Doll'* im Ultraschallbecken gewaschen. Das Waschen simuliert die Einwirkung von Wasser (insbesondere Regenwasser), um festzustellen, ob dies Einfluss auf die Partikelanhaftung der Blattoberflächen hat. Nach dem Waschvorgang wurden die Blattoberflächen getrocknet und im *Auto Carbon Coater* mit einer Kohlenstoffschicht überzogen. Anschließend erfolgte die erneute Untersuchung im Rasterelektronenmi-

kroskop. *Abbildung 104 und 105* zeigen, dass auch nach dem Waschvorgang ein Großteil der feinen Partikel mit einem Durchmesser von bis zu $2,5\ \mu\text{g}$ auf den Blattoberflächen anhaftet. Je nach Aufbau und Struktur der Pflanzen, können Partikel an den Blattoberflächen dauerhaft gebunden werden. Ein Teil der Partikel gelangt in die Blattöffnungen und kann einen Einfluss auf die Blattatmung ausüben. Ebenfalls ersichtlich ist, dass Blattstrukturen wie Vertiefungen oder Blatthaare sich positiv auf die Partikelbindung auswirken, da sich vermehrt Partikelagglomerate bilden.

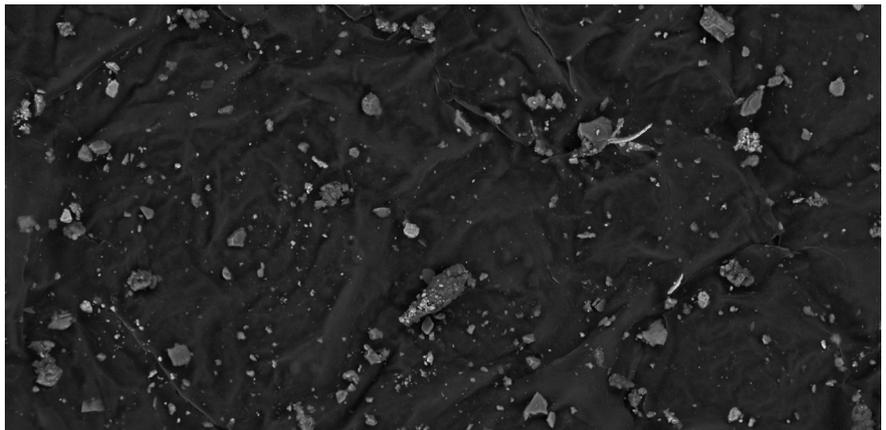


Abbildung 104: Hochauflösende REM-Aufnahme der Blattoberfläche einer Bergenia cordifolia 'Baby Doll', nach dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken, Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt (ohne Maßstab).

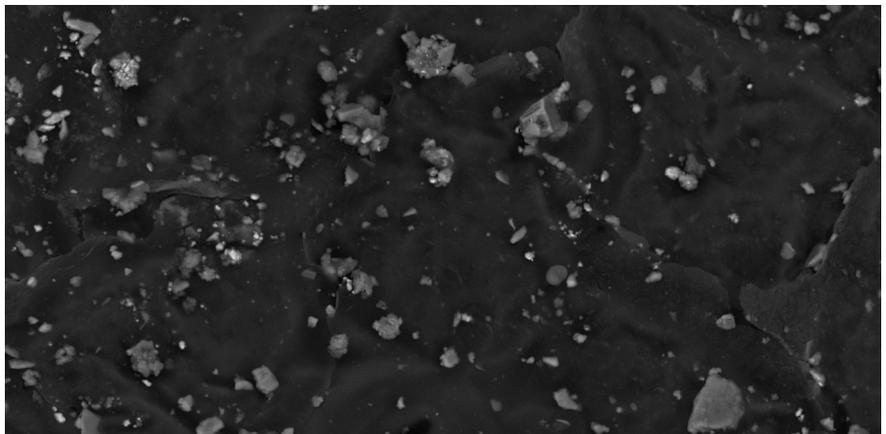


Abbildung 105: Hochauflösende REM-Aufnahme der Blattoberfläche einer Bergenia cordifolia 'Baby Doll', nach dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken, Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt (ohne Maßstab).

6.3 Vitalitätsmessung der ausgewählten Vegetationssysteme

In den folgenden Abschnitten werden die Untersuchungen zur Vitalität der Begrünungen im Citytunnel beschrieben. Zum Vergleich wurden Fotos der unterschiedlichen Teilbereiche, sowohl für die beiden Bauweisen mit Stauden als auch für die Moose, zu gleichen Zeiten aufgenommen und anschließend der prozentuale Anteil

des Deckungsgrads ausgewertet. Bei den Moosen wurde, wie in *Kapitel 3.3.2* beschrieben, die *Cranked-Wires-Methode* zur Wachstumsmessung der Triebe eingesetzt. Zusätzlich erfolgte eine Untersuchung der Flächen auf Fremdbewuchs und den Befall mit Schädlingen.

6.3.1 Vitalitätsuntersuchung der flächigen und modularen Bauweise mit Stauden

Im Citytunnel Darmstadt wurde die Vitalität von Stauden und Gräsern auf einer Fläche von jeweils 16 m² an zwei wandgebundenen Vegetationsflächen über eine Vegetationsperiode ausgewertet. Eine Vegetationsfläche wurde mit einem Textil-Substrat-System ausgeführt, die andere mit einem Gabionen-Substrat-System. Bei der Auswertung wurde der prozentuale Deckungsgrad rechnerisch ermittelt und die ausgefallenen Pflanzen gezählt. Zusätzlich wurden Beobachtungen zu Fremdbewuchs und Schädlingsbefall dokumentiert. In *Tabelle 13, S.133* ist die Anzahl der ausgefallenen Pflanzen zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten dokumentiert. Hinsichtlich der Anzahl der eingesetzten Pflanzen ist ein deutlicher Unterschied gegenüber der Erstpflanzung ersichtlich.

Während in der flächigen Bauweise 25 Pflanzen pro Quadratmeter eingesetzt wurden, startet der Besatz bei der modularen Bauweise mit insgesamt 45 Pflanzen pro Quadratmeter. Damit wurden in der modularen Bauweise 80 % mehr Pflanzen eingesetzt als in der flächigen Bauweise. Bereits 128 Tage nach der Erstbepflanzung ist ein deutlicher Unterschied der beiden Systeme hinsichtlich des Pflanzenausfalls erkennbar.

Bei der flächigen Bauweise kam es im Betrachtungszeitraum zu einem Ausfall von 6 %, hingegen sind in der modularen Bauweise etwa 22 % der

eingesetzten Pflanzen ausgefallen. In den weiteren Zeiträumen setzt sich der prozentuale Ausfall bei der modularen Fläche fort, bis zum Zeitpunkt der Nachpflanzung am 27. Juli 2021 sind dort etwa 63 % der eingesetzten Pflanzen ausgefallen. Bei der flächigen Bauweise kam es im gleichen Zeitraum nur zu einem Ausfall von 15 %.

Da einzelne Stauden flächenmäßig eine bis zu zwölffache Größe innerhalb einer Vegetationsperiode erreichten, wurden bei der Nachpflanzung in der modularen Bauweise 168 Stauden nachgepflanzt.

Wie in *Abbildung 104, S.134* zu erkennen ist, hat sich der Deckungsgrad in der flächigen Bauweise von der ersten Aufnahme am 28. April 2021 bis zum 27. Juli 2021 von ursprünglich 69 % zu 84 % nach der Nachpflanzung entwickelt. Insgesamt zeigen die Pflanzen in der flächigen Bauweise ein schnelles Wachstum verbunden mit einer hohen Vitalität, jedoch kein vollflächiges dichtes Pflanzbild. Insbesondere im oberen und unteren Bereich gibt es einzelne Flächen, die durch das Wuchsverhalten der eingesetzten Stauden nicht vollflächig begrünt werden können. Im mittleren Bereich fällt insbesondere das starke Wachstum der *Heuchera villosa* var. *macrorrhiza* auf. Sie bildet besonders kräftige und lang ausgebildete Blattstiele. Durch das Wachstum zum Licht hin verdeckt sie einen Teil der darunter liegenden Stauden, deren

Wachstum aus diesem Grund eingeschränkt ist (z.B. *Geranium macrorrhizum* 'Spessart' und *Bergenia Hybr.* 'Baby Doll'). Sowohl *Cymbalaria muralis*, als auch *Soleirolia soleirolii* haben an diesem Standort nicht oder nur eingeschränkt funktioniert.

Im Verlauf der Vegetationsperiode ist ersichtlich, dass sich trotz der vitalen Entwicklung der überwiegenden Arten kein gänzlich geschlossenes Pflanzbild ergibt.

In der modularen Bauweise hat der Deckungsgrad bereits kurz nach der Pflanzung abgenommen. Bei der ersten ausgewerteten Aufnahme am 28. April 2021 lag der Deckungsgrad bei 42 %, Tendenz abnehmend (Abbildung 106). Zum Zeitpunkt der Nachpflanzung haben die Stauden eine Flächendeckung von 26 % erreicht. Durch die Nachpflanzung konnten wieder 69 % der Flächen begrünt werden. Um den Pflanzendruck zu verringern, wurden bei der Pflege nicht alle ausgefallenen Pflanzen ausgetauscht. Bis zum Jahresende 2021 konnte jedoch kein stabiler Vegetationszustand hergestellt werden, sodass bei der letzten Auswertung im Januar 2022 lediglich ein Deckungsgrad von 19 % erreicht wurde. Ein Grund für den schlechten Vegetationszustand seit Beginn der Untersuchungen liegt vermutlich in der ungleichmäßigen Wasserverteilung in den substratgefüllten Gabionen. An einigen Stellen wurde eine Überbewässerung mit eintretender Wurzelfäulnis festgestellt. Andere Bereiche wurden nicht mit Wasser versorgt. Ein Schema der ungleichen Wasserverteilung war

nicht zu erkennen. Um die Wasserverteilung im System auszugleichen, wurde zum Zeitpunkt der Pflege am 28. Juli 2021 ein Benetzungsmittel (H₂Gro) eingesetzt. Dieses Mittel sorgt für eine Wiederbenetzung des gesamten Substratkörpers und eine gleichmäßige Wasserverteilung. Mit dem Benetzungsmittel konnten dennoch nur vereinzelt Erfolge erzielt werden. Der schlechte Vitalitätszustand der Pflanzen machte sich auch im Auftreten von Schädlingsbefall mit Blattläusen bemerkbar. Der Schädlingsbefall wurde erstmalig an einzelnen Exemplaren von *Euphorbia polychroma* 'Purpurea' sichtbar. Von der Ausbreitung der Schädlinge waren auch einzelne Pflanzen im unteren Bereich der flächigen Bauweise betroffen. Um dem Befall entgegenzuwirken, wurden Marienkäferlarven und Florfliegenlarven als Nützlinge ausgebracht. Der Schädlingsbefall in der flächigen Bauweise konnte damit gänzlich bekämpft werden. Bei der modularen Bauweise wurde der Befall begrenzt. Ein weiterer Faktor für den eingeschränkten Vitalitätszustand der modularen Fläche kann die andere Artenzusammensetzung an dem Extremstandort sein. Die Bedingungen eines dauerhaften Luftstroms aus dem Tunnelportal, in Kombination mit der künstlichen Beleuchtung, sind Stressfaktoren für die Begrünung. Des Weiteren hat sich herausgestellt, dass die Pflanzenauswahl für das modulare System im Ganzen weniger gut geeignet war. Beim Pflegegang wurden einzelne starkwüchsige Arten wie *Heuchera villosa* var. *macrorrhiza* in das modulare System eingesetzt. Dort zeigten diese Arten ein weniger starkes, jedoch vitales Wachstum.

Aufnahme:	Datum:	Zeit seit Installation der jeweiligen Flächen:	Anzahl ausgefallener Pflanzen (flächig):	Anzahl ausgefallener Pflanzen (modular):
<i>Installation</i>	11.12.2020		<i>Gesamtbesatz bei Installation: 400 Pflanzen</i>	<i>720 Pflanzen bei Installation eingesetzt</i>
01	28.04.2021	128 Tage	23 Pflanzen ausgefallen	160 Pflanzen ausgefallen
02	30.06.2021	201 Tage	25 Pflanzen ausgefallen	Weitere 187 Pflanzen ausgefallen
03	27.07.2021	228 Tage	10 Pflanzen ausgefallen (Nachpflanzung von insgesamt 58 Pflanzen)	Weitere 110 Pflanzen ausgefallen – Stand: 263 (Nachpflanzung von insgesamt 168 Pflanzen) → Gesamtbesatz: 431 Pflanzen
04	09.09.2021	272 Tage	8 Pflanzen ausgefallen	35 Pflanzen ausgefallen
05	10.11.2021	334 Tage	5 Pflanzen ausgefallen	Weitere 76 Pflanzen ausgefallen
06	26.01.2022	411 Tage	7 Pflanzen ausgefallen → Gesamtbesatz: 380 Pflanzen	Weitere 42 Pflanzen ausgefallen → Gesamtbesatz: 110 Pflanzen

Tabelle 13: Gegenüberstellung der ausgefallenen Pflanzen in der flächigen und modularen Bauweise.



System: Flächige Bauweise
Datum: 28.04.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: 69 %



System: Modulare Bauweise
Datum: 28.04.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: 42 %



System: Flächige Bauweise
Datum: 30.06.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: 82 %



System: Modulare Bauweise
Datum: 30.06.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: 28 %



System: Flächige Bauweise
Datum: 27.07.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: vor Pflanzung: 80 %; nach Pflanzung: 84 %



System: Modulare Bauweise
Datum: 27.07.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: vor Pflanzung: 26 %; nach Pflanzung: 69 %

Abbildung 106: Gegenüberstellung der Vitalitätsauswertung durch Flächenanalyse des Deckungsgrads bei Begrünung mit Stauden.



System: Flächige Bauweise
Datum: 09.09.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: 82 %



System: Modulare Bauweise
Datum: 09.09.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: 57 %



System: Flächige Bauweise
Datum: 10.11.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: 77 %



System: Modulare Bauweise
Datum: 10.11.2021
Vitalität/ Deckungsgrad: 51 %



System: Flächige Bauweise
Datum: 26.01.2022
Vitalität/ Deckungsgrad: 76 %



System: Modulare Bauweise
Datum: 26.01.2022
Vitalität/ Deckungsgrad: 19 %

Abbildung 104 zeigt deutlich die Entwicklung des Deckungsgrads im Verlauf der Vegetationsperiode. Mit dem Pflegegang zum 28. Juli 2021 konnte ein nahezu gleicher Deckungsgrad erzeugt werden. Im Verlauf der folgenden Monate hat der Deckungsgrad in beiden Systemen weiter abgenommen. Nach der FLL-Fassadenbegrünungsrichtlinie und in Anlehnung an DIN 18916 kann ein abnahmefähiger Zustand für wandgebundene Fassadenbegrünungen bestimmt werden. Neben einer festen Verwurzelung der Einzelpflanzen müssen der vertraglich vereinbarte Artenbestand und dessen anteiliger Deckungsgrad vorhanden sein. Die Gesamtdeckung muss dabei

dem Begrünungsziel entsprechen. Bei Auszählungen werden bis zu 5 % der Gesamtstückzahl nicht berücksichtigt [FLL 2018, S. 150].

In der flächigen Bauweise wurde der abnahmefähige Zustand nach der Frostperiode erreicht. Bei der modularen Bauweise ist zu keinem Zeitpunkt des Untersuchungszeitraums ein abnahmefähiger Zustand erreicht worden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Vegetationsflächen im Citytunnel um einen Modellversuch handelt. Die Risiken bezüglich Pflanzenvitalität und optischem Erscheinungsbild wurden im Vorfeld mit dem Auftraggeber besprochen.

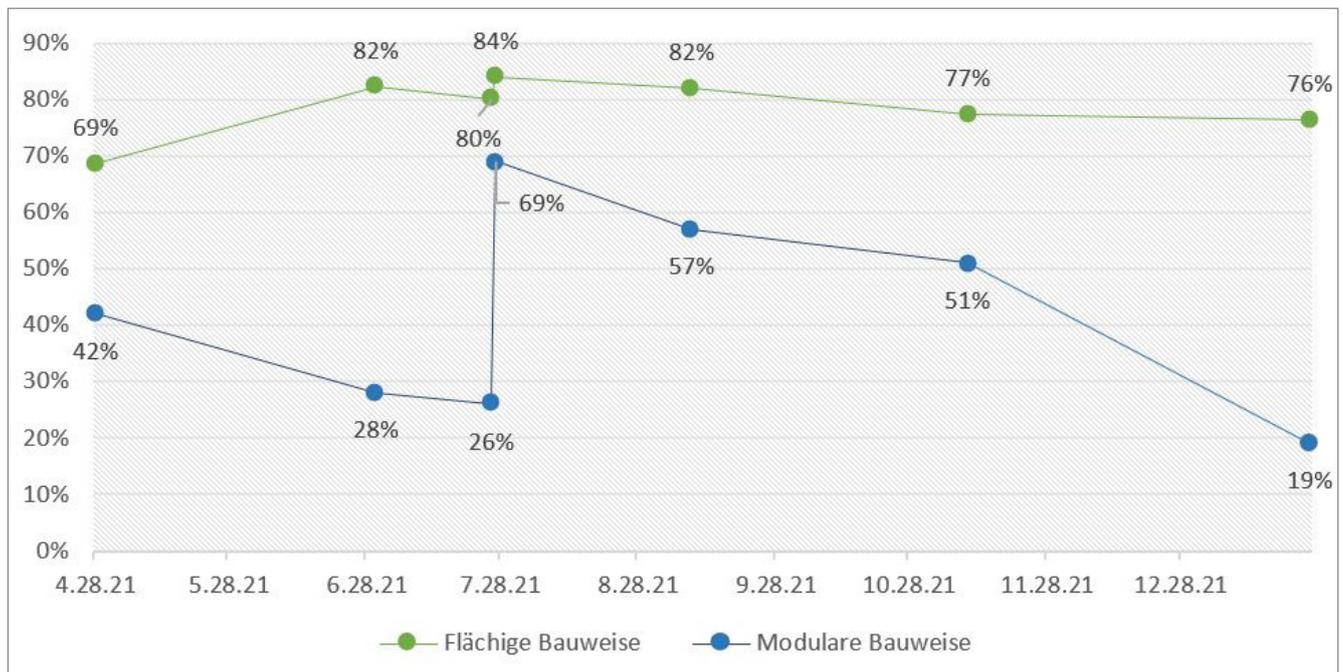


Abbildung 107: Pflanzendeckungsgrad der beiden Vegetationsflächen mit Stauden über eine Vegetationsperiode im Citytunnel Darmstadt.

Bei der Bewertung der einzelnen Pflanzen wurde ein Boniturschlüssel gemäß einer Untersuchung der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau [Eppel/Schönfeld 2014,

S. 13] verwendet. Hierzu wurden die verwendeten Stauden hinsichtlich ihres Erscheinungsbildes in eine der folgenden fünf Kategorien eingestuft.

Boniturschlüssel	
1	Pflanzen abgestorben
3	Pflanzen kümmernd
5	Pflanzen vital
7	Pflanzen wüchsig
9	Pflanzen üppig

Tabelle 14: Boniturschlüssel zur Bewertung der wandgebundenen Begrünungen im Citytunnel Darmstadt.

Bepflanzung modulare Bauweise	
Pflanzenart:	Bewertung:
Ajuga reptans	1
Carex morrowii 'Ice Dance'	1
Cotoneaster dammeri 'Radicans'	5
Euonymus fortunei 'Emerald Gaiety'	3
Euphorbia polychroma 'purpurea'	1
Jasminum nudiflorum	5
Lonicera nitida	3
Waldsteinia ternata	1

Tabelle 15: Bewertung der Pflanzen in der modularen Bauweise mit Boniturschlüssel.

Bepflanzung flächige Bauweise	
Pflanzenart:	Bewertung:
Aruncus dioicus	1
Bergenia Hybr. 'Oeschberg'	5
Bergenia Hybr. 'Baby Doll'	5
Brunnera macrophylla	3
Blechnum spicant	1
Cymbalaria muralis	3
Carex morowii 'Ice Dance'	3
Epimedium x rubrum 'Galadriel'	5
Geranium macrorrhizum 'Spessart'	7
Heuchera Hybr. 'Obsidian'	5
Heuchera Hybr. 'Paris'	7
Heuchera villosa var. macrorrhiza	9
Hemerocallis minor	3
Luzula sylvatica 'Auslese'	3
Phyllitis scolopendrium (syn. Asplenium s.)	1
Polystichum setiferum 'Proliferum'	5
Soleirolia soleirolii	1
Waldsteinia geoides	3

Tabelle 16: Bewertung der Pflanzen in der flächigen Bauweise mit Boniturschlüssel.



Wie auf *Abbildung 108* zu erkennen ist, entwickeln sich die Stauden unter der Beleuchtungseinrichtung im flächigen System gut. Acht der eingesetzten 18 Pflanzenarten zeigen ein vitales bis üppiges Wuchsbild, eine vitale Blattfärbung und ausgeprägten Neuaustrieb (*Tabelle 16*). Da die Pflanzenauswahl nicht mit der jeweiligen Anzahl korreliert, ist der Gesamteindruck der flächigen Bauweise vital. Pflanzen mit einer besonderen Wuchsstärke und Stresstoleranz wurden häufiger verwendet. In der modularen Bauweise konnten von den eingesetzten Pflanzenarten lediglich die beiden Zwergsträucher *Cotoneaster dammeri* ‚*Radicans*‘ und *Jasminum nudiflorum* überzeugen. Die eingesetzten Stauden zeigten Kümmerwuchs oder sind abgestorben.

Die Bildung von starken Jungtrieben ist bei allen *Bergenia*- und *Heuchera*-Arten in der flächigen Bauweise zu erkennen (*Abbildung 110*). Die Beeinträchtigung der Pflanzenversorgung im flächigen System ist ein Stressfaktor, der die Vitalität der Pflanzen sichtbar beeinträchtigt. Gestresste Pflanzen sind häufig anfälliger für Schädlinge. In *Abbildung 111 und 112* ist der starke Befall mit Blattläusen sichtbar. Grüne Läuse zeigen dabei die vitalen Insekten. Die weißen Hüllen sind Häutungen der Jungtiere. Blattläuse wurden im modularen System ab Juli 2021 an allen Pflanzenarten, außer *Euonymus*, *Carex* und *Cotoneaster* festgestellt.

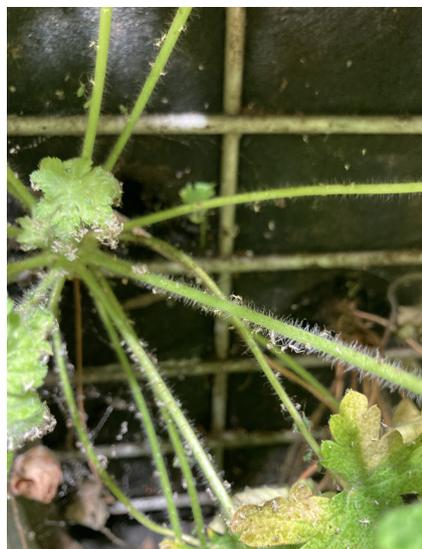


Abbildung 108 (links oben): Perspektive der Zeitrasterkamera. Stauden zeigen eine gesunde Blattfärbung und eine gute Entwicklung unter den Beleuchtungsbedingungen im Citytunnel. *Abbildung 109* (links Mitte): Entwicklung von *Heuchera villosa* var. *macrorrhiza* und gleichzeitige Verschattung der unteren Bereiche durch ausgeprägte Triebbildung.

Abbildung 110 (links unten): Starke Jungtriebbildung bei *Heuchera sanguinea* ‚Paris‘.

Abbildung 111 (rechts oben): Die Ausscheidungen der Blattläuse (Honigtau) ist auf einigen Blattoberseiten deutlich erkennbar. Durch die klebrige Oberfläche haften mehr Partikel an der Oberfläche, was zu einer sichtbaren Belegung der Blätter führt.

Abbildung 112 (rechts unten): Junge Blattläuse häuten sich während ihrer Wachstumsphase mehrfach. Die weißen Häute haften an den Blattstielen und Blättern an.



6.3.2 Vitalitätsuntersuchung der Moosflächen

Neben den wandgebundenen Begrünungsbauweisen mit Stauden wurden zwei Flächen mit Moos auf die Vitalität und die Zustandsentwicklung hin untersucht. Moose können aufgrund ihrer Nährstoffaufnahme an der Blattoberfläche und der Bindung von Luftschadstoffen durch Ionenaustausch eine Feinstaubreduzierung erzeugen [Frahm 2007, S. 152f.]. Aufgrund der hohen Grundbelastung mit Feinstäuben im Citytunnel sollten die installierten Moosflächen zu einer Reduzierung der Luftschadstoffbelastungen beitragen. Wie anhand *Abbildung 114* dargestellt, sind die Moosflächen in zwei Bereiche aufgeteilt. Auf der linken Seite werden die vier Paneele horizontal geteilt. Im oberen Bereich wurden Platten mit einer Titandioxidbeschichtung installiert. Im unteren Bereich wurden zu Beginn der

Untersuchungen vier *Hypnum*-Moosmatten eingesetzt. Auf der rechten Seite wurden die Paneele vollflächig mit Moosmatten bestückt. Die schräge Anordnung (*Abbildung 113*) wurde aufgrund der besseren Wasserverteilung vorgenommen und resultiert aus den Ergebnissen der Pilotstudie Mooswand Stuttgart [Vogt 2018, S. 42]. Die Untersuchungen zur Vitalität basieren auf der Annahme, dass braune Bereiche nicht vital sind und an diesen Stellen kein Stoffaustausch an der Oberfläche der Moose stattfindet [Vogt 2018, S. 33]. Braune Oberflächen können sowohl auf abgestorbene Moosoberflächen hindeuten, beispielsweise aufgrund von Fäulnisprozessen, als auch auf Flächen, die nur temporär trockengefallen sind und sich dadurch in einem inaktiven Zustand befinden.



*Abbildung 113 (oben): Seitliche Aufnahme der Moosbegrünung im Citytunnel Darmstadt. Abbildung 114 (unten): Aufnahme der Moosflächen im Citytunnel Darmstadt am 10. November 2021; im oberen Bereich befinden sich *Hypnum*-Moosmatten, im unteren Bereich wurden *Racomitrium*-Moosmatten installiert.*





System: Hypnum komplett
Datum: 28.04.2021
Deckungsgrad: 38 %



System: Hypnum komplett
Datum: 28.04.2021
Deckungsgrad: 93 %



System: Hypnum komplett
Datum: 30.06.2021
Deckungsgrad: 33 %



System: Hypnum komplett
Datum: 30.06.2021
Deckungsgrad: 81 %

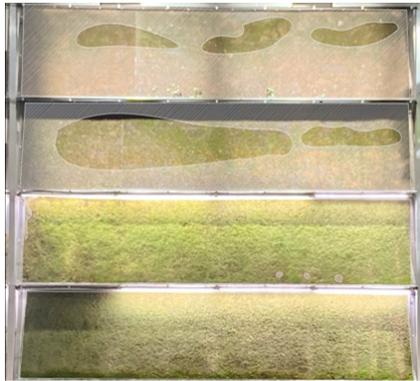


System: Hypnum oben, Racomitrium unten
Datum: 27.07.2021
Deckungsgrad: Hypnum: 51 %; Racomitrium: 100 %



System: Hypnum oben, Racomitrium unten
Datum: 27.07.2021
Deckungsgrad: Hypnum: 84 %; Racomitrium: 99 %

Abbildung 115: Gegenüberstellung der Vitalitätsauswertung durch Flächenanalyse des Deckungsgrads bei Begrünung mit Moosen.



System: Hypnum oben, Racomitrium unten
Datum: 09.09.2021
Deckungsgrad: Hypnum: 25 %; Racomitrium: 100 %



System: Hypnum oben, Racomitrium unten
Datum: 09.09.2021
Deckungsgrad: Hypnum: 76 %; Racomitrium: 84 %



System: Hypnum oben, Racomitrium unten
Datum: 10.11.2021
Deckungsgrad: Hypnum: 56 %; Racomitrium: 84 %



System: Hypnum oben, Racomitrium unten
Datum: 10.11.2021
Deckungsgrad: Hypnum: 57 %; Racomitrium: 77 %



System: Hypnum oben, Racomitrium unten
Datum: 26.01.2022
Deckungsgrad: Hypnum: 83 %; Racomitrium: 86 %



System: Hypnum oben, Racomitrium unten
Datum: 26.01.2022
Deckungsgrad: Hypnum: 68 %; Racomitrium: 84 %



Im Laufe der Vegetationsperiode haben sich die Moosoberflächen sehr unterschiedlich entwickelt. Zum Zeitpunkt der Montage wurden alle Bereiche mit *Hypnum*-Moosmatten ausgestattet. Zum Zeitpunkt der ersten Aufnahme am 28. April 2021 waren bereits große Teile der vielflächig mit *Hypnum* begrünter Fläche inaktiv und zeigten eine braune Färbung der Blattoberflächen. Bei den unteren drei Paneelen waren die mittleren Bereiche vital gewesen. Auf den halbflächig begrünter Paneelen waren einzelne Bereiche nicht vital, jedoch waren die Moosmatten in einem besseren Gesamtzustand. Zum Zeitpunkt der zweiten Aufnahme am 30. Juni 2021 hat der Vitalitätszustand der *Hypnum*-Moosmatten weiter abgenommen. Bei den vollflächigen Paneelen betrug der vitale Flächenanteil etwa 33 %, bei den halbierten Moosflächen wurde eine Vitalität von 81 % festgestellt. Die Inaktivität größerer Moosflächen wurde auf eine zu geringe Wasserversorgung zurückgeführt. Daraufhin wurden die Bewässerungszeiten in den Intervallen um etwa 30 % erhöht. In den Beobachtungen nach den Anpassungen der Bewässerung wurde eine vollflächige Benetzung der Oberfläche erzeugt. Die bessere Gesamtverteilung des Wassers auf der Moosoberfläche führte zu einer sichtbaren Vitalitätsverbesserung zum Zeitpunkt der dritten Aufnahme, am 27. Juli 2021.



Abbildung 116 (oben): Bildung von Fäulnisprozessen aufgrund von Überbewässerung im unteren Bereich.

Abbildung 117 (Mitte): Beleuchtungseinrichtung der Moosflächen im verschatteten Bereich und Bewässerung mit Sprühregnern.

Abbildung 118 (unten): Streifenförmiges Bild aufgrund von ungleichmäßiger Bewässerung.

Zur besseren Einschätzung der Moosentwicklung am Standort wurde ein Teil der Moosmatten Ende Juli gegen eine weitere Moosart ausgewechselt. Dazu wurden 50 % der Flächen von *Hypnum*-Moosmatten auf *Racomitrium*-Moosmatten umgestellt. Der Vitalitätszustand der *Racomitrium*-Moosmatten konnte zwischen dem 27. Juli 2021 und dem 9. September 2021 erhalten werden. Der Zustand der *Hypnum*-Moosmatten hat sich erneut von 51 % auf 33 % vitaler Fläche verschlechtert. In den Aufnahmen im November und Januar ist die Zunahme der Triebblängen und damit ein Zuwachs von *Racomitrium* erkennbar. Gleichzeitig hat sich im unteren Bereich vermutlich als Folge einer leichten Überbewässerung Fäulnis gebildet, was zum Absterben einzelner Bereiche führte (Abbildung 116). Insgesamt zeigen die Bilder, dass die Auswertung jeweils nur Momentaufnahmen darstellen. Durch Temperatur- und Wasserveränderungen können einzelne Moosbereiche kurzzeitig trockenfallen und sich dadurch in ihrem äußeren Erscheinungsbild rasch verändern. Die trockenen Bereiche der *Hypnum*-Moosmatten zeigen einen physiologisch inaktiven Zustand, sodass bei einem Großteil dieser Flächen kein starkes Wachstum zu erwarten war.

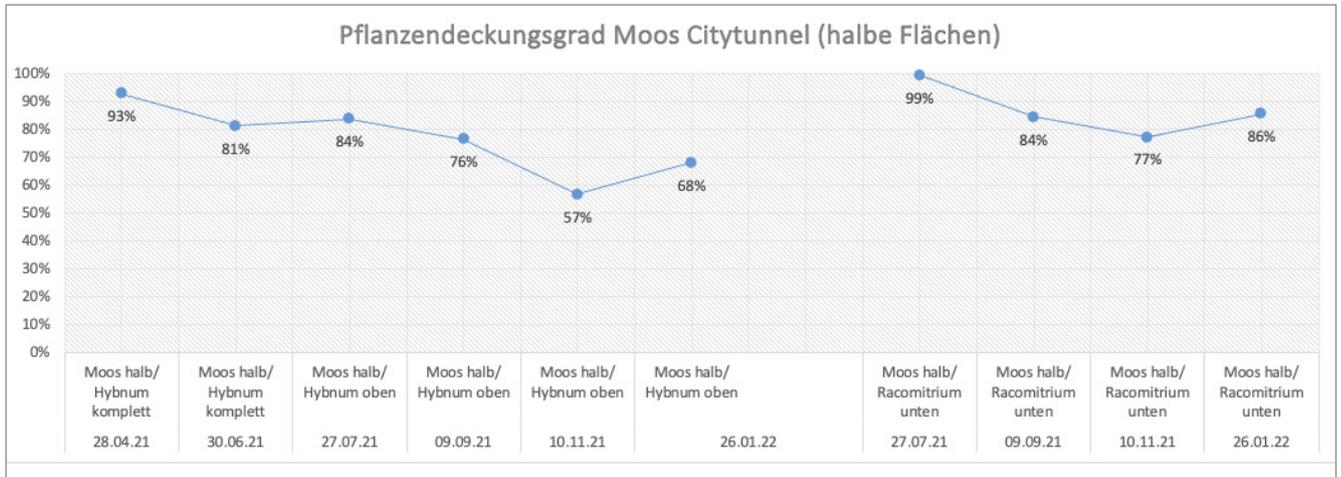


Abbildung 119: Pflanzendeckungsgrad der beiden Vegetationsflächen mit Moosen (halbe Flächen) über eine Vegetationsperiode im Citytunnel Darmstadt.

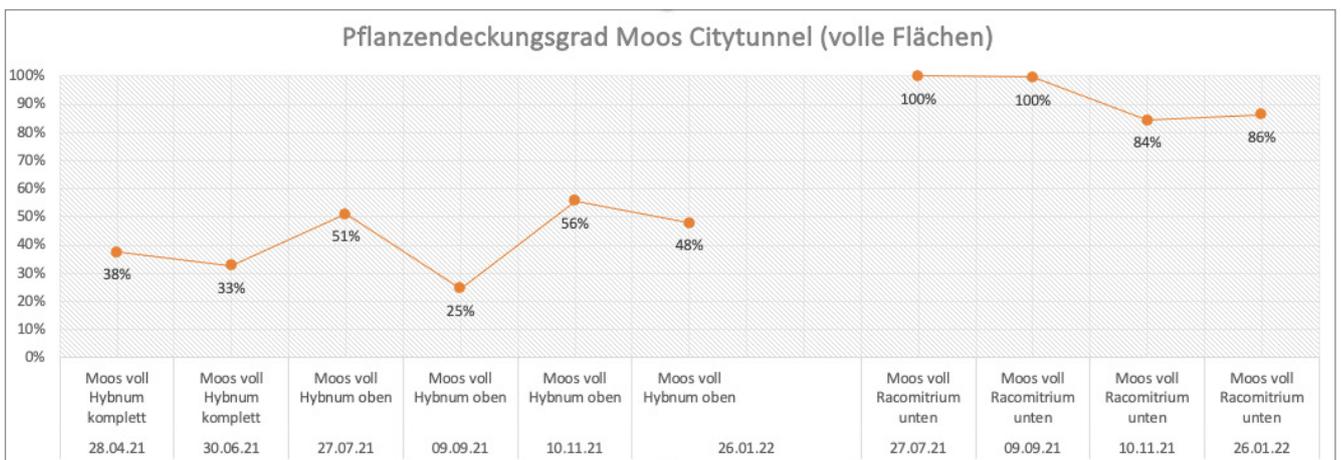


Abbildung 120: Pflanzendeckungsgrad der beiden Vegetationsflächen mit Moosen (volle Flächen) über eine Vegetationsperiode im Citytunnel Darmstadt.



Abbildung 121 (oben): Aufnahme eines Triebes von *Racomitrium canescens*.
Abbildung 122 (unten): Aufnahme einer Triebspitze von *Racomitrium canescens*.

Mit der *Cranked-Wires*-Methode wurde die Länge der Triebspitzen im Untersuchungszeitraum festgehalten. Somit konnte an drei Messpunkten nach dem Austausch der Moosmatten von *Hypnum* auf *Racomitrium* ein Zuwachs festgestellt werden. Die Vitalität der *Racomitrium*-Flächen wurde in einem deutlichen Zuwachs von bis zu 10 mm in sechs Monaten ersichtlich. Bei den *Hypnum*-Flächen wurde lediglich an Standort 1 ein minimaler Zuwachs verzeichnet, was sich mit den Fotoaufnahmen im jahreszeitlichen Verlauf deckt. Die Moosflächen können nur Triebzuwachs erzeugen, wenn sie über einen ausreichend langen Zeitraum Photosynthese betreiben können [Thielen 2018, S. 17]. An den zwei Messstandorten CWM 4 und CWM 6 konnte keine Veränderung festgestellt werden.

Der Vitalitätszustand der Moosflächen war im Laufe des Untersuchungszeitraums insgesamt sehr verschieden, was auch durch die ungleiche Wasserversorgung bedingt wurde. Trotz einer Anpassung der Bewäs-

serungszeiten und einer Korrektur der Sprühdüsen konnte an einigen Stellen keine gleichmäßige Benetzung der Moosoberfläche erzeugt werden. Einzelne Düsen haben sich mit der Zeit zugesetzt, wodurch das Wasser dort ungleichmäßig abtropfte. An diesen Stellen hat sich durch die permanente Überbewässerung Fäulnis gebildet und ein Absterben der Moose verursachte (Abbildung 135).

Der schlechtere Zustand von *Hypnum cupressiforme* kann darauf zurückzuführen sein, dass die Moosart insgesamt schlechter auf zu hohe Stickstoffeinträge reagiert [Frahm 1998]. Wie anhand von Abbildung 121 zu erkennen ist, sind auf den Trieben von *Racomitrium canescens* Partikelablagerungen erkennbar. Die Triebspitzen zeigen zum Teil nekrotische Bereiche mit abgestorbenen, braunen Zellbereichen. In den Wintermonaten konnten auf einigen Triebspitzen Salzablagerungen festgestellt werden (Abbildung 122).

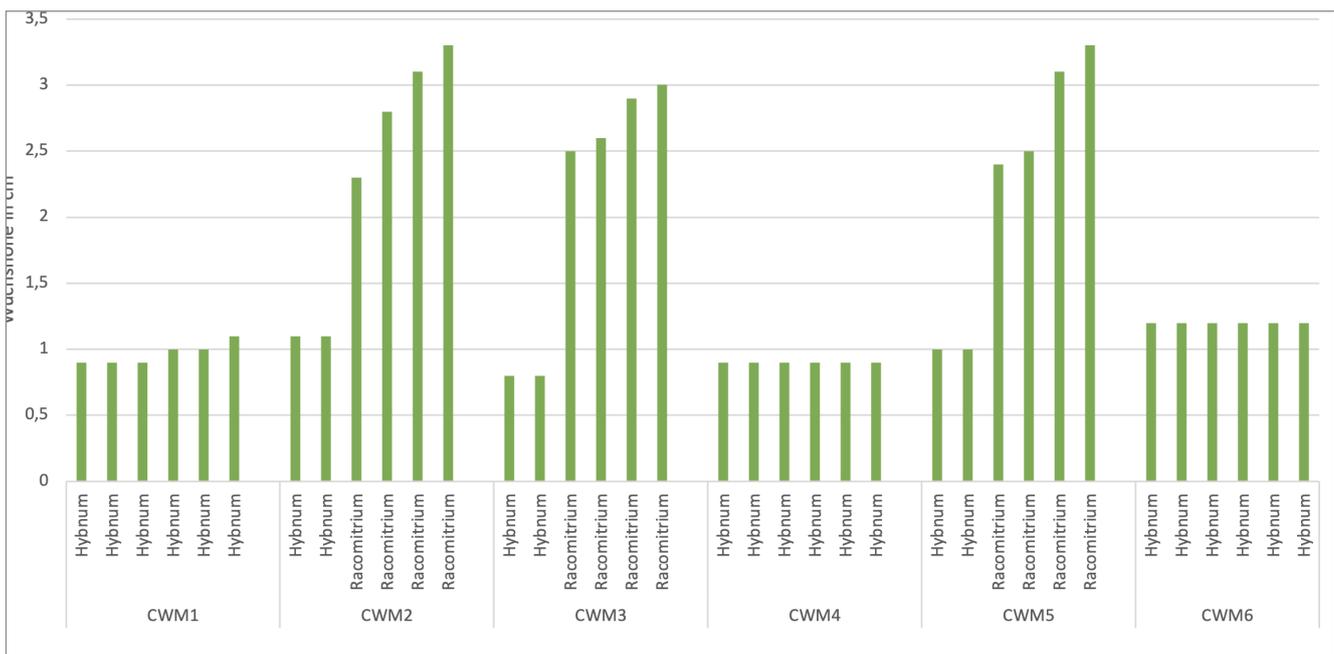


Abbildung 123: Messung der Wuchshöhe an den Messpunkten auf der Moosfläche nach der *Cranked-Wires*-Methode.

6.4 Ergebnisse Bestäubung von wandgebundenen Vegetationssystemen

Zur Differenzierung der unterschiedlichen Vegetationsträger bezüglich der Bindung von Feinstäuben wurden in einer Messkammer künstliche Bestäubungsversuche durchgeführt. Damit wurde das Ziel verfolgt, einen Unterschied in der Abscheidung von Partikeln über einen definierten Zeitraum zu erkennen. Ursprünglich sollten hierzu die Vegetationssysteme aus der Begrünung im Citytunnel Darmstadt baugleich verwendet werden. Aus Konstruktionsgründen wurde jedoch in der Durchführung auf die Verwendung der modularen Bauweise verzichtet. Neben einer *Racomitrium*-Moosmatte konnten auch das flächige Vegetationssystem von Vertiko sowie eine Sedum-Matte getestet werden.

Die Auswertung der Versuche ist in *Abbildung 124* zu sehen. Die untersuchten Vegetationsträger konnten die künstlich erzeugten hohen Konzentrationen deutlich schneller reduzieren. Aufgrund einer hohen Streuung in den Messergebnissen sind die aufgezeigten Konzentrationsverläufe nur als grobe

Annäherung zu deuten.

Nach der ersten Applikation von Feinstaub nahm die Konzentration von Feinstaub PM10 beim Versuch Moosmatte am schnellsten ab, gefolgt von Living Wall Vertiko, Sedum-Matte und Kammer leer.

Nach der Eingabe des zweiten Prüfstaubes ist bei dem Versuch Sedummatte der schnellste Konzentrationsminderung zu erkennen. Am Ende der Versuchsreihe haben sich alle Vegetationselemente auf eine Konzentration von etwa $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingestellt. Beim Versuch Kammer leer war nach der Versuchsreihe eine Konzentration von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu erkennen. Bei allen drei Versuchsdurchführungen wiesen die Vegetationselemente einen vergleichbaren Konzentrationsverlauf auf, wobei der stärkste Rückgang nicht eindeutig auf einen Vegetationstyp zurückgeführt werden konnte. Die leere Versuchskammer lag in den Untersuchungen im Konzentrationsrückgang immer ober der Vegetationselemente.

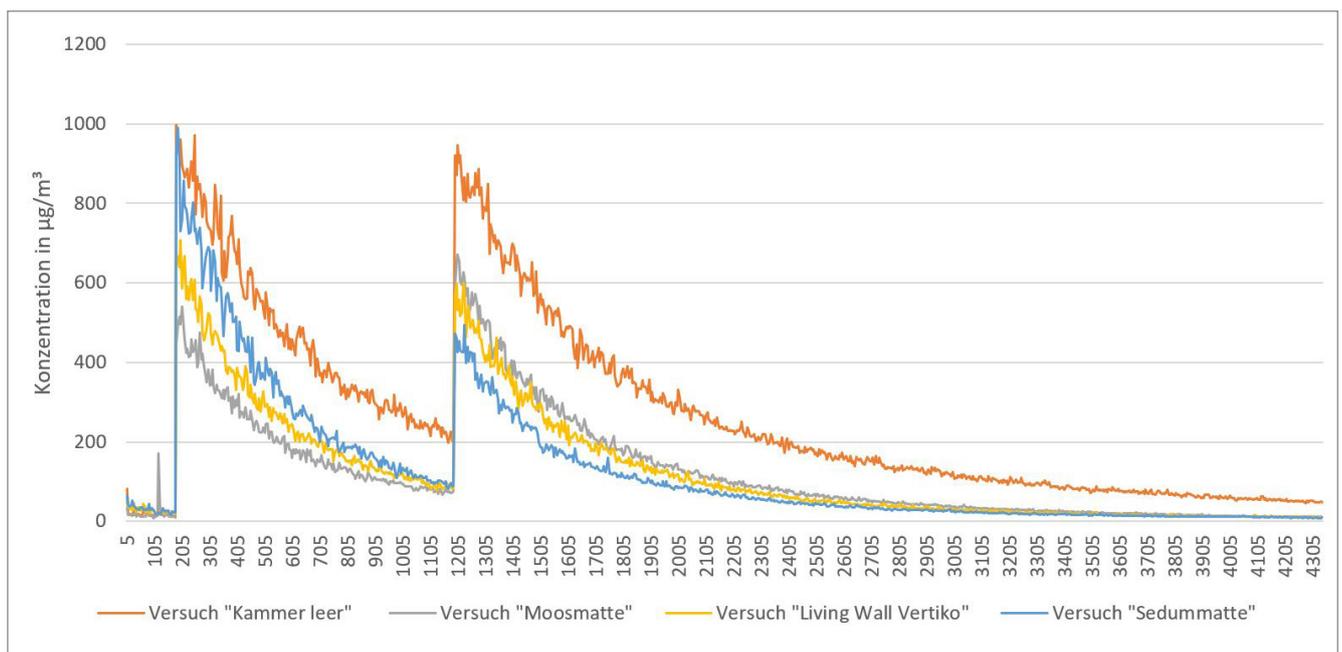


Abbildung 124: Vergleich der PM10-Konzentrationsverläufe über einen Messzeitraum von 90 Minuten mit den vier Prüfvorvarianten „Kammer leer“, „Moosmatte“, „Living Wall Vertiko“, und „Sedum-Matte“. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert.

6.5 Zusammenfassung



Abbildung 125: Übersicht der vier Begrünungsflächen im Citytunnel Darmstadt.

In dieser Forschungsarbeit wurden Vergleichsmessungen zwischen begrünten und unbegrünten Fassadenflächen über den Zeitraum einer Vegetationsperiode mit verschiedenen Messgeräten und Analyseverfahren durchgeführt. Um den Zeitraum einer Vegetationsperiode möglichst umfassend messtechnisch zu erfassen, wurden verschiedene Low-Tech und Echtzeitmessgeräte eingesetzt, die anerkannte Qualitätskriterien verschiedener DIN-Richtlinien und des TÜV erfüllen.

Standort Darmstadt

Mit 60,71 % relativer Feuchte lag die **Luftfeuchtigkeit** vor der Begrünung im Citytunnel im Durchschnitt um etwa 10 % über dem Wert an der Messstation in der Mitte des Citytunnels. Zwischen August 2021 und März 2022 lag die Temperatur vor der begrünten Fläche um etwa 1 °C unter dem Messwert im Citytunnel.

Die Untersuchung der **Stickoxidkonzentration** hat ergeben, dass die Messstelle im Tunnel etwa 22 % höhere Stickoxidwerte im Vergleich zur Messstelle vor der Begrünung aufgenommen hat.

Die Auswertung der **Feinstaubkonzentrationen von PM10** zeigt, dass die Werte der Messstation im Citytunnel um etwa 38 % und die der Messstationen am Eingangsportal um etwa 16 % im Jahresdurchschnitt über dem Wert der Begrünung lagen.

Die Messung der Konzentration von **Feinstaub PM2,5** offenbart, dass der Messwert im Tunnel 26 % und der Wert im Eingangsportal rund 20 % über dem Jahresdurchschnitt der Begrünung lag.

Metallische Partikel stellen die größte **Partikelgruppe** an allen Messstationen im Citytunnel dar. Im Feinstaub PM2,5 machen sie etwa 50 % aller Partikel aus.

Standort Essen

In Essen konnte eine erhöhte **Luftfeuchtigkeit** von im Durchschnitt etwa 4 % im Vergleich zur unbegrünten Fassade gemessen werden.

Dagegen konnte kein signifikanter Unterschied in der **Temperatur** zwischen begrünten und unbegrünten Flächen festgestellt werden.

Im Zeitraum zwischen Mai 2021 und Oktober 2021 lag die **Stickstoffdioxid-Konzentration** vor der Putzfassade im Durchschnitt um 18 % höher als am Messstandort vor der Begrünung.

Die **Feinstaub PM10**-Werte der Begrünung lagen im Jahresdurchschnitt 22 % unter den Werten der Putzfassade. Der Durchschnitt an Feinstaub PM2,5 lag vor der Begrünung etwa 25 % niedriger als vor der Putzfassade.

Die Analyse der **Partikelgruppen** in Essen zeigt ein differenziertes Bild. Die Probe vor der Putzfassade weist etwa doppelt so viele Partikel im Feinstaubbereich PM2,5 auf wie die Begrünung.

Bezüglich des Pflanzenausfalls ließ sich feststellen, dass die flächige Bauweise deutlich weniger Ausfälle als die modulare Bauweise zu verzeichnen hatte. Bei den Moosflächen konnten die *Racomitrium*-dominierten Matten verglichen mit den *Hypnum*-dominierten Matten in einem deutlich vitaleren Zustand gehalten werden.



Abbildung 126: Übersicht der begrünten Flächen an der Gladbecker Straße in Essen.

Diskussion

7. Diskussion

Ziel dieses Pilotprojektes war die Betrachtung der Feinstaubbindung wandgebundener Begrünungen an den beiden Versuchsstandorten Gladbecker Straße in Essen und Citytunnel in Darmstadt. Gleichzeitig sollten die Projekte Erkenntnisse über die zukünftige Pflanzenverwendung an Extremstandorten liefern.

Die in *Kapitel 2* durchgeführte Literaturrecherche hat verdeutlicht, dass es in der Wissenschaft sehr unterschiedliche Auffassungen zur Wirksamkeit von Pflanzen bei der Feinstaubbindung gibt. Die unterschiedlichen Messergebnisse sind insbesondere auf die zahlreichen Einflussparameter bei den

Untersuchungen zurückzuführen. Dadurch entstehen bei Feldversuchen verschiedene Ausgangsbedingungen. Mit der Untersuchung an den beiden Standorten sollte eine Langzeitstudie zur Entwicklung der Luftschadstoffe und Vitalität der Pflanzen erfolgen. Beide Standorte eignen sich aufgrund der hohen Grundbelastung der Luft für eine Luftschadstoffbetrachtung in besonderem Maße.

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse aus *Kapitel 6* diskutiert und mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche abgeglichen.

7.1 Messung von Parametern in der Umgebungsluft

Temperatur und Luftfeuchtigkeit sind die beiden zentralen meteorologischen Größen zur Beschreibung des Klimas [DWD 2015, o.S.]. Im urbanen Raum können lokal erhebliche Unterschiede auftreten. Unter sommerlichen Bedingungen steigt die gefühlte Temperatur wesentlich schneller als die Lufttemperatur [DWD 2023, o.S.]. Einheitliche gesundheitliche Auswirkungen der Temperatur sind aufgrund des individuellen Empfindens der gefühlten Temperatur nicht aus der Literatur zu entnehmen. Zudem haben die Verdunstung und das Zuführen von Wasser im städtischen Lufthaushalt einen Kühlungseffekt. Sowohl die Temperatur als auch die Luftfeuchtigkeit haben Einfluss auf die Belastungssituation und die Bindung von Luftschadstoffen im urbanen Raum. Durch eine höhere Luftfeuchtigkeit, beispielsweise aufgrund der Transpirationswirkung von Pflanzen, können Feinstäube in der Luft gebunden werden. [BASt (Hrsg.) 2010, S. 8]. Eine höhere Luftfeuchtigkeit kann beispielsweise durch die Transpirationsleistung von Pflanzen zustande kommen.

Die Messung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurde am Standort Citytunnel Darmstadt mit den *Hawa*

Dawa-Messgeräten durchgeführt. Am Standort Essen wurden zusätzlich *Hobo*-Datenlogger an der Fassade eingesetzt. In Essen lagen die Messwerte von Temperatur und Luftfeuchtigkeit an den Standorten begrünte Fassade und Putzfassade nah beieinander. Eine Reduzierung der Oberflächentemperatur konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Diese Erkenntnis kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

- *Anordnung und Ausführung der Begrünung:*
Die Anordnung und Ausführung der Begrünung war für eine Temperatureaktion nicht optimal. Die schmalen substratgefüllten Gabionen wurden mit einem Metallrahmen eingefasst. Alle Materialien nehmen viel Wärme auf.
- *Vitalität der Bepflanzung:*
Während der einjährigen Beobachtungsphase lag der Schwerpunkt der Untersuchungen in Essen nicht auf der Betrachtung der Pflanzenvitalität. Es konnte jedoch beobachtet werden, dass die Pflanzen erst ab dem Zeitpunkt der Nachpflanzung im August 2021 einen höheren Flächendeckungsgrad entwickelten.

In Darmstadt war das Begrünungsprojekt durch die Lage im Tunnel nicht direktem Sonnenlicht ausgesetzt, sodass an diesem Standort kein direkter Kühlungseffekt gemessen werden konnte. Die durchschnittlich niedrigere Temperatur von 1,3 °C vor der Begrünung könnte auch mit einer etwas veränderten Lage des Messgeräts HDD172 „Mitte Citytunnel“ zusammenhängen. Der Sensor wurde etwa 1,5 m höher als der Sensor HDD 169 „Begrünung“ installiert. Der Temperaturanstieg beim Sensor kann also nicht ausschließlich auf die Kühlungsleistung der Pflanzen zurückgeführt werden.

Da durch das Messgerät HDD 174 „Eingangsportal“ im Zeitraum zwischen dem 19. Oktober 2021 und dem 6. Februar 2022 keine Daten aufge-

nommen wurden, ist insbesondere der Vergleich zwischen dem Messgerät im Tunnel und dem Messgerät vor der Begrünung relevant. Die relative Feuchte lag vor der Begrünung etwa 10,4 % höher als im Tunnel. Dies resultiert aus der Transpirationsleistung der Pflanzen und der oberflächlichen Benetzung der Moose mit Wasser.

Die erhöhte Luftfeuchtigkeit hat auch Einfluss auf die Staubbelastung in der direkten Umgebung der Begrünung. Durch den höheren Wassergehalt in der Luft können Partikel agglomerieren und aufgrund der Schwerkraft leichter sedimentieren.

7.2 Messung der Stickstoffdioxidkonzentrationen in der Umgebungsluft

Die EU hat zum Schutz der Bevölkerung einen Grenzwert für Stickstoffdioxid (NO₂) von 40 µm/m³ als Jahresmittelwert festgelegt. Gemäß der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV) gelten diese Grenzwerte auch für Deutschland. Die WHO hat diesen Wert 2021 auf 10 µm/m³ heruntersetzt [Tagesschau 2021, o.S.].

In *Tabelle 17* sind die Jahresmittelwerte der NO₂-Konzentrationen an beiden Standorten und den nahegelegenen öffentlichen Messstationen aufgeführt. Wie anhand der Darstellung zu erkennen ist, wurde der Jahresgrenzwert bei der Messstelle in der Mitte des Citytunnels nicht eingehalten. Der Grenzwert wurde erst im Juli 2021 wieder unterschritten, stieg aber anschließend im November erneut über den Grenzwert von 40 µm/m³. Insgesamt wurde an dieser Messstation das Jahresmittel in acht von zwölf Monaten überschritten. Für die Luftreinhaltung sind dabei nur Messstandorte relevant, an denen die Bevölkerung direkt oder indirekt

hohen Konzentrationen ausgesetzt ist. Für Darmstadt ist diesbezüglich besonders der erwähnte Passivsammler am Tunnelausgang Hängelstraße relevant. In Essen wurde der Grenzwert lediglich in den Übergangsmontaten der Messungen überschritten. Insgesamt liegt der Durchschnitt aber unterhalb der Grenzwerte.

Die Differenz zwischen den begrün- und unbegrün-ten Flächen fällt in Essen gering aus. Zeitweise liegen die monatlichen Mittelwerte der Putzfassade sogar unter den Werten der Begrünung. In Darmstadt konnte eine Reduzierung der NO₂-Konzentration um 21,90 % festgestellt werden. Bei allen aufgeführten Messstationen wurde der Grenzwert der WHO von 10 µm/m³ überschritten.

Anhand *Abbildung 79*, S.112 ist zu erkennen, dass ein jahreszeitlicher Unterschied in der Differenz der Konzentration zwischen der Messstelle Mitte Citytunnel und Begrünung in Darmstadt besteht. Während in den

Sommermonaten mit einer hohen Vegetationsdichte der Begrünung eine Differenz von bis zu $10 \mu\text{m}/\text{m}^3$ erkennbar ist, verringert sich der Unterschied in den Wintermonaten auf weniger als $2 \mu\text{m}/\text{m}^3$ im Dezember.

Der Tunnel kann wegen seiner geschützten Lage als Sonderstandort betrachtet werden. Die hohen Differenzen in den Untersuchungsergebnissen sind auf die meteorologisch geschützten Bedingungen zurückzuführen. Zudem kommt es wegen des Einrichtungsverkehrs im Tunnel nicht zu einem homogenen Luftaustausch. Die Luft wird im Tunnelverlauf mit Luftschadstoffen angereichert. Die großen Unterschiede zeigen eine Tendenz in der Bindung von NO_2 durch Pflanzen, sind jedoch

nicht als absolute Werte anzunehmen. Die Luftschadstoffe sind großteils auf verkehrsbedingte Emissionen zurückzuführen. Wie von Neher (2022, S. 137) beschrieben, ist zur Reduktion von NO_2 eine Nähe der Vegetation zum Emittenten von Vorteil und bringt die größten Effekte hervor. Durch die Einsatzmöglichkeiten wandgebundener Begrünungen direkt am Straßenrand können diese zur Bindung von Luftschadstoffen eingesetzt werden.

Standort	Messstation	Jahresmittelwert NO_2
Darmstadt	HDD 169 „Begrünung“	35,89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Darmstadt	HDD 172 „Mitte Citytunnel“	43,74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Darmstadt	HDD 174 „Eingangsportal“	30,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Darmstadt	<i>Hügelstraße (öffentlich)</i>	27,60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Essen	HDE 173 „Begrünung“	34,33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Essen	HDE 176 „Putzfassade“	35,90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Essen	<i>Gladbecker Straße (öffentlich)</i>	33,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabelle 17: Jahresmittelwerte Stickstoffdioxid an den Messstationen in Essen und Darmstadt.

7.3 Messung der Staubkonzentration in der Umgebungsluft

Die Literaturrecherche in *Kapitel 2* hat deutlich gemacht, dass es in der Wissenschaft sehr unterschiedliche Auffassungen zur Wirksamkeit von Pflanzen bei der Feinstaubbindung gibt. Die unterschiedlichen Messergebnisse gründen insbesondere auf den vielen Parametern der Einflussnahme bei den Messungen und die unterschiedlichen Versuchsaufbauten. Ausgehend von den genannten Daten beträgt der Annäherungswert für das Feinstaub-Bindungsvermögen von Fassadenbegrünungen 4,0 bis 6,0 g/m² im Jahr, was einer täglichen Aufnahme von maximal 16.400 µm/m² entspricht. In der Literatur ist die Effektivität zur Filterung des Gesamtstaubs mit 4 bis 8,4 % angegeben.

Verschiedene Studien haben ein weit aus höheres Bindungsvermögen von Moosen im Vergleich zur *Sedum*-Variante festgestellt. Nach Frahm können Moose bis zu 20 g/m² Feinstaub im Jahr aufnehmen [Frahm 2008, o.S.]. Die Begrünung mit *Sedum* an der Fassade stellt zum jetzigen Zeitpunkt keine etablierte Verwendungsform dar. Zur Sicherstellung der Luftqualität wurden für Feinstaub in den Größenordnungen PM10 und PM2,5 Grenzwerte festgelegt. Demnach liegt der

Jahresmittelwert für PM10 bei 40 µm/m³ und für PM2,5 bei 25 µm/m³. Auch für Feinstaub hat die WHO wesentlich strengere Werte zum Schutz der Bevölkerung empfohlen. Laut WHO sollte der Jahresmittelwert für PM10 bei 20 µm/m³ und für PM2,5 bei 10 µm/m³ liegen.

Standort	Messstation	Jahresmittelwert PM10	Jahresmittelwert PM2,5
Darmstadt	HDD 169 <i>Begrünung</i>	17,15 µg/m ³	9,22 µg/m ³
Darmstadt	HDD 172 <i>Mitte Citytunnel</i>	23,73 µg/m ³	11,65 µg/m ³
Darmstadt	HDD 174 <i>Eingangsportal</i>	19,89 µg/m ³	11,05 µg/m ³
Darmstadt	<i>Hügelstraße (öffentlich)</i>	13,93 µg/m ³	9,40 µg/m ³
Essen	HDE 173 <i>Begrünung</i>	19,94 µg/m ³	11,52 µg/m ³
Essen	HDE 176 <i>Putzfassade</i>	24,32 µg/m ³	14,37 µg/m ³

Tabelle 18: Jahresmittelwerte Feinstaub PM10 und PM2,5 an den Messstationen in Essen und Darmstadt.

Die EU-weit geltenden Grenzwerte konnten für die Feinstaubmessungen bei beiden Standorten und allen Messpunkten eingehalten werden. Die Untersuchungsmethoden im Citytunnel und an der Gladbecker Straße beruhen auf Vergleichsmessungen zwischen begrünten und unbegrünten Flächen.

Ziel der Arbeit war es herauszufinden, ob ein Nachweis zur Reduktion von Feinstaubkonzentrationen durch Begrünungen geführt werden kann. Die Zielsetzung gründet auf der Annahme, dass Vegetationselemente an der Fassade zu einer Reduktion von Luftschadstoffen beitragen. Nach Krahl [2020] und Vogt [2018] bestehen zwei Möglichkeiten, einen solchen Versuch durchzuführen:

1. *Parallele Messungen*

Die Durchführung von parallelen Messungen an einem Standort setzt voraus, dass für die Vergleichsmessungen mit und ohne Vegetationselemente gleiche bis sehr ähnliche Schadstoffbelastungen an einem Standort herrschen. Demnach werden die Messgeräte hintereinander oder versetzt angeordnet.

2. *Zeitlich versetzte Messungen*

Weiterhin ist es möglich, die Messungen hintereinander durchzuführen. Demnach wird eine Verkehrssituation über einen längeren Zeitraum erst mit und anschließend ohne Vegetationselement untersucht.

Die zweite Methode birgt das Risiko, dass sich die Belastungssituationen im Laufe einer bestimmten Zeit ändern oder kurzzeitige Effekte auftreten können, wodurch sich die Grundparameter der Untersuchung ändern. Beispielsweise konnten zu Beginn und während der Corona-Maßnahmen Emissionsminderungen von bis zu 50 % als kurzzeitige Effekte von rund vier Wochen verzeichnet werden [UBA (Hrsg.) 2020, o.S.].

Für die Untersuchungen im Citytunnel Darmstadt und an der Gladbecker Straße in Essen wurden die parallelen Messungen als Untersuchungsmethode ausgewählt. Demnach wurde die Anordnung der Messgeräte so gewählt, dass ein Vergleich der Flächen mit und ohne Begrünung durchgeführt werden kann.

An beiden Standorten konnte ein signifikanter Unterschied der Messergebnisse zwischen begrünten und unbegrünten Bereichen festgestellt werden. In Darmstadt führt die besondere Situation der Messung in einem Tunnel zu einer grundsätzlich höheren Konzentration an Luftschadstoffen. Dadurch musste ohnehin von höheren Werten im Vergleich zum Umfeld des Tunnels, einschließlich der Messstation Darmstadt Hügelstraße, ausgegangen werden. Bei der Betrachtung von PM₁₀ konnte die größte Differenz im Tunnel zwischen der Messstation HDD172 Mitte Citytunnel und HDD169 Begrünung festgestellt werden. Hier wurde im gesamten Messzeitraum eine durchschnittliche Reduktion um 38,40 % für PM₁₀ nachgewiesen. Für PM_{2,5} lag der Differenzwert im Tunnel bei 26,40 %.

Die Reduktion der Luftschadstoffe im Bereich der Begrünung kann zum einen durch die vergrößerte Oberfläche und Dichte der Blattmasse zur Filterung begründet werden. Zum anderen kann die erhöhte Luftfeuchtigkeit im Nahbereich der Begrünung zu einer Reduzierung der Luftschadstoffe beitragen. Während des Untersuchungszeitraums lag die relative Feuchte rund 6 % über den Messwerten an den anderen Messstellen im Tunnel. Dadurch bildeten sich aus dem Feinstaub größere Partikelagglomerate, die schneller auf den Boden absinken.

Die positiven Ergebnisse in Bezug auf die Feinstaubbindung durch wandgebundene Begrünungen sind jedoch aus mehreren Gründen lediglich als Annäherungswerte zu betrachten:

- *Parameter der Einflussnahme*
Im Tunnel können während des Messzeitraums variierende Luftströmungen und meteorologische Veränderungen einen Einfluss auf die Schadstoffkonzentration ausüben. Auch Veränderungen im Verkehr können sich auf die Konzentrationen und damit auf die Messergebnisse auswirken.
- *Installationsort der Messgeräte*
Die Messgeräte konnten nicht an den ursprünglich vorgesehenen Orten montiert werden. Insbesondere die unterschiedliche Installationshöhe, bedingt durch die Montage an den Verkehrsüberwachungsschildern kann Einfluss auf die Messergebnisse ausgeübt haben.

Insgesamt konnte ein messtechnischer Nachweis zur Reduktion von Feinstäuben in der Umgebungsluft durch wandgebundene Vegetationselemente im Citytunnel Darmstadt erbracht werden.

Wenngleich am Standort in Essen ebenfalls eine größere Differenz zwischen der Messung vor der Begrünung und an der Putzfassade erkennbar ist, ist die Reduktion von PM10 in Höhe von 22 % im Jahresdurchschnitt zu hinterfragen. Durch die Verteilung der einzelnen Begrünungen an der Fassade konnte keine größere einheitliche Begrünungsfläche erzeugt werden, mit der ein messtechnischer Nachweis besser zu führen wäre. Am Standort in Essen ist in der Überschreitung der

24-Stunden-Werte eine deutliche Veränderung gegenüber der öffentlichen Messstation an der Gladbecker Straße erkennbar. Während der 24-Stunden Grenzwert an der öffentlichen Messstation 21-mal überschritten wurde, wurde er vor der Putzfassade 16-mal und vor der Begrünung nur viermal überschritten. Anhand *Abbildung 88 und 89, S. 116 f.*, ist erkennbar, dass auch am Standort in Essen ein messtechnischer Nachweis zur Reduktion von Feinstäuben durch wandgebundene Begrünungen erreicht wurde, wenngleich dieser weniger deutlich ist als im Citytunnel.

7.4 Messung der Staubkonzentration auf Oberflächen

Zur Messung der Staubkonzentration auf Oberflächen werden nach VDI 2119 Passivsammler mit unterschiedlichen Akzeptoroberflächen eingesetzt. Darüber lassen sich Aussagen zur Anzahl der sedimentierten Partikel treffen. Zusätzlich lassen sich mit speziellen Oberflächen aus Kohlenstoff oder Bor Analysen zur chemischen Zusammensetzung der Partikel durchführen. Insgesamt wurden am Standort Darmstadt vier und am Standort in Essen zwei Passivsammler eingesetzt.

Durch den überdurchschnittlich hohen Anteil an Partikeln im Feinstaubbereich ist der Feinstaubgehalt der Luft, trotz Einhaltung der Grenzwerte als stark gesundheitsgefährdend einzustufen. Da sich insbesondere die feinen Partikel als gesundheitsschädlich erweisen, ist davon auszugehen, dass die Reduzierung des Feinstaubes, ausgelöst durch die Partikelanhaftung auf vegetativen Oberflächen einen Einfluss auf den Feinstaubgehalt der Luft ausübt. Bei beiden Messstandorten wurden deutliche Unterschiede in der Auswertung der Sigma-2-Proben festgestellt. In Darmstadt zeigen die Analysen (*Abbildung 93 bis 97, Seite 123ff.*) eine besonders hohe Anzahl metallischer Partikel, die dort die größte Partikelgruppe darstellen. In Essen ist der Anteil metallischer Partikel am Gesamtstaub wesentlich geringer. Die morpho-chemischen Partikelanalysen zeigen für die vier Auswertungen in Darmstadt eine homogene Verteilung der Partikelgrößen, mit Zunahme der Einzelpartikel bei kleineren Durchmessern. In Essen ist die Verteilung bei der Probe ES1 (Putzfassade) inhomogen.

Hier stellt die kleinste gemessene Partikelfraktion etwa 40 % der gesamten Partikel.

Die Elemente Eisen (Fe), Sauerstoff (O) und Kohlenstoff (C), die in Darmstadt am häufigsten aufgetreten sind, deuten auf einen hohen Anteil metallischer Partikel aus Bremsabrieb hin. Eisen ist das vorherrschende Element in KFZ-Bremsscheiben und Kohlenstoff ein wesentlicher Bestandteil von Bremsbelägen. In den Bremsvorgängen der Fahrzeuge werden durch die Reibungsvorgänge der beiden Seiten Abrieb und damit Partikel freigesetzt.

Insgesamt ist der Anteil biogener Partikel höher als bei anderen Proben im Straßennähe, die im Rahmen dieser Analysemethoden untersucht wurde. Die eingesetzten wandgebundenen Begrünungen könnten einen Einfluss auf die Anzahl biogener Partikel ausgeübt haben und somit als Quelle für partikuläre biogene Feinstäube bewertet werden. Dies kann jedoch nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Eine klare Unterscheidung zwischen den Messstandorten Begrünung und ohne Begrünung war in den qualitativen Proben nicht möglich. Lediglich am Standort Essen wurde eine wesentlich höhere Zahl feiner Partikel an der Fassade im Vergleich zur Begrünung gemessen. Ein eindeutiger Hinweis auf die Morphologie oder die Größe der an den Blattoberflächen anhaftenden Partikel ist damit jedoch nicht möglich.

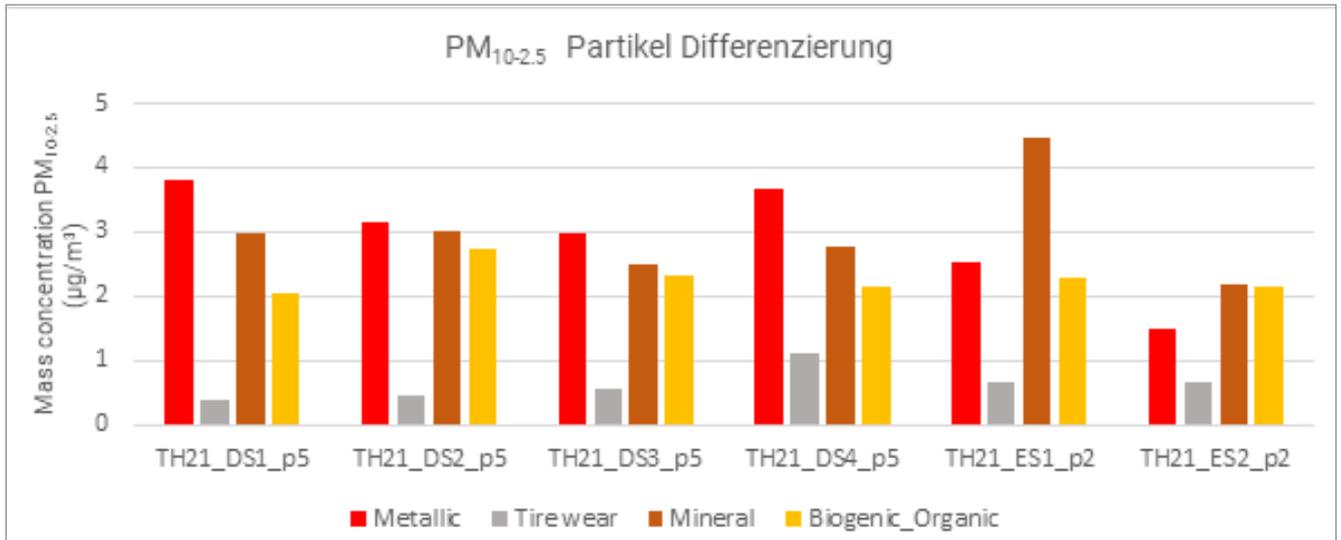


Abbildung 127: Übersicht aller Messstandorte und Vergleich der Partikelherkunft für die Partikelklassifikation PM10-2.5, Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.

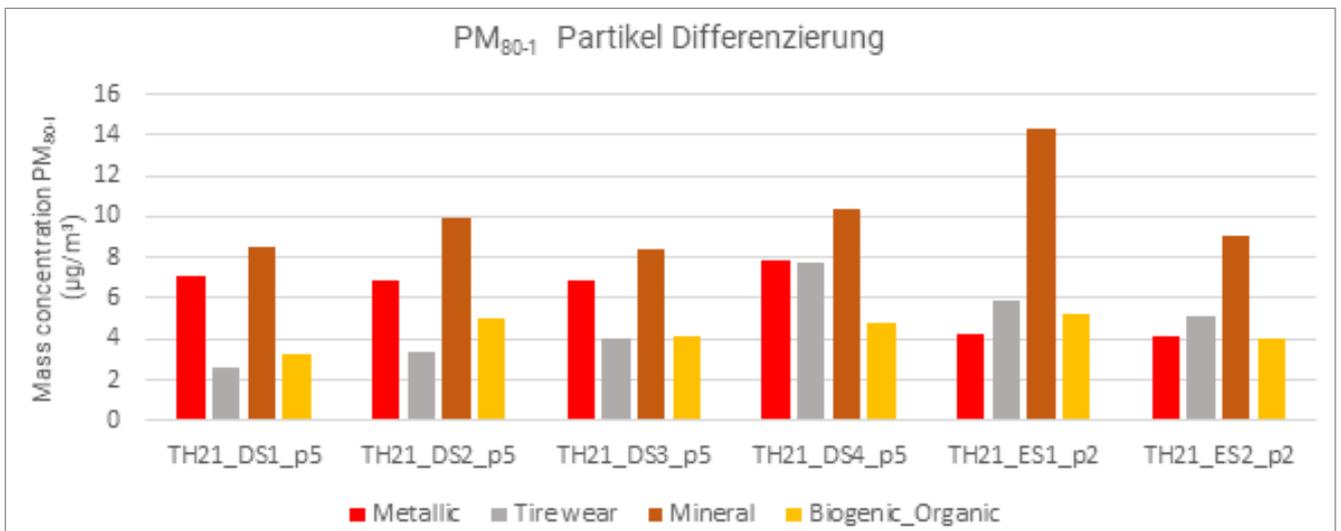


Abbildung 128: Übersicht aller Messstandorte und Vergleich der Partikelherkunft für die Partikelklassifikation PM80-1, Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH.

7.5 Messung der Staubkonzentration in der Messzelle

Die Ergebnisse der durchgeführten Bestäubungsversuche zeigen, dass die untersuchten Vegetationsträger schneller zu einer Reduktion der Luftschadstoffkonzentration führen als die Prüfvariante ohne Vegetation. Zudem kann aufgrund der Konzentrationsvergleiche zum Ende des Versuchs darauf geschlossen werden, dass mit den untersuchten Vegetationsträgern mehr Feinstaub gebunden wurde als im Versuch mit leerer Kammer.

Durch das Einschalten des Ventilators konnte eine Aufwirbelung der Partikel, vergleichbar mit dem Straßenverkehr simuliert werden. Deutlich zu erkennen ist, dass auch nach Eingabe des zweiten Prüfstaubs und Einschalten des Ventilators keine höhere Konzentration zu messen war als nach der ersten Eingabe. Daraus lässt sich schließen, dass die bereits an den Blattoberflächen anhaftenden Partikel an der Blattoberfläche gebunden werden und eine Wiederaufwirbelung aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit erschwert wird.

Der Vergleich zwischen den unterschiedlichen Vegetationsträgern hat keine eindeutige Tendenz zu einer Vegetationsart ermöglicht. Bei den drei Versuchsdurchläufen wurde jedoch bei der *Sedum*-Matte zweimal der schnellste Rückgang festgestellt. Ein höherer Vegetationsaufbau könnte durch die größere Abscheidefläche in diesem Zusammenhang auch zu einem schnelleren Konzentrationsrückgang geführt haben.

Wie von Vogt [2020] beschrieben, haben unter Realbedingungen zahlreiche Parameter Einfluss auf die Messungen. Durch Veränderungen des Windfelds kann auch die Partikelabscheidung an

Pflanzenoberflächen kurzzeitig stark variieren. Aufgrund der eher einseitig auftretenden Windbewegungen in der Prüfkammer kann es folglich unter realen Bedingungen zu abweichenden Ergebnissen kommen.

Versuche von Sempel et al. [2013] zeigen ein ähnliches Ergebnis bei der Untersuchung verschiedener Dachbegrünungen in diesem Versuchsaufbau. Aufgrund der horizontalen Anordnung der Vegetationsmatte variieren jedoch die Luftbewegungen im Verhältnis zu den Pflanzen.

7.6 Vitalitätsmessung der ausgewählten Vegetationssysteme

Die Vitalitätsuntersuchungen im Citytunnel Darmstadt wurden über den Zeitraum einer Vegetationsperiode durchgeführt. Für die Entwicklung von Pflanzen ist der Standort in einem Tunnel als herausfordernd einzustufen. Die künstlich erzeugten Lichtverhältnisse, verbunden mit einer hohen Luftschadstoffkonzentration wirken auf die Pflanzen als Stressfaktoren. Zusätzlich sind die Pflanzen in wandgebundenen Begrünungssystemen mit der künstlichen Wasser- und Nährstoffversorgung einem fragilen System ausgesetzt, das für die Pflanzenversorgung optimal eingestellt sein muss. Insgesamt haben sich die untersuchten Begrünungsflächen im Citytunnel hinsichtlich der Vitalität unterschiedlich entwickelt.

Flächige Bauweise:

Gemäß der Bewertung der einzelnen Pflanzenarten mit dem Boniturschlüssel ist ein Großteil in Zustand 1 (abgestorben) oder 3 (kümmern) einzustufen. Insgesamt wurde aber im Vorfeld bei der Planung die Stückzahl der wuchsstarken Pflanzen erhöht, sodass der Gesamtzustand der Pflanzung als akzeptabel einzustufen ist. Insgesamt lag der Deckungsgrad zwischen 75 und 85 %. Einige Pflanzenausfälle wurden durch eine Verschattung im unteren Bereich ausgelöst.

Modulare Bauweise:

Bei der modularen Bauweise konnten lediglich die im oberen Bereich eingesetzten Gehölze *Jasminum nudiflorum* und *Cotoneaster dammeri* 'Radicans' durch ein vitales Erscheinungsbild überzeugen. Die eingesetzten Stauden konnten im Laufe der untersuchten

Vegetationsperiode keinen vitalen Zustand erreichen. Der Flächendeckungsgrad lag zwischen 19 und 80 % (nach der Nachpflanzung am 28. Juli 2021). Folgende Faktoren haben zu einer verminderten Vitalität in der modularen Bauweise geführt:

- **Einstellung der Bewässerungs- und Versorgungstechnik**
Eine gleichmäßige Versorgung der Substratkörper mit Wasser und Nährstoffen konnte nicht gewährleistet werden.
- **Pflanzenanzahl**
Die Pflanzenanzahl im System war insgesamt zu hoch. Die schlechte Versorgung der Pflanzen verbunden mit einem gesteigerten Konkurrenzdruck um Wasser, Nährstoffe und Licht hat zu Stressreaktionen bei den Pflanzen und zu einem deutlichen Ausfall geführt.
- **Pflanzenauswahl**
Die Pflanzenauswahl konnte für den Einsatz im Tunnel nicht überzeugen. Einzelne Arten, beispielsweise *Euphorbia polychroma* 'Purpurea', kommen zwar mit Trockenheit gut zurecht, erfordern aber hinsichtlich ihrer Standortansprüche sonnige bis halbschattige Standorte.
- **Extremstandort Tunnel**
Durch die künstliche Beleuchtung, die starken Windbewegungen bei der Tunneleinfahrt, fehlenden Niederschlag und eine hohe Luftschadstoffbelastung ist der Standort im Tunnel als Extremstandort für Pflanzen einzustufen.

Moosflächen

Bei der Untersuchung der Moosflächen konnten deutliche Unterschiede in der Vitalität der eingesetzten Moosmatten festgestellt werden. Die eingesetzten *Hypnum*-Moosmatten waren über einen langen Zeitraum großflächig biologisch inaktiv. Zudem konnten die Flächen mit dem eingesetzten Bewässerungssystem nicht optimal versorgt werden. Trotz Anpassungen der Bewässerung blieb die Wasserverteilung ungleichmäßig, was zu unterschiedlichen Vitalitätszuständen führte. Der Teilwechsel der Moosflächen auf *Racomitrium*-Moosmatten ist positiv zu bewerten. Die eingesetzten Flächen waren überwiegend vital und es war zum Teil ein deutlicher Zuwachs in der Länge der Triebspitzen erkennbar. Die Fäulnisbildung im unteren Bereich wurde durch die ungleichmäßige Bewässerung verursacht. Im Vergleich zur Untersuchung der Mooswände in Stuttgart konnten die eingesetzten *Racomitrium*-Moosmatten bei der Verwendung im Citytunnel vital gehalten werden [Thielen 2018, S. 40].

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass wandgebundene Begrünungen ein vielversprechendes Mittel zur Verbesserung der Luftqualität und zur Feinstaubbindung darstellen. Hinsichtlich der Effektivität und der Verwendung einzelner Pflanzenarten besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf. Vitale Pflanzen mit gesunden Blattoberflächen können wesentlich zur Partikelabscheidung beitragen. Bei Moosen ist eine aktive, gleichmäßige Bewässerung nicht nur für die Vitalität entscheidend, sondern auch, da die Bioaktivität und Bindung von Schadstoffen dort entscheidend von der Pflanzenvitalität abhängt.

Die Begrünung in der flächigen Bauweise hat für den Standort im Tunnel funktioniert, beim Einsatz der modularen Bauweise besteht dagegen Optimierungsbedarf. Die Verwendung von Moosen an diesem Standort war beim Falle der *Racomitrium*-Moosmatten erfolgreich. Eine Übertragung an einen Standort außerhalb eines Tunnels ist zu überprüfen. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht bei der Verwendung und Einstellung einer geeigneten Bewässerung.

Hinsichtlich der Verwendung einzelner Pflanzenarten zur Partikelabscheidung auf den Blattoberflächen wurden keine vergleichenden Untersuchungen durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit sollten wuchstarke Pflanzen hinsichtlich ihrer Partikelanhaftung weiter untersucht werden.

Zusammenfassung

8. Zusammenfassung

Im letzten Kapitel dieser Arbeit werden die Ergebnisse zusammengeführt um die zentrale Fragenstellung: „Können wandgebundene Begrünungen zu einer Reduzierung von Feinstaubbelas-

tung und damit zu einer Reduzierung der gesundheitlichen Belastung in urbanen Räumen führen“ zu beantworten.

8.1 Schlussfolgerung

In dieser Arbeit wurden die Themenfelder *wandgebundene Begrünungen*, *Luftschadstoffe* (insbesondere Feinstaub) sowie deren *Gesundheitsauswirkungen* untersucht. Wesentlicher Bestandteil der Untersuchung war die messtechnische Untersuchung des Einflusses von wandgebundenen Begrünungen auf den Feinstaubgehalt in der Umgebungsluft.

Die Untersuchung der beiden Begrünungsprojekte an der Gladbecker Straße in Essen und im Citytunnel Darmstadt haben gezeigt, dass diese Bauweisen zur Bindung von Luftschadstoffen eingesetzt werden können, vorausgesetzt die Pflanzen können in einem vitalen Zustand gehalten werden. Die zahlreichen Einflussfaktoren in Feldversuchen erschweren jedoch eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse hat einen deutlichen Effekt zur Reduzierung von Stickstoffdioxid und Feinstaub in der unmittelbaren Umgebung der Begrünung gezeigt. Wandgebundene Bauweisen können somit einen Beitrag zur Reduzierung der gesundheitlichen Belastung in urbanen Räumen leisten. Mit einer bis zu

achtfachen Oberflächenvergrößerung bei Stauden und einer 20 bis 30-fachen Oberflächenvergrößerung bei Moosen, bieten die Pflanzen eine verhältnismäßig große Oberfläche zur Abscheidung von luftgetragenem Feinstaub. Die verminderte Konzentration im Umfeld der Begrünung führt unmittelbar zu einer Verringerung der gesundheitlichen Belastungen. Aufgrund einer anzunehmenden linearen „Dosis-Wirkungs-Beziehung“ führt jede Konzentrationsverringerung zu einer gesundheitlichen Entlastung [SMC (Hrsg.) 2017, S. 2].

In direktem Umfeld der Begrünungen konnte im Citytunnel eine Reduktion von Feinstaub in der Partikelgröße PM10 um 38 % erfasst werden. Dieser Wert erscheint im Vergleich zu den Auswertungen der bestehenden Literatur sehr hoch. Die Anordnung der Messgeräte vor der Begrünung sollten für weitere Forschungen abweichend gewählt werden, um Unterschiede im Abstand zur Begrünung und damit im Fußgängerbereich nachvollziehen zu können.

Der Einsatz vielfältiger Pflanzenarten wird in der Praxis häufig als vielversprechendes Mittel zur Bepflanzung

von Beetflächen und Fassadenbegrünungen angesehen. Im Citytunnel konnte eine vitale Bepflanzung nur bei wenigen Pflanzenarten nachgewiesen werden. Bei der Begrünung von Extremstandorten müssen weitere, stresstolerante Pflanzenarten getestet werden. Der Frage, inwieweit einzelne Pflanzen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Luftfilterung haben, konnte in dieser Arbeit nicht nachgegangen werden. Fassadenbegrünungen mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit dienen in einer gewissen Porosität als gutes Filtermedium und können zudem variabel zum Einsatz kommen.

Anhand der Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop konnte bei den Pflanzen im Citytunnel eine dichte Staubablagerung festgestellt werden. Einen direkten Einfluss auf die Photosyntheseaktivität, die Toxizität der Stoffe und damit die Vitalität konnte aufgrund der Untersuchungsmethoden nicht nachgewiesen werden. Der vitale Zustand der Moosbegrünung mit *Racomitrium*-Moosmatten ist als Erfolg einer Begrünung in dieser Bauweise zu werten. Allerdings sind im Bereich der Bewässerung weitere Optimierungsmaßnahmen erforderlich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass wandgebundene Begrünungen auf Basis der erhobenen Daten zu einer Verbesserung des städtischen Lufthaushalts beitragen können. Die räumliche Nähe zwischen den Pflanzen als Filtermedium und dem Hauptemittenten städtischer Emis-

sionen, dem Straßenverkehr, ist bei der Reduzierung von luftgetragenen Feinstaub vorteilhaft. Als wichtigstes Kriterium gilt jedoch nach wie vor die Reduktion der Emissionen durch eine tiefgreifende Veränderung unserer urbanen Mobilität.

Neben der positiven Wirkung zur Minderung von Luftschadstoffen haben Pflanzen im urbanen Kontext zahlreiche weitere positive Funktionen, weshalb sie zur Erhaltung der Lebensqualität in Städten stärker berücksichtigt werden sollten. Dabei stellt die Bauwerksbegrünung neben der Umgestaltung von Freiräumen und Infrastrukturbereichen einen essenziellen Baustein dar.

8.2 Weiterführende Anregungen

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen tragen zur Einordnung der Thematik *Bindung von Luftschadstoffen durch wandgebundene Fassadenbegrünungen* bei. Um die Leistungsfähigkeit und die Vorteile von Begrünungen dieser Bauweise herauszustellen, sind jedoch weitergehende Untersuchungen nötig. Zudem gilt es die Gesundheitsförderung durch urbane Vegetation insgesamt weitergehend zu quantifizieren, um deren Leistungsfähigkeit in der zukünftigen Stadtentwicklung berücksichtigen zu können. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Recherchen zeigen einen großen Wissensbedarf hinsichtlich der exakten Abscheideleistung urbaner Vegetationen.

Folgende Überlegungen sollten daher bei zukünftigen Forschungsprojekten einbezogen werden:

- Betrachtung der Feinstaubkonzentration in zunehmendem Abstand zur Vegetation um einen Einfluss für den Wirkungsgrad und die Potenziale für Fußgänger etc. abschätzen zu können.
- Tieferegreifende Untersuchung der Blattabscheideleistung unterschiedlicher Pflanzenarten. Gemäß bisherigen Erkenntnissen wird hier lediglich in *Akkumulierer* und *Selbstreiniger* unterschieden.
- Vergleichbare Bedingungen zur Untersuchung und Differenzierung zwischen Labor- und Praxisversuchen.
- Modellrechnung zur potenziellen Abscheideleistung und Fläche einer durchschnittlichen Begrünung und damit einer quantifizierbaren Beurteilung des Potenzialraums Stadt.
- Untersuchung der Einschränkung biologischer Prozesse und der Toxizität bei Stauden unter dem Einfluss größerer Konzentrationen an Luftschadstoffen.
- Untersuchung der Abscheideleistung und biologischen Umwandlung von Feinstäuben und anderen Luftschadstoffen bei Moosen; Quantifizierung der Ergebnisse.
- Weitere Untersuchungen zur optimalen Anströmung der Vegetationsflächen, um eine maximale Partikelabscheidung zu gewährleisten.
- Entwicklung einer Bauweise zur Kultivierung von Moosen in innerstädtischen Bereichen.
- Entwicklung einer extensiven Pflanzenverwendung für wandgebundene Begrünungsbauweisen.
- Effektivität bei der Luftreinhaltung durch technische Verdunstungsanlagen im Vergleich zu Vegetationselementen.

Zur Weiterführung der Thematik werden im Folgenden Themen aufgeführt, die bei nachfolgenden Forschungsprojekten berücksichtigt oder angepasst werden können:

- Die Anordnung der Messgeräte sollte frei wählbar sein. Zudem sollte eine Vergleichbarkeit zwischen den Messeinrichtungen, nach Möglichkeit inklusive gleicher Umgebungsparameter, gewährleistet werden.
- Vor der Untersuchung zur Leistungsfähigkeit einer Begrünung sollten die eingesetzten Bauweisen hinsichtlich ihrer Stabilität in der Versorgung und der Gewährleistung einer vitalen Pflanzung getestet werden.
- Gegebenenfalls sollte die Eingewöhnung und Anpassung einer Bepflanzung an einen Untersuchungsstandort vor der eigentlichen Messreihe erfolgen.
- Nach Möglichkeit ist die Auswahl und Positionierung der Messgeräte so zu wählen, dass bei einem messtechnischen Ausfall ein zeitnaher Ersatz erfolgen kann.
- Bei der Durchführung von Vergleichsmessungen im Feldversuch sind die Bauweisen der Begrünung so zu wählen, dass ein tatsächlicher Effekt über die Homogenität der Fläche und Größe der Module erkennbar ist.

Anhang

9. Anhang

9.1 Glossar

Partikuläre Luftschadstoffe

Ultrafeine ($>0,1 \mu\text{m}$) und feine ($0,1$ bis $10 \mu\text{m}$) Partikel aus natürlichen und anthropogenen Quellen. Umgangssprachlich „Feinstaub“.

Akkumulierer

Pflanzen, die in sich bestimmte Elemente anreichern.

Selbstreiniger

Pflanzen, die auf ihren Blättern anhaftende Schmutzpartikel aufgrund ihrer Blattstruktur durch „abperlen“ von Wasser reinigt.

Absorption

Aufnahme von Substanzen durch eine Grenzschicht.

Adsorption

Anlagerung von Partikeln an einer festen Oberfläche.

Passive Messverfahren

Die Partikel sedimentieren auf einer Oberfläche im Messgerät und benötigen keine zusätzliche Energie.

Aktive Messverfahren

Umgebungsluft wird aktiv durch eine Pumpe angesaugt. In der angesaugten Luft enthaltener Feinstaub wird auf einem Filter abgeschieden.

Ökosystemleistungen

Leistungen der Natur für den Menschen, aufgegliedert in Versorgungsleistungen, Regulierungsleistungen, kulturelle Leistungen und Basisleistungen.

Gravimetrie

Analyseverfahren, das Stoffmengen durch Bestimmung ihrer Masse misst.

Aerosol

Aerosole bestehen aus luft- und/oder gasgetragenen Partikeln.

9.2 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
Al	Aluminium
AQI	Europäischer Air Quality Index
ARL	Akademie für Raumforschung und Landespflege
As	Arsen
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
Cd	Cadmium
CO	Kohlenstoffmonoxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DWD	Deutscher Wetterdienst
Fe	Eisen
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
IASP	Institut für Agrar – und Stadtökologische Projekte
IoT	Internet of Things
IPP	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
LFU	Bayern Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGA	Landesgesundheitsamt
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Ni	Nickel
Pb	Blei
PM	Particulate Matter
Pt	Platin
REM	Rasterelektronenmikroskop
TH OWL	Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe
UBA	Umweltbundesamt
VHF	Vorgehängt Hinterlüftete Fassade
VM	Verkehrsministerium
WHO	Weltgesundheitsorganisation
WMO	Weltorganisation für Meteorologie
Zn	Zink
µm	Mikrometer

9.3 Literatur- und Internetverzeichnis

- Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R. & Pilla, F. et al. (2017): Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. In: Atmospheric Environment, Vol. 162, S. 71–86.
- Akademie für Raumforschung und Landespflege (ARL) (Hrsg.) (2016): Planung für Gesundheitsfördernde Städte. Books on Demand GmbH, Norderstedt.
- Baars, C. (2021): Grenzwerte für Luftverschmutzung. WHO verschärft Empfehlungen massiv. In: Tagesschau, online im Internet unter: <https://www.tagesschau.de/investigativ/ndr/who-luftverschmutzung-111.html>, Stand: 27.03.24, 11:30 Uhr.
- Bartfelder, F. & Köhler, M. (1987): Experimentelle Untersuchungen zur Funktion von Fassadenbegrünungen (Dissertation). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Bayerischer Rundfunk (BR) (Hrsg.) (2023): Neue Studie: So entsteht durch Feinstaub Lungenkrebs, online im Internet unter: <https://www.br.de/nachrichten/wissen/neue-studie-so-entsteht-durch-feinstaub-lungenkrebs,Tbl-Xbgi>, Stand: 27.03.24, 10:30 Uhr.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LFU) (2024): Starkregen und Sturzfluten. Was ist Starkregen? Online im Internet unter: https://www.lfu.bayern.de/wasser/starkregen_und_sturzfluten/index.htm, Stand: 24.03.24, 06:00 Uhr.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LFU) (Hrsg.) (2020): Bodennahes Ozon und Sommersmog, Augsburg.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LFU) (Hrsg.) (2024): Messung der atmosphärischen Deposition mit Staubbiederschlagssammlern (Bergerhoff-Verfahren), online im Internet unter: https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe_luft/schwermetalle/niederschlagssammler/index.htm, 28.04.24, 13:00 Uhr.
- BHM Planungsgesellschaft GmbH (2021): Citytunnel Darmstadt: Modellprojekt gestartet, online im Internet unter: <https://bhmp.de/2021/02/02/citytunnel-darmstadt-modellprojekt-gestartet/#>, Stand: 28.03.24, 10:00 Uhr.
- Blanc, P. (2024): Vertical Garden. Patrick Blanc, online im Internet unter: <https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/patrick-blanc/portraits>, Stand: 22.03.24, 21:00 Uhr.
- Blättner, B. & Grewe, A. in ipp info (Hrsg.) (2014): Klimawandel und Gesundheit. Strategien zur Prävention von Gesundheitsrisiken durch Hitzeextreme. In: ipp info, Jhg. 10 Nr. 12, S. 7-8.
- BLV Licht- und Vakuumtechnik GmbH (2016): Amalion LED. Kombination aus architektonischer Ästhetik und Pflanzenbedürfnissen, online im Internet unter: <https://www.blv-licht.de/wp-content/uploads/2020/07/AMALION-LED-Systeme-für-Innenraumbegrünung.pdf>, Stand: 28.03.24, 13:45 Uhr.
- Bolte, B. in ipp info (Hrsg.) (2014): Editorial. In: ipp info, Jhg. 10 Nr. 12, S. 1-2.
- Brüggemeier, F.-J., Rommelspacher, T. (1992): Blauer Himmel über der Ruhr. Geschichte der Umwelt im Ruhrgebiet 1840-1990. 1. Auflage. Klartext Verlag, Essen.
- Brune, M., Bender, S. & Groth, M. (2017). Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report 30. Climate Service Center Germany. Hamburg.
- BuGG (2023): BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2023. Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung Deutschland, online im Internet unter: <https://>

www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Marktreport/BuGG-Marktreport_Gebaeudegruen_2023_komp.pdf, Stand: 22.03.2024, 21:00 Uhr.

Bundesamt für Strahlenschutz (BFS) (2024): Was ist UV-Strahlung?, online im Internet unter: https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/einfuehrung/einfuehrung_node.html;jsessionid=ABC774AF89A208C895E25F76BA8C0E7B.1_cid365, Stand: 25.03.24, 14:00 Uhr.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.) (2010): Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM10-Belastung, Bergische Universität Wuppertal. Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.) (2017): Manuelle Straßenverkehrszählung 2015. Ergebnisse auf Bundesstraßen, online im Internet unter: https://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/Bundestrassen-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=5, Stand: 28.03.24, 13:30 Uhr.

Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (Hrsg.) (2021): Anteil älterer Menschen an der Bevölkerung, 1960-2060, online im Internet unter: <https://www.demografie-portal.de/DE/Fakten/aeltere-bevoelkerung.html>, Stand: 23.03.24, 18:45 Uhr.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.) (2022): Starkregen und Sturzfluten: Klimaforschung hilft bei Anpassung an Extremwetter, online im Internet unter: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/2022/08/starkregen-klimaforschung-und-extremwetter.html>, Stand: 23.03.24, 11:00 Uhr.

Bundesministerium für Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz (BMSGPK) (Hrsg.) (2024): Salutogenese. Entwicklungs- und Erhaltungsprozess von Gesundheit,

online im Internet unter: <https://www.gesundheit.gv.at/lexikon/S/lexikon-salutogenese.html>, Stand: 27.03.24, 10:00 Uhr.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2023): UV-Strahlung und Klimakrise: Handlungsbedarf für Städte und Gemeinden, online im Internet unter: <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/uv-strahlung-und-klimakrise-handlungsbedarf-fuer-staedte-und-gemeinden>, Stand: 24.03.24, 06:00 Uhr.

Deutsche Norm DIN EN 12341: Außenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10- oder PM2,5 –Massenkonzentration des Schwebstaubes; Deutsche Fassung EN 12341:2014.

Deutsche Norm DIN EN 16450: Außenluft –Automatische Messeinrichtungen zur Bestimmung der Staubkonzentration (PM10; PM2,5); Deutsche Fassung EN 16450:2017.

Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste (2018): Sachstand WD 8 – 3000 – 047/17: Sachstand. Stationäre NOx-Messungen. Einzelfragen zu Messmethoden.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020): Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind, online im Internet unter: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/200910/dkk_faktensammlung.pdf?__blob=publicationFile&v=2, Stand: 04.04.2024, 15:00 Uhr.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2015): Feuchte ist nicht gleich Feuchte, online im Internet unter: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2015/2/13.html, Stand: 31.03.24, 10:30 Uhr.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2024): Klimawandel – ein Überblick, online im Internet unter: <https://www.dwd.de>.

de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel_node.html#:~:text=Jahrhunderts%20zurückverfolgen.,Temperatur,1%20C6%20°C%20angestiegen,Stand: 14.03.2024, 18:00 Uhr.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2023): Stadtklima – die städtische Wärmeinsel, online im Internet unter: https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadt/pl/projekt_warmeinseln/projekt_warmeinseln_node.html, Stand: 23.03.24, 11:15 Uhr.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2023): Wetter- und Klimalexikon. Gefühlte Temperatur, online im Internet unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=100988&lv2=100932>, Stand: 02.02.2024, 14:00 Uhr.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2012): Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst. Meteorologische Bodenmesstechnik. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2024): Informationsportal Bauprodukte und Bauarten, online im Internet unter: <https://www.dibt.de/de/bauprodukte/informationsportal-bauprodukte-und-bauarten>, Stand: 23.03.24, 10:00 Uhr.

DIN EN 1717 (2011): Schutz des Trinkwassers vor Verunreinigungen in Trinkwasser-Installationen und allgemeine Anforderungen an Sicherungseinrichtungen zur Verhütung von Trinkwasserverunreinigungen durch Rückfließen; Deutsche Fassung EN 1717:2000; Technischer Regel des DVGW, Beuth Verlag, Berlin.

DMT GmbH & Co. KG (2024): PTI Arizona Prüfstaub A2 fine, online im Internet unter: <https://testdust.dmt-group.com/normstaeube/pti-arizona-pruefstaub-a2-fine>, Stand: 06.04.2024, 10:45 Uhr.

Eppel, J. & Schönfeld, P. (2014): Symposium zum Modellversuch Vertikalbegrünung. Grüne Wände in Nürnberg. Versuchsanordnung und Ergebnisse. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, online im Internet unter: https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflege/dateien/vertikalesgruen_nuernberg__min.pdf, Stand: 04.04.24, 10:30 Uhr.

Europäische Kommission (2013): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Grüne Infrastruktur (G) – Aufwertung des europäischen Naturkapitals, Brüssel.

Europäische Kommission (2017): Bericht der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über die Durchführung der Richtlinie über Umgebungslärm gemäß Artikel 11 der Richtlinie 2002/49/EG.

Europäische Kommission (Hrsg.) (2023): Wie funktioniert die Selbstreinigung von Lotusblättern?, online im Internet unter: [Europäische Norm \(EN\) \(2013\): Außenluft – Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid mittels Passivsammler, Brüssel.](https://cordis.europa.eu/article/id/443091-how-do-lotus-leaves-clean-themselves/de#:~:text=„Das%20Lotusblatt%20erzeugt%20eine%20superhydrophobe,Zellen%20der%20Epidermis%20gebildet%20werde,Stand: 28.03.24, 10:30 Uhr.</p></div><div data-bbox=)

Fassadentechnik (2020): Auslegungsfragen VHF: der Hinterlüftungsraum bei Vorgehängten Hinterlüfteten Fassaden. Ausgabe 2 und 3. Cubus Medien Verlag, Hamburg.

Föll, N. (2016) in HLNUG Jahresbericht: Räumlich hochauflösende NO₂-Messung rund um ein Tunnelportal. Beurteilung der Luftqualität in Hessen, online im Internet unter: <https://>

- www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/das_hlnug/jahresberichte/2016/1.02_hlnug_jahresbericht_16_I2_4.pdf, Stand: 04.04.2024, 10:30 Uhr.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2018): Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. 6. Auflage, Bonn.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2018): Fassadenbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen. 6. Auflage, Bonn.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2015): Bewässerungsrichtlinien. Richtlinien für die Planung, Installation und Instandhaltung von Bewässerungsanlagen in Vegetationsflächen. 2. Ausgabe, Bonn.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) – Schriftenreihe (2015): Wandgebundene Begrünungen. Quantifizierung einer neuen Bauweise in der Klima-Architektur, Bonn.
- Forschungszentrum Jülich (Hrsg.), Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK) (2024): Gesundheitsauswirkungen, online im Internet unter: <https://www.fz-juelich.de/de/iek/iek-8/projekte/smaragd/gesundheitsauswirkungen#:~:text=Die%20Haut%20ist%20als%20Körperoberfläche,Barriere%20zur%20Umwelt%20beeinträchtigen%20kann,Stand:27.03.24,10:30Uhr.>
- Frahm, J.-P. (1998): Moose als Bioindikatoren. Quelle und Meyer Verlag, Wiebelsheim.
- Frahm, J.-P. (2001): Biologie der Moose. 1. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Frahm, J.-P. (2008) in: Umwelt & Gesundheit (01/2008): Schwerpunkt. Naturpatent Moos.
- Funke Mediengruppe (2018): Nach bösem Witz bei der „heute-show“ im ZDF: So schlecht ist die Luft in Essen, online im Internet unter: <https://www.derwesten.de/staedte/essen/witz-heute-show-zdf-luft-essen-gladbecker-strasse-224-id214421115.html>, Stand: 28.03.24, 13:30 Uhr.
- Gorbachevskaya, O. & Herfort, S. (IASP) (2012): Feinstaubbindungsvermögen der für Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen, online im Internet unter: <https://www.gebaeudegruen.info/service/downloads/fbb-untersuchungen/>, Stand: 18.02.2019, 9:00 Uhr.
- Green City e.V. (2015): Vorteile der Gebäudebegrünung. Übersicht für die Münchner Stadtgesellschaft. 2. Auflage. Ulenspiegel Druck GmbH & Co. KG, Andechs.
- Hansen, P.-D., Meyer, A., Gabriel, B. & vom Lehn, R. (2019): Einfluss von Bauwerksbegrünung und Wohnumfeldgrün auf die menschliche Gesundheit. In: Lozàn, J. L., Breckle, S., Grassl, H., Kuttler, W., & Matzarakis, A. (Hrsg.), Warnsignal Klima: Die Städte (S. 128–135). Wissenschaftliche Auswertungen.
- Hawa Dawa GmbH (2019): Hawa Dawa Messbox zur Luftqualitätsmessung. Installation Manual. Revision 2. München.
- Hawa Dawa GmbH (2020): Angebot für die Bereitstellung von 5 IoT Messgeräten für den Zeitraum von 12 Monaten.
- Heinze, S. & Fiedler, B. (1992) in Thönnessen, M. (2002): Elementdynamik in fassadenbegrünendem Wilden Wein (*Parthenocissus tricuspidata*). 1. Auflage. Geographisches Institut, Köln.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2007): Feinstaub (PM10). Eigenschaften – Quellen – gesundheitliche Bewertung – Immissionen.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2024): Umweltmesswerte in Hessen, online im Internet unter: <https://www.hlnug.de/messwerte/datenportal>, Stand: 03.01.2024, 05:30 Uhr.

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (Hrsg.) (2020): Lufthygienischer Jahresbericht 2019, online im Internet unter: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/jahresberichte/2019/Lufthygienischer_Jahresbericht_2019.pdf, Stand: 04.04.2024, 16:00 Uhr.

ICL Deutschland Vertriebs GmbH (2021): Das Osmocote Düngesystem. Sicher, erfolgreich und nachhaltig kultivieren.

ICL Deutschland Vertriebs GmbH (2024): Handbuch für den Gartenbau. Produktkatalog und Fachinformation, online im Internet unter: <https://hubby.icl-group.com/m/3b0ef603e1d35c13/original/Handbuch-fur-den-Gartenbau.pdf>, Stand: 23.03.2024, 06:00 Uhr.

Initiative Essbares Darmstadt (Hrsg.) (2021): Der „Grüne Citytunnel“, online im Internet unter: <https://essbares-darmstadt.de/entwurf-fuer-den-grueenen-citytunnel/>, Stand: 28.03.24, 10:00 Uhr.

Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte (IASP) (2007): Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen. Berlin.

Institut für Steinkonservierung e.V. (IFS) (2015): Baudenkmäler unter dem Einfluss verkehrsbedingter Immissionen. IFS Bericht 49/2015, Mainz.

Köhler, M. (1993). Fassaden- und Dachbegrünung. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

Köhler, M. (Hrsg.) (2022): Handbuch Bauwerksbegrünung. 2. Auflage. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln.

Krahl, J. (2019): Persönliche Mitteilung zu den Anordnungen der Messgeräte und dem Versuchsaufbau (10.10.2019, Lemgo).

Krauter, R. (2019): Stickoxide und Feinstaub. Fehlgeleitete Debatte um Luftschadstoffe. In: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbh, online im Internet unter: <https://www.spektrum.de/kolumne/stickoxiden-und-feinstaub-fehlgeleitete-debatte-um-luftschadstoffe/1620484>, Stand: 27.03.24, 10:30 Uhr.

Kuttler, W. (2010): Urbanes Klima. Teil 2, in: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, Umweltmeteorologie, in Pfoser (2018): Vertikale Begrünung. Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden/Bodenwasseranschluss. 1. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

Landesanstalt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (Hrsg.) (2024): Messorte der Luftqualitätsüberwachung in NRW, online im Internet unter: <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/luft/immissionen/messorte-und-werte>, Stand: 03.04.2024, 17:00 Uhr.

Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (2024): Begriffsbestimmungen, online im Internet unter: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/begriffsbestimmung>, Stand: 24.03.24, 06:30 Uhr.

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsg.) (2017): Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011. Ein Vergleich mit

- einem eignungsgeprüften Feinstaubanalysator, Karlsruhe.
- Landesgesundheitsamt des Landes Baden-Württemberg (LGA) (2024): Gesundheitliche Folgen. Was sind gesundheitliche Folgen von Hitze?, online im Internet unter: <https://www.gesundheitsamt-bw.de/lga/de/themen/gesundheit-umwelt/gesundheit-hitze/gesundheitliche-folgen/#:~:text=Überhitzung%2C%20Wasser%2D%20und%20Elektrolytverlust%20belasten,Frühgeburtsraten%20erhöhen%20sich%20bei%20Hitze,wellen,Stand:24.02.2024,15:30%20Uhr.>
- Lin, L., Yan, J., Ma, K., Zhou, W., Chen, G., Tang, R. & Zhang, Y. (2017): Characterization of particulate matter deposited on urban tree foliage: A landscape analysis approach. In: *Atmospheric Environment*, Vol. 171, S. 59-69.
- Lin, M.-Y., Hagler, G., Baldauf, R., Isakov, V., Lin, H.-Y. & Khlystov, A. (2016): The effects of vegetation barriers on near-road ultrafine particle number and carbon monoxide concentrations. In: *Science of the Total Environment*, Vol. 553, S. 372-379.
- Lingen, K. & Schneider, F. (2021): Luftschadstoffreduzierende vertikale Begrünung für den Citytunnel Darmstadt. Konzeptpapier. 1. Fassung. September 2019.
- Litschike, T. & Kuttler, W. (2008): On the reduction of urban particle concentration by vegetation – A review. In *Meteorologische Zeitschrift*, Jhg. 17 Nr. 3, S. 229-240.
- Lorenz, A. (2022): Nur wenige wissen: Darum darf auch beim Waldspaziergang die Sonnencreme nicht fehlen. In: *Merkur.de*, online im Internet unter: <https://www.merkur.de/verbraucher/uv-strahlen-wald-gefahr-sonnenschutz-haut-krebs-licht-schatten-sonne-augen-gesundheit-wandern-91714017.html>, Stand: 24.03.24, 06:00 Uhr.
- Magistrat der Stadt Frankfurt (Hrsg.): Gesunde Städte-Netzwerk der Bundesrepublik Deutschland. Das 9-Punkte Programm, online im Internet unter: <http://gesunde-staedte-netzwerk.de/9-punkte-programm/>, Stand: 27.03.24, 10:30 Uhr.
- Magistrat der Stadt Wien (Hrsg.) (2013): Leitfaden Fassadenbegrünung. 1. Ausgabe. Astoria Druckzentrum GmbH, Wien.
- Milnikel, C. (2022): Unterschätzte Pflanzen. Wie Moose Schadstoffe aus der Luft filtern. In: *Quarks*, online im Internet unter: <https://www.quarks.de/umwelt/wie-moose-schadstoffe-aus-der-luft-filtern/>, Stand: 28.03.24, 10:00 Uhr.
- Naturkapital Deutschland – TEEB DE (2015): Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte. Hrsg. von Volkmar Hartje, Henry Wüstemann und Aletta Bonn. Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ. Berlin, Leipzig.
- Neher, P. (2022): Fallstudien zu Stickstoffdioxid und Feinstaub. Untersuchung und Vergleich verschiedener Pflanzenarten und Dachflächen im urbanen Raum, Tübingen.
- Neue Zürcher Zeitung (NZZ) (Hrsg.) (2006): Filterwirkung der Nase, online im Internet unter: <https://www.nzz.ch/articleDJNI8-Id.33831>, Stand: 27.03.24, 10:00 Uhr.
- Palas GmbH (2023): Palas Fidas Frog, online im Internet unter: <https://www.palas.de/product/fidas200?save=accept>, Stand: 28.03.24, 10:15 Uhr.
- Particle Vision GmbH (2020): Charakterisierung und Herkunftsbestimmung von Grobstaubpartikeln im PM10. REM/EDX Einzelpartikelanalytik an den NABEL-Standorten Bern Bollwerk und Zürich Kaserne, Fribourg.

- Particle Vision GmbH (2024): Borsubstrate für REM-EDS Mikroanalysen, online im Internet unter: https://www.particle-vision.ch/images/pdf/PV_Bor-substrate.pdf, Stand: 04.04.2024, 16:00 Uhr.
- Passam AG (2012): Kurzzeit Passivsammler für Stickstoffdioxid, online im Internet unter: https://www.passam.ch/wp-content/uploads/2020/01/de_NO2st.pdf, Stand: 28.03.24, 14:00 Uhr.
- Pfoser, N. (2016): Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung, Darmstadt.
- Pfoser, N. (2018): Vertikale Begrünung. Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/Bodenanschluss. 1. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Pfoser, N. (2023): Grüne Fassaden. 1. Auflage. Detail Business Information GmbH, München.
- Rain Pro (2023): Micro- und Tropfbewässerung, online im Internet unter: <https://www.rainpro.de/downloads>, Stand: 23.03.2024, 07:00 Uhr.
- Ratmann, M. (2023): Winziges Wäldchen an Essens Hauptverkehrsader sorgt für Streit. In: [wa.de](https://www.wa.de/nordrhein-westfalen/essen/essen-stadtzentrum-streit-gruene-bv-politik-natur-wald-gruenflaeche-nrw-92105450.html), online im Internet unter: <https://www.wa.de/nordrhein-westfalen/essen/essen-stadtzentrum-streit-gruene-bv-politik-natur-wald-gruenflaeche-nrw-92105450.html>, Stand: 24.03.24, 10:00 Uhr.
- Reikowski, K. (2023): 15-Minuten-Städte: Was dahinter steckt. In: Frankfurter Rundschau.
- Reznik, G. & Schmidt, E. (2008): Abscheidung von Feinstaub an Pflanzen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. In *Chemie Ingenieur Technik*, Jhg. 80 Nr. 12, S. 1849-1853.
- Riechel, M. et al. (2015): Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwasseranalyse. Austrag und Rückhalt von Mecoprop durch Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung (Plakat auf Konferenz Aqua Urbanica 2015), online im Internet unter: https://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/oekologisches_bauen/download/modellvorhaben/kuras_dach-biozid_mecoprop.pdf, Stand: 23.03.24, 11:30 Uhr.
- Röber, R. & Schacht, H. (Hrsg.) (2008): Pflanzenernährung im Gartenbau. 4. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Schlößer, S. A. (2003): Zur Akzeptanz von Fassadenbegrünung: Meinungsbild Kölner Bürger – eine Bevölkerungsbefragung (Dissertation). Universität Köln, Köln.
- Schmidt, M. (2023): Die Notwendigkeit, Gebäude zu begrünen – Stadtklimatische, bauphysikalische und energetische Vorteile der Gebäudebegrünung (Präsentation RAL Seminar), Bonn.
- Schubert, S. (2018): Pflanzenernährung. 3. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Science Media Center Germany (SMC) (2017): Wie werden Grenzwerte für Luftschadstoffe wie Feinstaub und Stickoxide festgelegt?, online im Internet unter: <https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/fact-sheet/details/news/wie-werden-die-grenzwerte-fuer-luftschadstoffe-wie-feinstaub-und-stickoxide-festgelegt/>, Stand: 24.03.24, 07:00 Uhr.
- Sempel, F., Gorbachevskaya, O., Mewis, I. & Ulrichs, C. (2013): Modellversuch zur Feinstaubbindung: extensive Dachbegrünung vs. Schotterdach. In: *Journal of Crop Health*, Jhg. 65, S. 113-118.
- Siemsen, M. & Lasak, K. (2023): Produktinformation Moosvegetation, online im Internet unter: [172](https://veg-</p>
</div>
<div data-bbox=)

- sys.de/Infopdf/Infoblatt %20SL %20 600.pdf, Stand: 23.03.24, 10:00 Uhr.
- Speak, A., Rothwell, J. J., Lindley, S. J. & Smith, C.L. (2012): Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. In: Atmospheric environment, Vol. 61, S. 283-293.
- Statista Research Department (2018): Anteil der Bevölkerung in Städten weltweit von 1985 bis 2015 und Prognose bis 2050, online im Internet unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37084/umfrage/anteil-der-bevoelkerung-in-staedten-weltweit-seit-1985/>, Stand: 18.02.2024, 9:00 Uhr.
- Stiftung Die grüne Stadt (Hrsg.) (2009): Gesundes Grün. Die Wirkung von Pflanzen auf unser Wohlbefinden. 1. Auflage., SZ-Druck, Sankt Augustin.
- Systea Pohl GmbH (2015): UBE: Unterkonstruktion für die verdeckte Befestigung großformatiger Fassadentafeln und Natursteinplatten mittels rückseitiger Agraffen.
- Thielen, S. (2018): Pilotstudie Mooswand. Untersuchung der Wirkung von Moosen auf die Feinstaubbelastung in Innenstädten am Beispiel von Stuttgart. Endbericht über die biologische Begleitung der Pilotstudie. Staatliches Museum für Naturkunde, Stuttgart.
- Thönnessen, M. (2002): Elementdynamik in fassadenbegrünendem wildem Wein. Kölner Geographische Arbeiten, Heft 78, Köln.
- Thönnessen, M. (2006): Feinstaub und Vegetation – Die EU-Feinstaubverordnung als Impuls für mehr Grün in den Städten. Das Taspo Magazin 3, S. 8-11.
- Tomik, S. (2019): Lungenärzte für Luftreinhaltung. Grenzwerte aber umstritten. In Frankfurter Allgemeine Zeitung, online im Internet unter: <https://www.faz.net/aktuell/politik/inland/hunderte-lungenaerzte-fuer-luftreinhaltung-grenzwerte-aber-umstritten-16008522.html>, Stand: 18.02.2019, 9:00 Uhr.
- TSI GmbH (2023): Aerosolmonitor 8534 Dusttrak DRX, online im Internet unter: <https://tsi.com/produkte/aerosol-und-staubmonitore/flachenaerosolmonitore/aerosolmonitor-8534-dusttrak-drx/>, Stand: 28.03.24, 12:15 Uhr.
- Umweltbundesamt (2021): Naturbasierte Lösungen für klimaresiliente europäische Städte, online im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/naturbasierte-loesungen-fuer-klimaresiliente#undefined>, Stand: 22.03.24, 19:30 Uhr.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (1982): Ökologisches Bauen. Bauverlag GmbH, Wiesbaden/Berlin.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2019): Schwerpunkt. Gesunde Luft. In: Das Magazin des Umweltbundesamtes, online im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schwerpunkt-1-2019-gesunde-luft#:~:text=Das%20Magazin%20%22Schwerpunkt%22%20des%20Umweltbundesamtes,gehört%20hinein%20und%20was%20nicht%3F>, Stand: 27.03.24, 11:00 Uhr.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2013): Wie entsteht Ozon?, online im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-entsteht-ozon#:~:text=Ozon%20wird%20nicht%20direkt%20freigesetzt,deshalb%20als%20sekundärer%20Schadstoff%20bezeichnet>, Stand: 27.03.24, 10:00 Uhr.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020): FAQ: Auswirkungen der Corona-Krise auf die Luftqualität, online im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/faq-auswirkungen-der-corona-krise-auf-die-welche-auswirkungen-hat-die-corona-krise-auf-die-luftqualitat->, Stand:

01.04.2024, 20:00 Uhr.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022): Zusammenhang von Emission, Wetter und Luftschadstoffkonzentration, online im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftqualitaet/zusammenhang-von-emission-wetter#vorherrschende-wetterbedingungen>, Stand: 28.03.24, 10:45 Uhr.
Umweltbundesamt (Hrsg.): Einträge von Luftschadstoffen, online im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/daten-karten/eintraege-von-schadstoffen#was-ist-deposition>, Stand: 27.03.24, 11:30 Uhr.

Umweltbundesamt (Hrsg.): Feinstaub-Belastung, online im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung#-feinstaubkonzentrationen-in-deutschland>, Stand: 27.03.24, 11:30 Uhr.

Umweltbundesamt Österreich (2023): Begriffsbestimmungen, online im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.at/umwelthemen/luft/luftschadstoffe>, Stand: 05.09.2023, 05:00 Uhr.

Verband Deutscher Ingenieure (VDI) (2009): VDI 3867. Automatische Messeinrichtungen zur Überwachung der Luftqualität.

Verband Deutscher Ingenieure (VDI) (2013): VDI 2119 Messen von Immissionen.
Probenahme von atmosphärischen Partikeln > 2,5 µm auf einer Akzeptorfläche mit dem Passivsammler Sigma-2. Lichtmikroskopische Charakterisierung sowie Berechnung der Anzahlsedimentationsrate und der Massenkonzentration.

Verband Deutscher Ingenieure (VDI) (2019): VDI 4202 Messen von Partikeln in der Außenluft Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung von Aerosolen Grundlagen.

Vertiko GmbH (2019): Wartungspro-

tokoll für die fachgerechte Pflege und Wartung einer Vertiko Living Wall. 2019, Buchenbach.

Vertiko GmbH (2022): Persönliche Mitteilung von Stefan Brandhorst Vertiko GmbH, 17. September 2022.

Vertiko GmbH (2022): Seminar zur Pflege und Wartung von Fassadenbegrünungen. 2022, Buchenbach.

Viering, K. (2019) in Helmholtz Institut (Hrsg.): Erde und Umwelt. Schadstoffe. Es liegt was in der Luft. 31.05.2019, online im Internet unter: <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/es-liegt-was-in-der-luft/>, Stand: 27.03.24, 12:00 Uhr.

Vieweg, C. (2017): Feinstaub. Die Motoren sind nicht das Problem. In: Zeit Online, online im Internet unter: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2017-02/feinstaub-motoren-luftverschmutzung-reifen-abrieb-bremsen>, Stand: 27.03.24, 15:00 Uhr.

Vogt, U. (2018): Pilotstudie Mooswand. Untersuchung der Wirkung von Moosen auf die Feinstaubbelastung in Innenstädten am Beispiel von Stuttgart. Abschlussbericht. Universität Stuttgart, Stuttgart.

Vogt, U. (2020): Persönliche Mitteilung zu den Herausforderungen der Umweltparameter bei Messungen zur Reduzierung von Luftschadstoffen durch Vegetationsträger, Höxter.

WIHO Industrial & Material Co. Ltd. (2022): Warum ist Ammoniak nicht mit Kupfer kompatibel?, online im Internet unter: <https://wihometals.com/de/why-ammonia-is-not-compatible-with-copper/>, Stand: 23.03.2024, 07:00 Uhr.

Wong, N. H., Tan, A., Tan, P., Chiang, K. & Wong, N. C. (2010): Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. In: Building and Environment, Vol. 45 No. 2, S. 411-420.

World Health Organization (WHO) (1946) in Stiftung Die grüne Stadt (Hrsg.) (2009): Gesundes Grün. Die Wirkung von Pflanzen auf unser Wohlbefinden. 1. Auflage. SZ-Druck, Sankt Augustin.

World Health Organization (WHO) (Hrsg.) (2019): Fast 600 000 Todesfälle in Europa jährlich wegen Luftverschmutzung: neuer Bericht des WHO-Hauptbüros, online im Internet unter: <http://www.euro.who.int/de/health-topics/environment-and-health/air-quality/news/news/2014/03/almost-600-000-deaths-due-to-air-pollution-in-europe-new-who-global-report>, Stand: 19.02.24, 10:00 Uhr.

World Health Organization (WHO) (Hrsg.): Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data, online im Internet unter: <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>, Stand: 27.03.24, 11:30 Uhr.

9.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchswand wandgebundene Begrünung im Citytunnel in Darmstadt (van Lier 2024).

Abbildung 2: Aufbau und Inhalt der Arbeit (van Lier 2024).

Abbildung 3: Formen der Fassadenbegrünung, typische Merkmale (Pfoser 2018).

Abbildung 4: Zeichnung der Komponenten einer wandgebundenen Begrünung. (Vertiko GmbH 2023, geändert).

Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Bewässerungsanlage (Vertiko GmbH 2016).

Abbildung 6 (oben): Troggebundene Begrünung an einem Servergebäude in Frankfurt. (van Lier 2023).

Abbildung 7 (unten): Innenhof der Calwer Passage in Stuttgart. Die Kletterpflanzen erzeugen Atmosphäre und sorgen für Raumbildung (van Lier 2023).

Abbildung 8 (rechts): Wandgebundene Begrünung mit Trogsystem an der Calwer Passage in Stuttgart (van Lier 2023).

Abbildung 9 (oben): Wandgebundene Begrünung in modularer Bauweise an der Gladbecker Straße in Essen (van Lier 2022).

Abbildung 10 (Mitte): Wandgebundene Innenraumbegrünung in modularer Bauweise in Arnhem (NL) (van Lier 2022).

Abbildung 11 (unten): Wandgebundene Begrünung in flächiger Bauweise, Projekt Q8 am Neckarpark in Stuttgart (van Lier 2022).

Abbildung 12 (links): Wandgebundene Begrünung in modularer Bauweise, Energieversorger Enni Moers (van Lier 2022).

Abbildung 13: Übersicht zur Systematik unterschiedlicher Bauweisen wandgebundener Begrünungen und die Integration verschiedener Vegetationsschichten (in Anlehnung an Pfoser 2018).

Abbildung 14: Gesundheitliche Folgen von Hitze (LGA Baden-Württemberg 2024, geändert).

Abbildung 15: Atmungsorgane des Menschen – der Weg der Luft in den Körper (Blech 2023, geändert).

Abbildung 16: Depositionsregion von Partikeln im menschlichen Körper in Abhängigkeit von ihrem aerodynamischen Durchmesser (HLNUG 2007, geändert).

Abbildung 17: Gesundheitsfördernde Wirkungen von Grün, unterschieden nach Arten von Grünanlagen (Stiftung Die grüne Stadt (Hrsg.) 2009).

Abbildung 18: Chemische Zusammensetzung der Luft (DWD 2014).

Abbildung 19: Feinstaub (PM10)-Emissionen nach Verursacher in Deutschland (UBA (Hrsg.), eigene Darstellung).

Abbildung 20: Stickoxid-Emissionen nach Quelle in Deutschland im Jahr 2016 (Statista 2019, geändert).

Abbildung 21 (oben): Ungereinigte Blattoberfläche von *Parthenocissus tricuspidata* (Akkumulator) im Oktober (Thönnessen/Hellack 2005).

Abbildung 22 (unten): Ungereinigte Blattoberfläche von *Platanus x hispanica* (Selbstreiniger) im Oktober (Thönnessen/Hellack 2005).

Abbildung 23: Verschiedene Austauschszenarien von Luftmassen bei unterschiedlichen Bepflanzungen. Links: dichtkronige Allee, rechts: Fassadenbegrünung. (Floh 2010).

Abbildung 24 (oben): Prinzip eines Stickstoffdioxid-Passivsammlers mit zylindrischem Röhrchen (Passam AG 2012).

Abbildung 25 (unten): Kleine Ausführung eines Passivsammlers für Stickstoffdioxid (Passam AG 2012).

Abbildung 26 (oben): Partikelabscheidkopf, Schnittansicht (Vogt 2018).

Abbildung 27 (unten): Aufbau eines optischen Aerosolspektrometers (VDI 3867 2009).

Abbildung 28: Eingesetzter Sigma-2 Passivsammler im Citytunnel Darmstadt (van Lier 2022).

Abbildung 29 (oben): Partikelagglomerat auf der Blattoberfläche von *Bergenia cordifolia* 'Baby Doll' (van Lier 2022).

Abbildung 30 (Mitte): Agglomeratbildung auf der Blattoberseite von *Bergenia cordifolia* 'Baby Doll' (van Lier 2022).

Abbildung 31 (unten): Darstellung einer Blattoberfläche von *Bergenia cordifolia* 'Baby Doll' nach dem Waschvorgang im Ultraschallbecken für ein Zeitintervall von 15 Minuten (van Lier 2022).

Abbildung 32: Verwendung eines Zeiss GeminiSEM 300 zur morpho-chemischen Partikelanalyse (van Lier 2022).

Abbildung 33: Schematische Darstellung einer Bestäubungsanlage zur Bestäubung von Pflanzen und anderen Oberflächen (Reznik 2012).

Abbildung 34: Versuch zur Bindung von Feinstaub durch Dachbegrünungsvegetationsmatten in einer Messkammer mit ausgerichteten Partikelmessgeräten (Gorbachevskaya 2013).

Abbildung 35: Hobo Datenlogger mit Alarm LED, Status LED, Start-Taste und Montagelöchern, Erfassung der relativen Feuchte und der Temperatur (van Lier 2022).

Abbildung 36: Übersicht der HOBO-mobile App (van Lier 2022).

Abbildung 37: Installierter Sigma-2-Passivsammler im Citytunnel Darmstadt (van Lier 2022).

Abbildung 38: Technische Zeichnung der Hawa Dawa Messbox (Hawa Dawa 2019).

Abbildung 39: Seitliche Ansicht einer montierten Hawa Dawa Messbox in der Gladbecker Straße in Essen.

Abbildung 40: Zeitrafferkamera Brinno BCC2000 mit Wetterschutzgehäuse und verstellbarer Klemmhalterung (Brinno 2022).

Abbildung 41 (links): Cranked-Wires-Methode zur Messung des Längenzuwachses von Moosen nach Russell 1984 (in Thielen 2018).

Abbildung 42 (rechts): Aufgedrehte Rändelmutter auf Schraubengewinde zur Wachstumsmessung nach Cranked-Wires-Methode (van Lier 2022).

Abbildung 43 (unten): Integration des Dust Trak DRX in die Messkammer (van Lier, 2022).

Abbildung 44: Räumliche Übersicht der Versuchsflächen (Google Maps, geändert).

Abbildung 45: Übersicht Citytunnel Darmstadt mit Kennzeichnung der Ein- und Ausgänge (Google Earth, geändert).

Abbildung 46: Technische Zeichnung der Begrünung im Citytunnel Darmstadt mit den vierunterschiedlichen Bauweisen der Begrünung (Vertiko GmbH 2020, geändert).

Abbildung 47: Bepflanzungsplan Bereich 1 Begrünung Citytunnel Darmstadt (Vertiko GmbH 2020).

Abbildung 48: Konzentrationsverlauf der acht Messpunkte im Rahmen der Rastermessung am Tunnelportal Hügelsstraße in Darmstadt. Zu erkennen sind die acht Messpunkte im Verlauf der Jahresmessung sowie der Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ (Föll 2016; geändert).

Abbildung 49: Verortung der Hawa Dawa Messgeräte im Citytunnel (van Lier 2022).

Abbildung 50: Verortung der Sigma-2 Passivsammler im Citytunnel (van Lier 2022).

Abbildung 51: Passivsammler DS1 (oben) und DS2 (unten) (van Lier 2022).

Abbildung 52: Passivsammler DS3 (van Lier 2022).

Abbildung 53: Montage des Messgerätes HDD174 im mittleren Bereich des Citytunnels (van Lier 2022) (van Lier 2022).

Abbildung 54: Montiertes Messgerät HDD169 vor der Begrünung zwischen Bereich 1 und Bereich 2 (van Lier 2022).

Abbildung 55: Montage des Messgerätes HDD172 im Eingangsportale „Rheinstraße“ des Citytunnels (van Lier 2022).

Abbildung 56: Ursprünglicher Standort für die Zeitrafferkamera (pink gekennzeichnet) (van Lier 2022).

Abbildung 57: Standort für die Zeitrafferkamera (pink gekennzeichnet) (van Lier 2022).

Abbildung 58: Anordnung der Messpunkte zur Wachstumsmessung von Moosen nach der Cranked-Wires-Methode (van Lier 2022).

Abbildung 59: Übersicht Straßenabschnitt Gladbecker Straße (Google Earth).

Abbildung 60: Montage einer vorkultivierten Gabione an der Fassade Gladbecker Straße (van Lier 2022).

Abbildung 61: Montage der Fassadenbegrünung Gladbecker Straße. Paralleles Arbeiten mit mehreren Hebe-Arbeitsbühnen (van Lier 2022).

Abbildung 62: Planung der Begrünung an der Gladbecker Straße 250-256 in Essen mit Nummerierung, geändert (Quelle Allbau).

Abbildung 63 (links): Sigma-2 Passivsammler ES1 vor der Putzfassade (van Lier 2022).

Abbildung 64 (rechts): Sigma-2 Passivsammler ES2 vor der Begrünung (van Lier 2022).

Abbildung 65: Verortung der Sigma-2 Passivsammler und Hawa Dawa Messgeräte an der Fassade Gladbecker Straße 250-256, Essen.

Abbildung 66 (oben): Montiertes Messgerät HDE 173 vor der Begrünung B5 (van Lier 2022).

Abbildung 67 (unten): Montiertes Messgerät HDE 176 vor der Begrünung zwischen B6 und B7 (van Lier 2022).

Abbildung 68 (oben): 1 m³-Plexiglas-kammer mit integriertem Ventilator (van Lier 2022).

Abbildung 69 (unten, links.): Sedum-Matte mit unterschiedlichen Sedum-Arten (van Lier 2022).

Abbildung 70 (unten, Mitte): Textilgebundene wandgebundene Fassadenbegrünung Vertiko GmbH; Bepflanzung mit unterschiedlichen Stauden (Aufnahme zum Zeitpunkt unmittelbar nach der Bepflanzung) (van Lier 2022).

Abbildung 71 (unten, rechts): Racomitrium-dominierte Moosmatte (van Lier 2022).

Abbildung 72: Messkammer mit aufgestelltem Messgerät und eingesetztem Vegetationselement (van Lier 2022).

Abbildung 73: Beispielhafte automatische Bilderstellung mit Keyence VHX-7000. Durch die Veränderung der Kontrastwerte (oben) können Partikel exakt klassifiziert werden (van Lier 2022).

Abbildung 74: Haftoberfläche mit verschiedenen Substraten (Bor: unten rechts, C-Pad: oben rechts und Glasoberfläche: links) (Particle Vision GmbH 2020).

Abbildung 75: Euzentrischer Tisch des Zeiss Gemini SEM 300 (van Lier 2022).

Abbildung 76: Filtration der Flüssigkeit aus dem Ultraschallreinigungsbecken (van Lier 2022).

Abbildung 77: Negativer Ausschnitt der Untersuchungsfläche auf der Oberseite von *Bergenia Hybr.* „Baby Doll“ (van Lier 2022).

Abbildung 78: Vorbereitung der Bor-Substrate zur Untersuchung im Zeiss Gemini SEM 300 (van Lier 2022).

Abbildung 79: Vergleich der Luftfeuchtigkeit an den drei Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“ und HDD 174 „Eingangsportale“ im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands (1,5*IQR) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 80: Vergleich der Lufttemperatur an den drei Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“ und HDD 174 „Eingangsportale“ im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen

Interquartilabstands (1,5*IQR) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 81: Vergleich der Luftfeuchtigkeit an den vier Standorten HDE 173 „Begrünung“, HDE 176 „Putzfassade“, HLE „Begrünung“ und HLE „Putzfassade“ im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands (1,5*IQR) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 82: Vergleich der Lufttemperatur an den vier Standorten HDE 173 „Begrünung“, HDE 176 „Putzfassade“, HLE „Begrünung“ und HLE „Putzfassade“ im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands (1,5*IQR) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 83: Vergleich der NO₂-Konzentrationen an den drei Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“ und HDD 174 „Eingangsportale“ im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands (1,5*IQR) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 84: Vergleich der NO₂-Konzentrationen an den zwei Standorten HDE 173 „Begrünung“ und HDE 176 „Putzfassade“, im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands (1,5*IQR) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 85: Vergleich der PM₁₀-Konzentrationen an den vier Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“, HDD 174 „Eingangsportale“ und Messstation „Darmstadt Hügelstraße“, im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahres-

grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 86: Vergleich der PM10-Konzentrationen an den vier Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“, HDD 174 „Eingangportal“ und Messstation „Darmstadt Hügelstraße“ als Säulendiagramm, im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 87: Vergleich der PM2,5-Konzentrationen an den vier Standorten HDD 169 „Begrünung“, HDD 172 „Mitte Citytunnel“, HDD 174 „Eingangportal“ und Messstation „Darmstadt Hügelstraße“, im Zeitraum vom 22. März 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 88: Vergleich der PM10-Konzentrationen an den zwei Standorten HDE 173 „Begrünung“ und HDE 176 „Putzfassade“, im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 89: Vergleich der PM2,5-Konzentrationen an den zwei Standorten HDE 173 „Begrünung“ und HDE 176 „Putzfassade“, im Zeitraum vom 15. Mai 2021 bis zum 25. März 2022. Zusätzlich wurde der Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingezeichnet. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert (van Lier 2022).

Abbildung 90: Vergleich der Anzahl sedimentationsrate an den vier

Standorten DS1 (Begrünung oben), DS2 (Begrünung unten), DS3 (Mitte Citytunnel) und DS 4 (Ende Citytunnel), im Zeitraum vom 1. April 2021 bis zum 26. März 2022 (van Lier 2022).

Abbildung 91: Vergleich der Anzahl sedimentationsrate an den zwei Standorten in Essen: ES1 (Begrünung) und ES2 (Fassade), im Zeitraum vom 31. Mai 2021 bis zum 29. März 2022 (van Lier 2022).

Abbildung 92: Hochauflösendes REM-Aufnahme der Blattoberfläche einer *Bergenia cordifolia* ‘Baby Doll’, vor dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken; Markierung der vier häufigsten Partikelgruppen: Reifenabrieb, mineralische Partikel, biogene Partikel und metallische Partikel; Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt; kein Maßstab (van Lier 2022).

Abbildung 93: Morpho-chemische Partikelanalyse der DS1-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 30.06.2021 bis 26.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2022).

Abbildung 94: Morpho-chemische Partikelanalyse der DS2-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 30.06.2021 bis 26.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2022).

Abbildung 95: Graphische Darstellung (Heatmap) der chemischen Zusammensetzung von DS2 im Zeitraum vom 30.06.2021 bis 26.07.2021. Die Partikel sind nach morpho-chemischen Gruppen zugeordnet; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2022).

Abbildung 96: Morpho-chemische Partikelanalyse der DS3-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 30.06.2021

bis 26.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2022).

Abbildung 97: Morpho-chemische Partikelanalyse der DS4-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 30.06.2021 bis 26.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2022).

Abbildung 98: Morpho-chemische Partikelanalyse der ES1-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 29.06.2021 bis 25.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2022).

Abbildung 99: Morpho-chemische Partikelanalyse der ES2-Probe im Sigma-2 Sammler im Zeitraum vom 29.06.2021 bis 25.07.2021. Cm = Massenkonzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; ECDMicron = Partikeldurchmesser in Mikrometer; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2022).

Abbildung 100: Graphische Darstellung (Heatmap) der chemischen Zusammensetzung von ES1 im Zeitraum vom 06.06.2021 bis 25.07.2021. Die Partikel sind nach morpho-chemischen Gruppen zugeordnet; Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2022).

Abbildung 101: Hochauflösende REM-Aufnahme der Blattoberfläche von *Bergenia cordifolia* 'Baby Doll', vor dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken, Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt; Maßstab = 100 μg (van Lier 2022).

Abbildung 102: Einzelpartikelanalyse eines thermisch geformten Bremspartikels. Hauptbestandteile sind Eisen, Kohlenstoff und Sauerstoff

(van Lier 2022).

Abbildung 103: Hochauflösende REM-Aufnahme der Blattoberfläche von *Geranium macrorrhizum* 'Baby Doll' vor dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken, Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt. Partikelanalyse eines thermisch geformten Bremspartikels; Maßstab = 100 μg (van Lier 2022).

Abbildung 104: Hochauflösende REM-Aufnahme der Blattoberfläche einer *Bergenia cordifolia* 'Baby Doll', nach dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken, Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt (ohne Maßstab) (van Lier 2022).

Abbildung 105: Hochauflösende REM-Aufnahme der Blattoberfläche einer *Bergenia cordifolia* 'Baby Doll', nach dem Abwaschverfahren im Ultraschallbecken, Blattprobe aus Citytunnel Darmstadt (ohne Maßstab) (van Lier 2022).

Abbildung 106: Gegenüberstellung der Vitalitätsauswertung durch Flächenanalyse des Deckungsgrads bei Begrünung mit Stauden (van Lier 2022).

Abbildung 107: Pflanzendeckungsgrad der beiden Vegetationsflächen mit Stauden über eine Vegetationsperiode im Citytunnel Darmstadt (van Lier 2022).

Abbildung 108 (links oben): Perspektive der Zeiträfferkamera. Stauden zeigen eine gesunde Blattfärbung und eine gute Entwicklung unter den Beleuchtungsbedingungen im Citytunnel (van Lier 2022).

Abbildung 109 (links Mitte): Entwicklung von *Heuchera villosa* var. *macrorrhiza* und gleichzeitige Verschattung der unteren Bereiche durch ausgeprägte Triebbildung (van Lier 2022).

Abbildung 110 (links unten): Starke Jungtriebbildung bei *Heuchera sanguinea* 'Paris' (van Lier 2022).

Abbildung 111 (rechts oben): Die Ausscheidungen der Blattläuse (Honigttau) ist auf einigen Blattoberseiten deutlich erkennbar. Durch die klebrige Oberfläche haften mehr Partikel an der Oberfläche, was zu einer sichtbaren Belegung der Blätter führt (van Lier 2022).

Abbildung 112 (rechts unten): Junge Blattläuse häuten sich während ihrer Wachstumsphase mehrfach. Die weißen Häute haften an den Blattstielen und Blättern an (van Lier 2022).

Abbildung 113 (oben): Seitliche Aufnahme der Moosbegrünung im Citytunnel Darmstadt (van Lier 2022).

Abbildung 114 (unten): Aufnahme der Moosflächen im Citytunnel Darmstadt am 10. November 2021; im oberen Bereich befinden sich Hypnum-Moosmatten, im unteren Bereich wurden Racomitrium-Moosmatten installiert (van Lier 2022).

Abbildung 115: Gegenüberstellung der Vitalitätsauswertung durch Flächenanalyse des Deckungsgrads bei Begrünung mit Moosen (van Lier 2022).

Abbildung 116 (oben): Bildung von Fäulnisprozessen aufgrund von Überbewässerung im unteren Bereich (van Lier 2022).

Abbildung 117 (Mitte): Beleuchtungseinrichtung der Moosflächen im verschatteten Bereich und Bewässerung mit Sprühregnern (van Lier 2022).

Abbildung 118 (unten): Streifenförmiges Bild aufgrund von ungleichmäßiger Bewässerung (van Lier 2022).

Abbildung 119: Pflanzendeckungsgrad der beiden Vegetationsflächen mit Moosen (halbe Flächen) über eine Vegetationsperiode im Citytunnel Darmstadt.

Abbildung 120: Pflanzendeckungsgrad der beiden Vegetationsflächen mit Moosen (volle Flächen) über eine

Vegetationsperiode im Citytunnel Darmstadt (van Lier 2022).

Abbildung 121 (oben): Aufnahme eines Triebes von *Racomitrium canescens* (van Lier 2023).

Abbildung 122 (unten): Aufnahme einer Triebspitze von *Racomitrium canescens* (van Lier 2023).

Abbildung 123: Messung der Wuchshöhe an den Messpunkten auf der Moosfläche nach der Cranked-Wires-Methode (van Lier 2024).

Abbildung 124: Vergleich der PM10-Konzentrationsverläufe über einen Messzeitraum von 90 Minuten mit den vier Prüfvarianten „Kammer leer“, „Moosmatte“, „Living Wall Vertiko“, und „Sedum-Matte“. Ausreißer wurden im Vorfeld anhand des 1,5-fachen Interquartilabstands ($1,5 \cdot \text{IQR}$) eliminiert (van Lier 2023).

Abbildung 125: Übersicht der vier Begrünungsflächen im Citytunnel Darmstadt (van Lier 2023).

Abbildung 126: Übersicht der begrüneten Flächen an der Gladbecker Straße in Essen (van Lier 2023).

Abbildung 127: Übersicht aller Messstandorte und Vergleich der Partikelherkunft für die Partikelklassifikation PM10-2.5, Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2023).

Abbildung 128: Übersicht aller Messstandorte und Vergleich der Partikelherkunft für die Partikelklassifikation PM80-1, Auswertung gemeinsam mit Particle Vision GmbH (van Lier 2023).

9.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der geltenden Immissionsgrenzwerte zum Schutz der Gesundheit, festgelegt im Immissionsschutzgesetz – Luft (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 2: Partikelgrößen und dominierende Transportprozesse in der quasi-laminaren Grenzschicht (Slinn 1982, Davidson/Wu 1990, Marques 1999).

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Versuchsstandorte und untersuchten Parameter (Darstellung: van Lier 2022).

Tabelle 4: Auflistung der Pflanzarten (modulare Bauweise Citytunnel Darmstadt) nach wissenschaftlichem Namen, deutschem Namen und Stückzahl (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 5: Übersicht der eingesetzten Messgeräte und Einsatzmittel im Citytunnel (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 6: Auflistung der Pflanzarten nach wissenschaftlichem Namen, deutschem Namen und geschätzter Stückzahl (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 7: Übersicht der eingesetzten Messgeräte und Einsatzmittel an der Gladbecker Straße 250-256 in Essen (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 8: Untersuchungszeitraum der eingesetzten Hawa Dawa Sentience Messgeräte und Hobo Datenlogger an den Standorten Citytunnel Darmstadt und Gladbecker Straße Essen zur Messung von Parametern in der Umgebungsluft (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 9: Angaben zu den Probenahmeperioden für die Haftoberflächen mit verschiedenen Substraten in den Sigma-2 Passivsammlern. Alle Proben wurden analysiert und ausgewertet (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 10: Aufschlüsselung der Gesamtzahl an exponierten Partikeln in Darmstadt im gesamten Untersuchungszeitraum (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 11: Aufschlüsselung der Gesamtzahl an exponierten Partikeln in Essen im gesamten Untersuchungszeitraum (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 12: Aufschlüsselung und Beschreibung von Staubpartikeln aus dem Straßenverkehr (in Anlehnung an Particle Vision GmbH 2020).

Tabelle 13: Gegenüberstellung der ausgefallenen Pflanzen in der flächigen und modularen Bauweise (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 14: Boniturschlüssel zur Bewertung der wandgebundenen Begrünungen im Citytunnel Darmstadt (Darstellung: van Lier 2023).

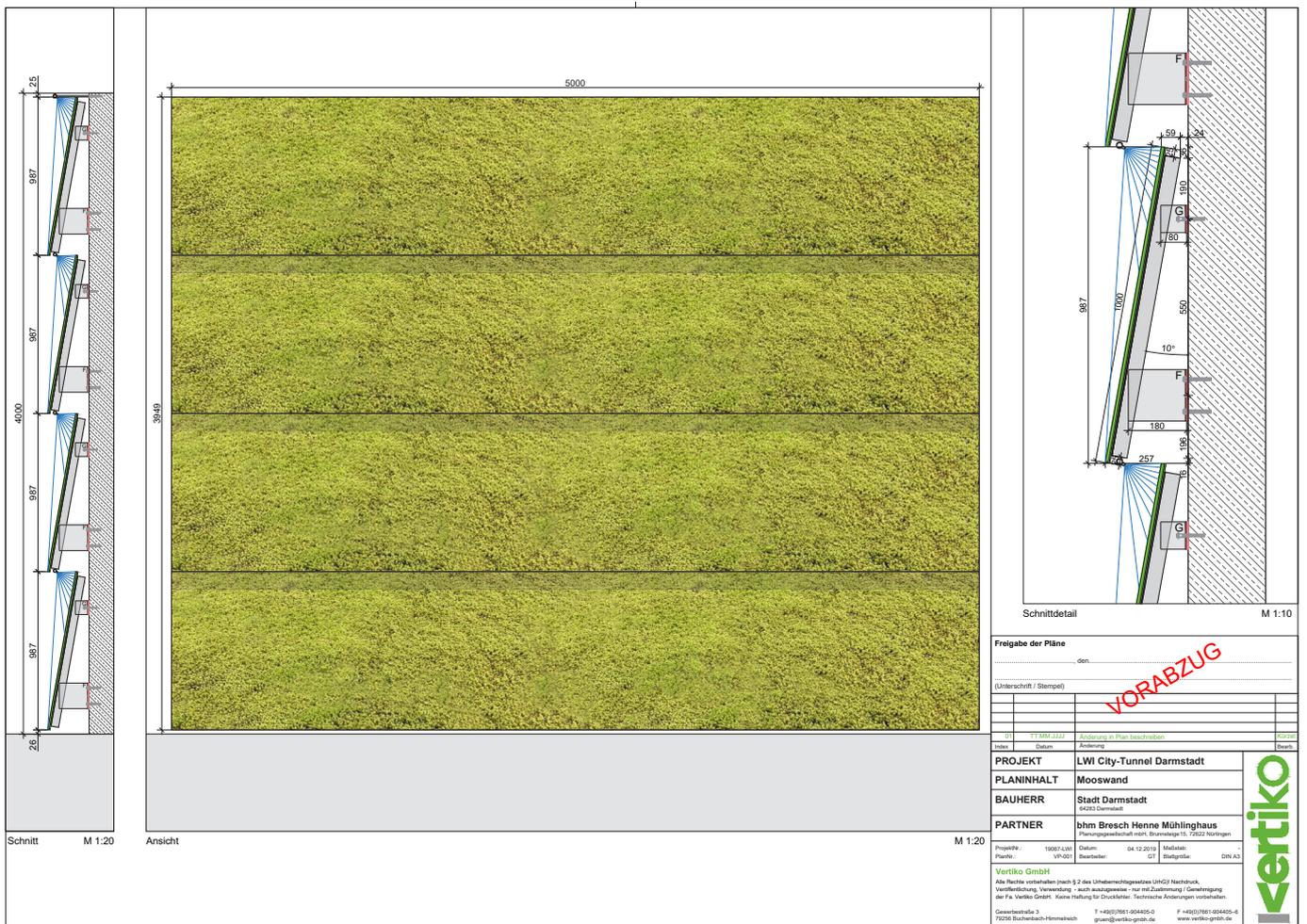
Tabelle 15: Bewertung der Pflanzen in der modularen Bauweise mit Boniturschlüssel (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 16: Bewertung der Pflanzen in der flächigen Bauweise mit Boniturschlüssel (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 17: Jahresmittelwerte Stickstoffdioxid an den Messstationen in Essen und Darmstadt (Darstellung: van Lier 2023).

Tabelle 18: Jahresmittelwerte Feinstaub PM10 und PM2,5 an den Messstationen in Essen und Darmstadt (Darstellung: van Lier 2023).

9.6 Anlagen



Freigabe der Pläne
den _____

(Unterschrift / Stempel)

VORABZUG

Index	Datum	Änderung	Vorzug
01	FT MM JJJJ	Änderung in Plan beschrieben	

PROJEKT	LWI City-Tunnel Darmstadt
PLANINHALT	Mooswand
BAUHERR	Stadt Darmstadt 64133 Darmstadt
PARTNER	bhm Bresch Henne Mühlinghaus Planungs- und Bauingenieurgesellschaft mbH, Brunnenstraße 15, 72522 Nörtlingen

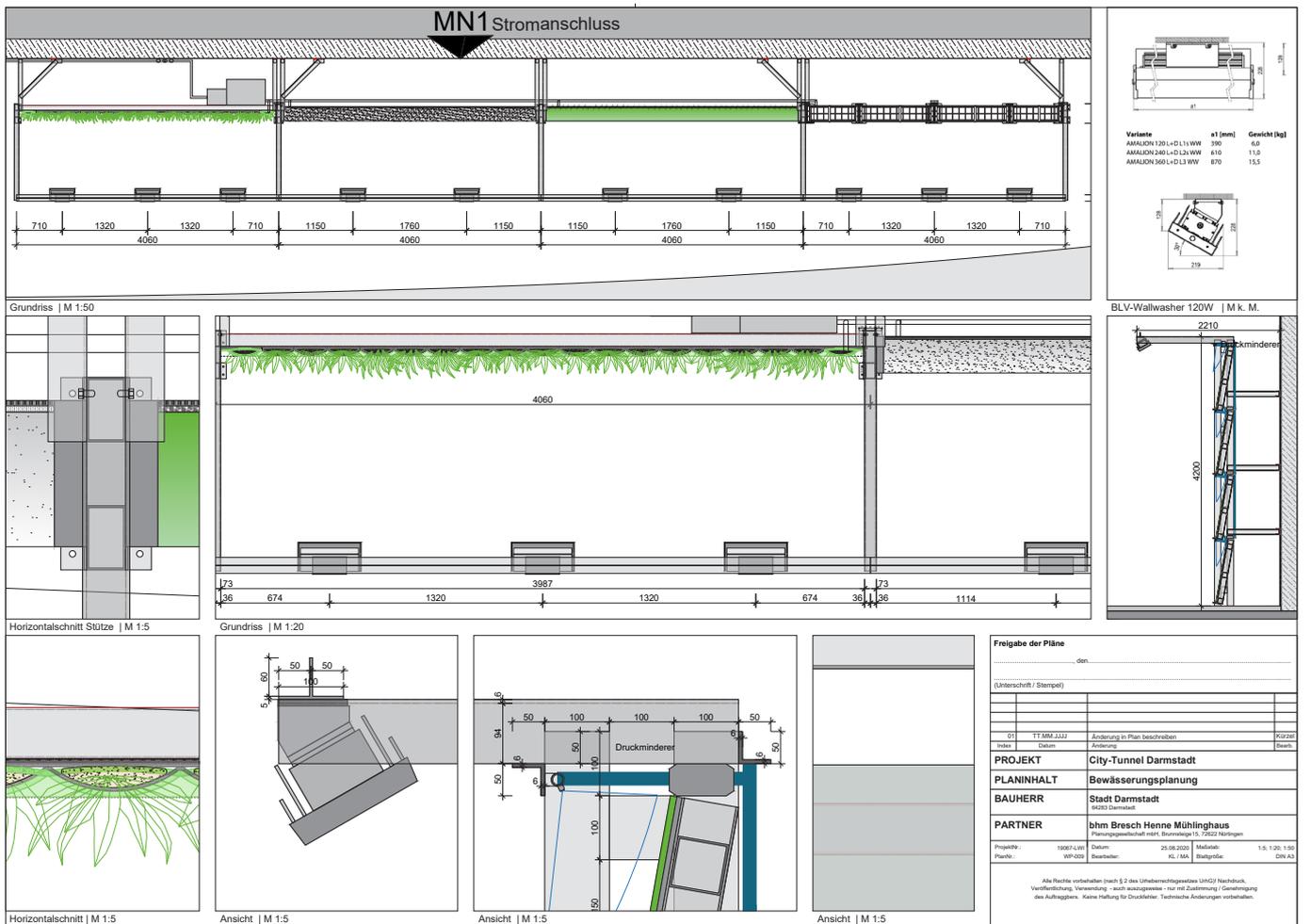
Projekt-Nr.	19024-001	Datum	04.12.2019	Maßstab	
Plan-Nr.	VP-001	Revisor	CT	Standart	DIN A3

Vertiko GmbH
Alle Rechte vorbehalten (nach § 2 des Urheberrechtsgesetzes URG) Nachdruck, Verbreitung, Vervielfältigung – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung / Genehmigung der Fa. Vertiko GmbH. Keine Haftung für Druckfehler. Technische Änderungen vorbehalten.

Gewerbestraße 3 T +49(0)7161-904455-0 F +49(0)7161-904455-6
72226 Buchenbach-Hornbach gsm@vertiko-gmbh.de www.vertiko-gmbh.de



Anlage 1: Anordnung der Moosflächen und Systematik der Bewässerung Citytunnel Darmstadt (Vertiko GmbH, 2020).



Anlage 2: Schema Beleuchtungskonzept Begrünung Citytunnel Darmstadt; Befestigung der Unterkonstruktion (Vertiko GmbH 2020).