



Entwurf

Luftschadstoffreduzierende vertikale Begrünung für den Citytunnel Darmstadt

Konzeptpapier

Kilian Lingen
Florian D. Schneider

Lingen, K. & Schneider, F.D. (2021) Luftschadstoffreduzierende vertikale Begrünung für den Citytunnel Darmstadt, DOI: 10.5281/zenodo.4441904

Visualisierung Titelseite: Anna Arnold, Initiative Essbares Darmstadt

© 2021 Kilian Lingen & Florian D. Schneider, Darmstadt, DE

Erste Fassung: September 2019 für interne Kommunikation.

Überarbeitet 15.01.2021 zur Veröffentlichung.



Der Inhalt dieses Dokuments steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0). Dies gestattet jedem Nutzer das Material in jedwedem Format oder Medium zu vervielfältigen und weiterzuverbreiten, zu verändern und darauf aufzubauen, und zwar für beliebige Zwecke, sogar kommerziell. Sie müssen angemessene Urheber- und Rechteangaben machen, einen Verweis zur Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Diese Angaben dürfen in jeder angemessenen Art und Weise gemacht werden, allerdings nicht so, dass der Eindruck entsteht, der Lizenzgeber unterstütze gerade Sie oder Ihre Nutzung besonders. Sie dürfen keine zusätzlichen Klauseln oder technische Verfahren einsetzen, die anderen rechtlich irgendetwas untersagen, was die Lizenz erlaubt.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de>

Dipl. Biol. Kilian Lingen ist Ökologe, wissenschaftlicher Mitarbeiter der HfWU Nürtingen-Geislingen und Mitarbeiter der Vertiko GmbH. Nach seinem Diplomstudium zu vegetationsökologischen Renaturierungsmaßnahmen lehrte er für zwei Jahre an der TU Darmstadt auf einer Dozentenstelle im Fachgebiet spezielle Botanik. Vier Jahre lang widmete er sich beruflich der technischen Entwicklung und Umsetzung von Meerwasser-Aquaristik-Anlagen und der Haltung und Anzucht von Korallen. Als Mitgründer von ‚Epiphytus‘ GbR arbeitete er an der Gestaltung von Wandgärten für die Innenraumbegrünung. Seit 2019 arbeitet er bei der Vertiko GmbH, einem Unternehmen für die Entwicklung und Umsetzung von vertikalen Begrünungskonzepten. Seit 2020 arbeitet er parallel als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule für Wirtschaft und Umwelt in Nürtingen - im Rahmen des VertiKKA Projektes an der Weiterentwicklung von Fassadenbegrünung in Kombination mit Grauwasser- und Photovoltaiknutzung.

Dr. Florian D. Schneider (www.fdschneider.de) ist Ökologe und Umweltwissenschaftler. Nach seiner Promotion an der TU Darmstadt zu komplexen ökologischen Netzwerken forschte er am CNRS Montpellier sowie am Senckenberg Biodiversität und Klima – Forschungszentrum in Frankfurt zur Stabilität von Ökosystemen unter menschlicher Nutzung. Er hat einen Lehrauftrag an der TU Darmstadt. Seit 2019 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am ISOE – Institut für Sozial-ökologische Forschung in Frankfurt im Forschungsschwerpunkt Biodiversität und Bevölkerung. Dort beschäftigt er sich mit Fragen der kulturellen und ökologischen Bewertung von biologischer Vielfalt, insbesondere im Zusammenhang mit landwirtschaftlicher Nutzung und in urbanen Räumen.



Nach einer Idee der **Initiative Essbares Darmstadt** (www.essbaresdarmstadt.de), **Anna Arnold, Adrian Jost, Dieter Krellmann** - Die Initiative ist ein 2016 gegründeter offener Verbund von Bürgern/innen, die aktiv bei der Gestaltung der Stadt mitwirken, Stadtgärten gestalten (z.B. AnwohnerGarten am Staatstheater Darmstadt), Projekte entwickeln (z.B. „Kostbares Lincoln“ auf 12.000qm und Vivarium „Afrika-Gelände“) und Vorschläge erarbeiten für den ökologischen und sozialen Umgang mit unseren Flächen. Die Initiative verbindet lokale Menschen und Gruppen untereinander aber auch Bürger/innen mit Stadt, Städtische Betriebe und Ämtern und ermutigt dazu, sich positiv in die Stadtgesellschaft einzubringen.

1 Idee

Städtische Grünflächen stellen wichtige Ökosystemfunktionen für die Menschen bereit. Klassischerweise werden Bäume und Grünanlagen zur Regenwasserfiltrierung und Flächenentsiegelung, zur lokalen Klimaregulation, zum Lärmschutz, aber auch zur Luftreinigung diskutiert. In der Stadtplanung stehen Grünflächen in direkter Konkurrenz zu anderen Notwendigkeiten, wie dem Wohnungsbau, Gewerbeflächen und Wegenetz und Infrastruktur. Vertikale Begrünungen an Fassaden und Wänden stellen ein vielversprechendes Konzept dar, um Grünanlagen außerhalb dieser Flächenkonkurrenz zu realisieren. Die ökologischen Funktionen und Dienstleistung, die Pflanzen bereitstellen, können damit auch an stark verdichteten Standorten genutzt werden.

Dieses Konzeptpapier schlägt die Umsetzung einer vertikalen Begrünung mit Moosen und Farnen zur Bindung von Stickoxiden und Feinstaub im Citytunnel Darmstadt vor. Zusätzlich kann die Anlage dem Lärmschutz und der Verbesserung der allgemeinen Luftqualität durch Befeuchtung und Abkühlung dienen. Die Wirksamkeit einer solchen Anlage zur Luftschadstofffiltrierung kann aufgrund von Laborstudien plausibel vermutet werden, einen Wirksamkeitsnachweis im Feldversuch gibt es jedoch bisher nicht. Dies birgt Chancen für den Forschungsstandort Darmstadt: die wissenschaftliche Begleitung und Erbringung eines Wirksamkeitsnachweises von biologischer Luftfilterungstechnik ist hier wie an keinem anderen Ort leistbar.

Das Potential einer solchen Anlage für die Stadt Darmstadt geht weit über die Schadstoffreduktion hinaus. Der Grüne Citytunnel basiert auf dem Gedanken: „Jede neue Idee benötigt eine neue Form“. Die vertikale Begrünung soll als Intervention ökologisches Verhalten inspirieren, ein Umdenken anregen und eine hohe Identifikation mit der Stadt Darmstadt bewirken. Das Projekt ist Teil eines Maßnahmenpakets zur Luftschadstoffreduzierung in Darmstadt, insbesondere in der Hügelstraße, und bedient gleichzeitig die zukunftsweisenden Pläne der Stadt Darmstadt bezüglich Umwelt- und Biodiversitätsschutz. Die gute Sichtbarkeit am Standort bietet Möglichkeiten zur Öffentlichkeitsarbeit und Umweltbildung.

Das hier vorgestellte Konzept soll Akteure aus Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Stadtverwaltung vernetzen und einen offenen Lernraum schaffen auch mit Blick auf zukünftige vertikale Begrünungsprojekte an anderen Standorten in Darmstadt.

2 Reduzierung von verkehrsbedingten Luftschadstoffen durch Pflanzen und assoziierte Mikrobengemeinschaften

Das Problem verkehrsbedingter Luftschadstoffe ist komplex aufgrund der Vielzahl der im Straßenverkehr entstehenden Substanzklassen mit gesundheitsschädlicher oder umweltschädlicher Wirkung. Durch unvollständige Verbrennung der Treibstoffe entstehen vor allem in Dieselmotoren neben verschiedenen Feinstaubklassen (gesundheitsrelevant sind PM_{10} und $PM_{2,5}$) auch Stickoxide (NO_x) und flüchtige organische Verbindungen (VOC). Auch Reifenabrieb produziert nennenswerte Feinstaubmengen. Als sekundärer Luftschadstoff wird aus NO_x und Sauerstoff unter starker Sonneneinstrahlung Ozon (O_3) gebildet. Neben diesen umweltrechtlich regulierten Substanzen entstehen in Verkehrsabgasen auch polyzyklische Aromaten wie Benzo(a)pyren sowie toxische Schwermetalle (u.a. Blei, Kadmium, Arsen, Nickel, Quecksilber).

Pflanzen tragen auf vielfältige Weise zur Reduzierung von verkehrsbedingten Luftschadstoffen bei. Dabei spielen neben der physikalischen Filterung durch die vergrößerte Oberfläche und die damit einhergehende Luftbefeuchtung, auch der Stoffwechsel der Pflanzen und der auf dem Laub („Phyllosphäre“) und im Wurzelraum („Rhizosphäre“) lebender Mikroorganismen eine Rolle (Wei u. a. 2017). Die Luftschadstoffe können unter bestimmten Umständen in den biologischen Stoffkreislauf aufgenommen und vollständig abgebaut oder unschädlich gebunden werden. Diese ökologische Schadstoffextraktion wird als ‚Phytoremediation‘ bezeichnet.

Die Wechselwirkung der verschiedenen Luftschadstoffe mit Pflanzen und ihren assoziierten Mikrobengemeinschaften ist wissenschaftlich nur bedingt im Labor untersucht. Im Folgenden nehmen wir vor allem auf die Studie von Wei u. a. (2017) Bezug, die die nachgewiesenen Wirkungswege zusammengetragen hat. Die Schadwirkung dieser Luftschadstoffe für den Menschen ist nicht Gegenstand dieser Zusammenstellung.

2.1 Stickoxide

Stickoxide sind für Pflanzen ungiftig und können als leicht wasserlösliche Stoffe in Spaltöffnungen und auf feuchten Oberflächen aufgenommen werden (Wei u. a. 2017). In wässriger Lösung werden NO und NO₂ zu Nitrat (NO₃) umgewandelt, das direkt von Pflanzen verstoffwechselt werden kann. Eine Wirkung als Stickstoffdüngung kann daher angenommen werden. Zusätzlich gibt es Hinweise auf die Wirkung von NO₂ als pflanzlichen Signalstoff zur Wachstumsanregung, d.h. eine hohe Konzentration kann beschleunigend auf das pflanzliche Wachstum wirken (Wei u. a. 2017; Morikawa u. a. 1998). Für vertikale Grünanlagen in stark NO₂ belasteten Umgebungen kann sich so eine positive Rückkopplung auf die Phytoremediation anderer Luftschadstoffe ergeben. Für natürliche Ökosysteme können anhaltende Stickoxid-immissionen jedoch zur Überdüngung führen, was sich nachteilig auf Artenzusammensetzung und Ökosystemfunktionen auswirken kann. Eine übermäßige Exposition kann unter Umständen auch physiologische Schadwirkung durch Ansäuerung und Peroxidierung entfalten.

Die Reduktion von NO₂ wirkt insbesondere auch der Bildung von Ozon entgegen (siehe unten).

Zur bakteriellen Nutzung von Stickoxiden auf pflanzlichen Oberflächen gibt es wenige Erkenntnisse. Jedoch sind die bakteriellen Stoffwechselwege zur Verwertung von atmosphärischem Stickstoff, sowie anderen Stickstoffverbindungen wie Ammonium und Nitrit hinreichend beschrieben, inklusive der genetischen Regulierungsprozesse. Ein entsprechendes Management der mikrobiellen Kulturen kann die Bindung und Verwertung von Stickoxiden möglicherweise weiter steigern.

2.2 Feinstaub

Das Laub von Pflanzen bietet große Oberflächen auf denen Feinstaubpartikel ablagern können. Insbesondere durch wachsartigen Blattoberflächen wird der Staub aus der Luft gefiltert (Ottel , van Bohemen, und Fraaij 2010; S eb  u. a. 2012). Beregnung kann diese Stoffe dann teilweise abwaschen. Die Oberfläche und Feinstruktur (z.B. Wachs, Härchen) der einzelnen Blätter ist dabei maßgeblich für das Anheften verschiedener Partikelgr en (Perini u. a. 2017; S eb  u. a. 2012). Die meisten Studien zur Feinstaubreduktion haben sich auf Bäume und Kletterpflanzen (z.B. Efeu, Ottel , van Bohemen, und Fraaij 2010) konzentriert. Eine Studie von Perini u. a. (2017) bestätigten die Befunde für eine vertikale Begr nungsanlage mit immergrünen Pflanzen in Genua. Kommerzielle Produkte im Bereich der vertikalen Begrünung sind zunehmend verfügbar, jedoch ist die

Wirksamkeit gegen Schadstoffe aus dem Straßenverkehr bisher unzureichend wissenschaftlich untersucht worden. Zur Nutzbarmachung der Phytoremediation von Luftschadstoffen besteht ein dringender Bedarf nach Feldstudien.

Feinblättrige Moose verfügen über sehr großen Oberflächen pro Volumen, wobei die Adhäsion von Feinstaub durch die elektrostatische Ladung der Oberflächen auch aktiv verstärkt wird (J. Frahm und Sabovljevic 2007). Bei Moosen von gefiedertem Wuchs oder lockerer Blattstellung findet vermutlich mehr Austausch mit der verunreinigten Luft statt als bei polsterwüchsigen Arten. Zum Verhältnis von Wuchsform und Feinstaubadhäsion gibt es für Moose jedoch bisher keine Untersuchungen.

Auch eine mengenmäßig erhebliche Absorption, d.h. dauerhafte Aufnahme, der Feinstäube durch Moos wurde in Laborversuchen nachgewiesen (J. Frahm und Sabovljevic 2007). Biologische Abbauege von Feinstaubpartikeln wurden bisher nicht gezielt untersucht. Aufgrund der chemisch sehr vielfältigen Zusammensetzung kann hier auch keine allgemeine Aussage gemacht werden. Jedoch beinhaltet PM₁₀ und PM_{2.5} viele organische Verbindungen, die den Pflanzen nach Aufschluss durch Mikroorganismen als Kohlenstoffquelle zur Verfügung stehen. Eine Wirkung als Kohlenstoffdünger kann daher angenommen werden. Welche Mikroorganismen besonders für den Aufschluss von Feinstaub geeignet sind, und zur Phytoremediation gezielt eingesetzt werden können, ist bisher nicht untersucht.

2.3 Ozon

Ozon wirkt stark phytotoxisch, d.h. direkt schädigend auf Pflanzen durch die Bildung von Sauerstoffradikalen und Spaltung von Kohlenstoff-Doppelbindungen. Hohe Konzentrationen über 80 µg/m³ in der Luft können großflächigen Schaden an städtischen Bäumen und Begleitgrün anrichten. Ozon entsteht als sekundäres Produkt von Verkehrsemissionen NO_x und VOCs unter direkter UV-Einstrahlung. Die Bekämpfung hoher Ozonbelastung konzentriert sich daher vor allem auf die Reduktion der Quellen dieser Ausgangsstoffe.

Es gibt Hinweise auf reduzierende gasförmige Substanzen, die in den Spaltöffnungen von Laubpflanzen zum Schutz vor Ozon abgegeben werden. Ozon-resistente Arten können so die Substanz schon vor möglichem Kontakt unschädlich machen. Je größer die Blattoberfläche umso stärker ist die ozon-neutralisierende Wirkung. Dieser Wirkmechanismus ist in Moosen allerdings nicht vorhanden. Auch mikrobiologische Komponenten spielen in diesem Vorgang mutmaßlich keine Rolle.

2.4 Volatile Organische Verbindungen (VOCs)

VOCs ist eine Sammelkategorie für alle Arten organischer Verbindungen, die dank ihrem niedrigen Siedepunkt als gasförmige Substanz in der Luft gelöst sein können. Sie sind in der Regel als Geruch wahrnehmbar. Sie spielen als Luftschadstoff vor allem in Wohn- und Arbeitsumgebungen im Innenraum eine große Rolle (aus Farbausdünstungen, Reinigungsmitteln oder Weichmachern). Im Straßenverkehr entstehen vor allem Benzol, Toluol und Xylol (BTX) durch unvollständige Verbrennung in Verbrennungsmotoren. Sie tragen zur Ozonbildung und zur Bildung giftiger sekundärer Aerosole bei (Wei u. a. 2017).

Pflanzen können BTX über Spaltöffnungen absorbieren und dort über Stoffwechselwege in unschädliche Säuren verwandeln. Diese Wirkweise wurde für verschiedene auch im Außenbereich verwendbare Pflanzen im Labor nachgewiesen, insbesondere für Efeu (*Hedera helix*) und Hortensie (*Hydrangea macrophylla*) (Wei u. a. 2017; Liu u. a. 2007; Dela Cruz u. a. 2014). Auch über Bakterienstämme und Pilzkulturen gibt es Untersuchungen zur Fähigkeit, BTX zu zersetzen (Wei u. a. 2017). Besonders *Pseudomonas putida* TVA8 wird als wirksames Inokulat zur Bereinigung von Schadstoffen bewertet (De Kempeneer u. a. 2004).

3 Existierende Konzepte

Bei vertikalen Grünanlagen handelt es sich meist um Vorbau-Konstruktionen, die mit Pflanzen aus Habitaten bestückt sind, die den städtischen Fassaden und Wänden in den Umweltbedingungen ähneln. Neben Kletterpflanzen, die bodengebunden an Rankhilfen emporklimmen, finden zunehmend auch Epiphyten Anwendung, d.h. aufsitzend wachsende Pflanzen ohne direkten Kontakt zum Erdreich. Je nach Standortbedingungen können Fels- und Mauerökosysteme aber auch tropische Baumkronenökosysteme nachgebildet werden. Die Notwendigkeit einer Bewässerung muss dabei technisch gelöst werden, teils passiv durch Regenwassersammlung, teils aktiv mit Pumpen und Filtersystemen und (teil-)automatisierter Regelungstechnik. Vertikale Begrünungen kombinieren somit ökologisch-botanisches Wissen um die Lebensweise der Pflanzen und gärtnerische Praktiken mit technischer Anwendung.

Im Innenraum werden vertikale Gärten zur der Raumklimaregulierung und CO₂ Reduktion eingesetzt, und bieten hohen ästhetischen Wert. Sie werden daher oft im Rahmen des betrieblichen Gesundheitsmanagements forciert. Es gibt hinreichende wissenschaftliche Nachweise der Rückhaltung von Schadstoffen (Stäube, Organische Volatile) durch Innenraumbegrünung (Wei u. a. 2017). Eine Vergleichsstudie an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf hat die Kapazität von Grünwänden zur Klimaregulierung in geschlossenen Innenräumen untersucht (Bucher u. a. 2016).

Im Außenbereich sind vertikale Begrünungen schon als Lärmschutz an Autobahnen und innerstädtischen Straßen etabliert. Hierbei handelt es sich meist um Rankhilfen für Kletterpflanzen oder in die Wand integrierte Pflanzgefäße mit schadstoffresistenten Pflanzen aus dem Gartenbau. Insbesondere in Innenstädten wird hier auch die Wirkung auf das Mikroklima zur Abmilderung von innerstädtischen Hitzeinseln untersucht. Eine künstliche Bewässerung ist an den sonnenexponierten Straßenrandstandorten meist nötig.

Seit den neunziger Jahren setzt der Biologe und Gärtner Patrick Blanc Vertikale Gärten an Hausfassaden um. Hier entfalten Laubpflanzen für die Luftklimatisierung vor allem durch physikalisch-mechanische Wirkung. Neben der Luftbefeuchtung und Kühlung wird durch Pflanzenkompositionen eine besondere ästhetische Wirkung erzielt. Viele Gartenbau- und Architektur-Unternehmen haben solche Fassadenbegrünungen seitdem umgesetzt.

Neben Fassadenbegrünungen gibt es auch freistehende vertikale Grünanlagen. Das Mobile Grüne Zimmer der Firma Helix (<http://www.helix-pflanzen.de/>) ist eine portable Plattform umrahmt von bepflanzten Wänden mit Kräutern und essbaren Pflanzen. Eine Wand des Herstellers ist seit 2018 in Darmstadt an wechselnden Standorten aufgestellt. Die freistehende Mooswände von Greencity Solutions (Produkt „CityTree“, www.greencitysolutions.de) sind Grünwände mit autonomer

Sensorik und Steuerung ausgestattet. Eine Anbindung an das Internet informiert live über die Messwerte. Die Wirksamkeit des CityTree wurde von begleitenden Forschungsinstituten untersucht und auf ca. 20% Filterleistung für Feinstaub und bis zu 8% für Stickoxide beziffert. Die aktive Luftansaugung steigert in die Adsorption und Filterwirkung am Standort. Eine Aufstellung direkt an Luftschadstoff-Quellen ist jedoch nicht der primäre Verwendungszweck dieser Produkte; eher zielen sie auf die Verbesserung der Luftqualität im Aufenthaltsbereich von Menschen. Die gute öffentliche Sichtbarkeit dieser Wände weisen zudem auf die Problematik der Luftqualität in Städten hin und knüpfen an lokale Diskurse an.

Zur Phytoremediation mit Moosen an der Schadstoff-Quelle wurde 2017 in Stuttgart ein Modellversuch in Zusammenarbeit mit dem Naturkundemuseum Stuttgart (für begleitende Studien zur Anhaftung von Feinstaub) und der Uni Stuttgart (zuständig für Feinstaubmessungen und Tragwerkkonstruktionen) gestartet, in dem eine 100 m lange Wandfläche in hochexponierter Lage mit Moosmatten der Firma Vertiko (<https://vertiko-gmbh.de/begrueunungen-loesungen/moosmatten/>) bestückt wurde. Die Haltbarkeit der Matten war aufgrund der klimatischen Bedingungen und Streusalzbelastung geringer als erhofft, auch da keine speziell für diesen Zweck ausgewählten Moose zum Einsatz kamen. Eine Bewässerung wurde nachträglich angebracht. Die wissenschaftlichen Studien zur Wirksamkeit der Mooswand sind noch nicht abgeschlossen. Vorläufige Berichte weisen die erfolgreiche Adhäsion von Feinstaubpartikeln und positives Wachstum für einige der eingesetzten Moos-Arten aus. Vertiko forscht weiterhin an den Möglichkeiten der Schadstoffreduzierung durch Moosmatten. Seit November 2017 erprobt der Forschungsverbund MoosTex (Ed. Züblin AG, Helix Pflanzen GmbH, DITF) in Ludwigsburg und Stuttgart verschiedene Moosarten und Bewässerungssysteme und untersucht die Feinstaubaufnahme unter verschiedenen Umweltbedingungen. Eine vollautomatisierte technische Umsetzung für ein Bewässerungssystem für vertikale Mooswände wurde von der Firma 3S-Systems für die Wohnungsbaugenossenschaft Gartenheim in Hannover entwickelt (<http://3s-systems.de/projekte/bewaesserungssystem-moosmaschine/>).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mehrere Ansätze für eine stabile und wirksame Implementierung von Moosflächen zur Luftschadstoffreduzierung und Klimaregulierung im Außenbereich existieren. Heute erhältliche gewerbliche Produkte sind meist sichtbar und attraktiv, aber nicht für die technische Herausforderung direkt an der Emissions-Quelle am Straßenverkehr entwickelt. Verschiedene Projekte betätigen sich jedoch aktuell in der Entwicklung für diesen Einsatzbereich.

4 Umsetzung in Darmstadt

Eine Umsetzung im Citytunnel Darmstadt im hier beschriebenen Versuchsmaßstab ist nicht dazu geeignet, die Messwerte für Stickoxide und Feinstaub in der Hängelstraße nachhaltig zu verbessern. Ein statistisch signifikanter Nachweis der Reduktion von Schadstoffen in der Luft wird auch aufgrund des Fehlens einer geeigneten Vergleichsfläche nicht möglich sein. Maßnahmen zur Reduktion von Stickoxiden am Standort Hängelstraße sollten daher in erster Linie auf die Reduzierung des Verkehrsaufkommens, insbesondere von Dieselfahrzeugen, abzielen.

Primäres Ziel für die Umsetzung einer vertikalen Begrünung mit Moosen im Citytunnel Darmstadt sollte die Erforschung der Potentiale für eine solche Anlage sein. Die Phytoremediation von

Luftschadstoffen in diesen Größenordnungen wurde bisher kaum in der Praxis erprobt. Der Standort Citytunnel ist für einen Feldversuch aufgrund der hohen Schadstoffexposition und strömungsbedingten Aufkonzentrationen gut geeignet. Vorstudien zu Strömungsverhältnissen und Feinstaub- sowie Stickoxid-Konzentrationen existieren bereits. In der Wissenschaftsstadt Darmstadt herrschen beste Vorbedingungen für eine wissenschaftliche Begleitforschung zur Luftschadstoffbindung. Die Mooswand könnte als offene Plattform für verschiedene wissenschaftliche Studien dienen (siehe Abschnitt 5) und die Anwendung von Moosen zur Schadstoffreduzierung direkt an der Quelle einen großen Schritt voranbringen.

Neben der möglichen Wirkung auf Schadstoffkonzentrationen kann die Anlage je nach Konstruktionsstandort zusätzlich die Lebensqualität bei Anwohnern durch Schallschutz und Klimaregulierung verbessern. Einhergehend mit der ökologischen Funktionalität ergibt sich eine optische Aufwertung des Citytunnel mit öffentlicher Sichtbarkeit und repräsentative Wirkung, und eine Vorbildwirkung für private Begrünungsprojekte. Der Citytunnel liegt am Rand des Sanierungsgebietes Mollerstadt, das aktuell Gegenstand eines nachhaltigen, integrierten Planungsprozesses ist. Die Umsetzung dieses Projektes würde schließlich die nachhaltige Vernetzung der beteiligten Kooperationspartner in Wissenschaft, Bürgerinitiativen, Privatwirtschaft und Stadtverwaltung bewirken und die zukünftige Schaffung ähnlicher Gebäudegrün-Anlagen im Stadtbereich fördern.

4.1 Standort

Prinzipiell ist eine Umsetzung unter stetigen Umweltbedingungen im Innenbereich des Citytunnels, aber auch im Außenbereich bei im Jahresverlauf stark variablen Temperaturen denkbar. Anschlüsse für Strom und Wasser und/oder die Möglichkeit zur Solarstromgewinnung und Regensammmlung auf anliegenden Dachflächen müssen gegeben sein. Direkte Sonneneinstrahlung und starke Windexposition sind zu minimieren oder ganz auszuschließen. Die Tiefsttemperaturen sollten die Frostgrenze nur an wenigen Tagen im Jahr unterschreiten.

Im Innenbereich herrschen vergleichsweise stabile Bedingungen, die vom Wetter und Jahreszeiten wenig beeinflusst sind. Auch die Schadstoffexpositionen sind im Jahresverlauf vermutlich weniger variabel als im Außenbereich, wo Wind und Feuchtigkeit die Luftzirkulation beeinflussen. Eine Wandbegrünung könnte mit künstlicher Beleuchtung umgesetzt werden. Die Wasserverdunstung wird durch die stetigen Raumbedingungen reduziert.

Die Standortbedingungen sind bei der Auswahl von geeigneten Arten von Bewuchs zu berücksichtigen.

Mögliche Standorte wären

1. Im geschlossenen Tunnelbereich, als Wandaufbau. Eine flache Aufbaukonstruktion mit dezentralen Wasserkreisläufen ermöglicht den Betrieb mehrerer Wandpaneele mit sehr großer Gesamtfläche entlang der Fahrbahn. Hier würde künstliche Beleuchtung zum Einsatz kommen (siehe unten). Der Aufbau mehrerer unabhängiger Paneele würde die Begleitforschung zu Wachstumsbedingungen und Moosarten-auswahl begünstigen. Schwierigkeiten sind die Verkehrssicherheit und der Zugang für Wartungsarbeiten und wissenschaftliche Untersuchungen.

2. Auf der Verkehrsinsel im oberen Tunnelbereich. Hier bietet sich die Möglichkeit, mit räumlichen Strukturen zu experimentieren, die die Feinstaubladung der Tunnelluft vor dem Austreten in die Hugelstrae reduzieren können. Die Beleuchtung kann hier mit ausreichend Abstand zur Fahrbahn realisiert werden. Ein zentrales Wasserreservoir könnte die gesamte Anlage speisen. Im Durchfahrtsbereich der Hugelstrae ist der Einfluss von Wetter und Klima noch stärker relevant. Aus Gründen der Verkehrssicherheit und des Platzbedarfs bei Tunnelwartung ist dieser Standort jedoch problematisch.
3. Am Bereich der Tunnelausfahrt in die obere Hugelstrae unter offenem Himmel. Die Südwand eignet sich hier für eine abgeschattete Installation. Die Aufrauhung der Tunnelwand durch die Vegetation würde die Strömungseigenschaften positiv beeinflussen und ggf. die Messwerte im Bereich der Wilhelm-Glassing-Straße (Standort Luftmessnetz) auch physikalisch reduzieren. Eine vertikale Wand hier hat zudem den zusätzlichen Vorteil der Lärmreduzierung für Anwohner. Eine Kombination mit Brustungsbepflanzungen zur zusätzlichen Aufrauhung und Lärmreduktion wäre möglich. Auf aktive Beleuchtung könnte hier verzichtet werden.
4. Im Bereich hinter der Tunneleinfahrt von der Rheinstraße. Eine hier befindliche Einbuchtung am rechten Fahrbahnrand bietet ausreichend Platz für Aufbauten und Wartungsarbeiten, sowie für die Begleitforschung. Auch Wasser- und Stromanschlüsse können aus dem nahegelegenen Versorgungsschacht verlegt werden. Der Ort wird aktuell nicht für den Tunnelbetrieb genutzt. Durch die Lage am unteren Tunneleingang sind jedoch niedrigere Schadstoffexpositionen als am Ausgang in der Hugelstrae zu erwarten. Eine Wirksamkeit auf die Messwerte in der Hugelstrae ist nicht zu erwarten.

Die vertikale Begrünung sollte in einem ersten Projektabschnitt unabhängig vom Standort auf einer Fläche von 30-50 m² als Testanlage und mögliches Forschungslabor eingerichtet werden. Langfristig gedacht, besteht die Möglichkeiten zur Erweiterung der Anlage.

Vorarbeiten: Zur Auswahl von geeigneten Pflanzen (siehe unten) sind Informationen zu Temperaturextrema und Luftfeuchtigkeit notwendig. Eine Erhebung dieser Daten durch Termohygrologer an mehreren Standorten im Tunnel wäre in Vorbereitung der Auswahl der Moosarten durchzuführen.

4.2 Konstruktion

Im Minimum bestehen alle vertikalen Begrunungssysteme aus drei Elementen: Einer Bewässerung, der wasserundurchlässigen Trägerkonstruktion für die Moosmatten, sowie der Entwässerung. In Kreislaufsystemen wird das Wasser aus der Entwässerung zur Bewässerung wiedereingesetzt. Bei ausreichender Verdunstung und hohem Wasserverbrauch kann auf eine Entwässerung ggf. verzichtet werden.

Die hier diskutierte Anlage geht von einer tragenden Rahmenkonstruktion aus Stahl- oder Aluminiumprofilen, oder auch Lattenholz aus. Diese wird als Aufbau direkt an der Wand oder als freitragendes Rahmenwerk montiert (je nach Standortoptionen). Die Rahmenkonstruktion erlaubt eine stabile Wandmontage und erfordern nur geringe bauliche Veränderungen bei niedrigen Kosten. Individuelle Lösungen sind je nach Standort möglich. Der Rahmen gewährleistet einen Abstand zur Wand für Luftzirkulation und Strom- und Wasserleitungsfuhrung. Je nach Standort kann ein

Abnehmen oder Verschieben der einzelnen Module zwecks Kontrolle der dahinter liegenden Wand notwendig sein, dies ist bei entsprechender Berücksichtigung der tragenden Rahmenkonstruktion problemlos umsetzbar.

Darauf aufgebracht werden umweltverträgliche und bruchstabile PVC Hartschaumplatten (z.B. Forex) von 8 – 10 mm Stärke oder leichtere Alu Dibond Platten von 2 - 4 mm Stärke. Die Montage erfolgt entweder auf Stoß, mit anschließender Abdichtung der Fugen durch Silikon, oder in überlappender Dachziegelkonstruktion. Auf diese Platten können anschließend vollflächig die vorgezogenen Moosmatten befestigt werden. Am Standort 2 & 4 wären auch Konstruktionen mit mehr Aufbautiefe denkbar, z.B. mit leichter Schrägstellung der Platten ($\sim 5^\circ$) für eine verbesserte Gießwasserausnutzung.

Am Fuß der Wand wird abfließendes Wasser in einer Rinne oder einem Reservoir aufgefangen. An der oberen Kante wird ein Bewässerungsmodul zur aktiven Berieselung angebracht.

Durch den modularen Aufbau lässt sich die Fläche beliebig skalieren und an die Standortbedingungen anpassen. Zwecks Wartung und experimenteller Untersuchung lassen sich die einzelnen Moosmatten aus der bestehenden Fläche einfach herausnehmen oder ersetzen.

In der Breite ist das System bei dezentralem Wasserkreislauf frei skalierbar. Bei zentralen Wasserkreisläufen ist die Breite der Wandinstallation, durch die in der Filteranlage zu verarbeitende Wassermenge limitiert. Ein etwaiges Abfließen von Wasser im Verkehrsbereich wird konstruktiv verhindert, etwa durch den Vorbau von Acrylglas bis zu einer relevanten Höhe. Dadurch kann auch der Eintrag von Spritzwasser und Streusalz minimiert werden.

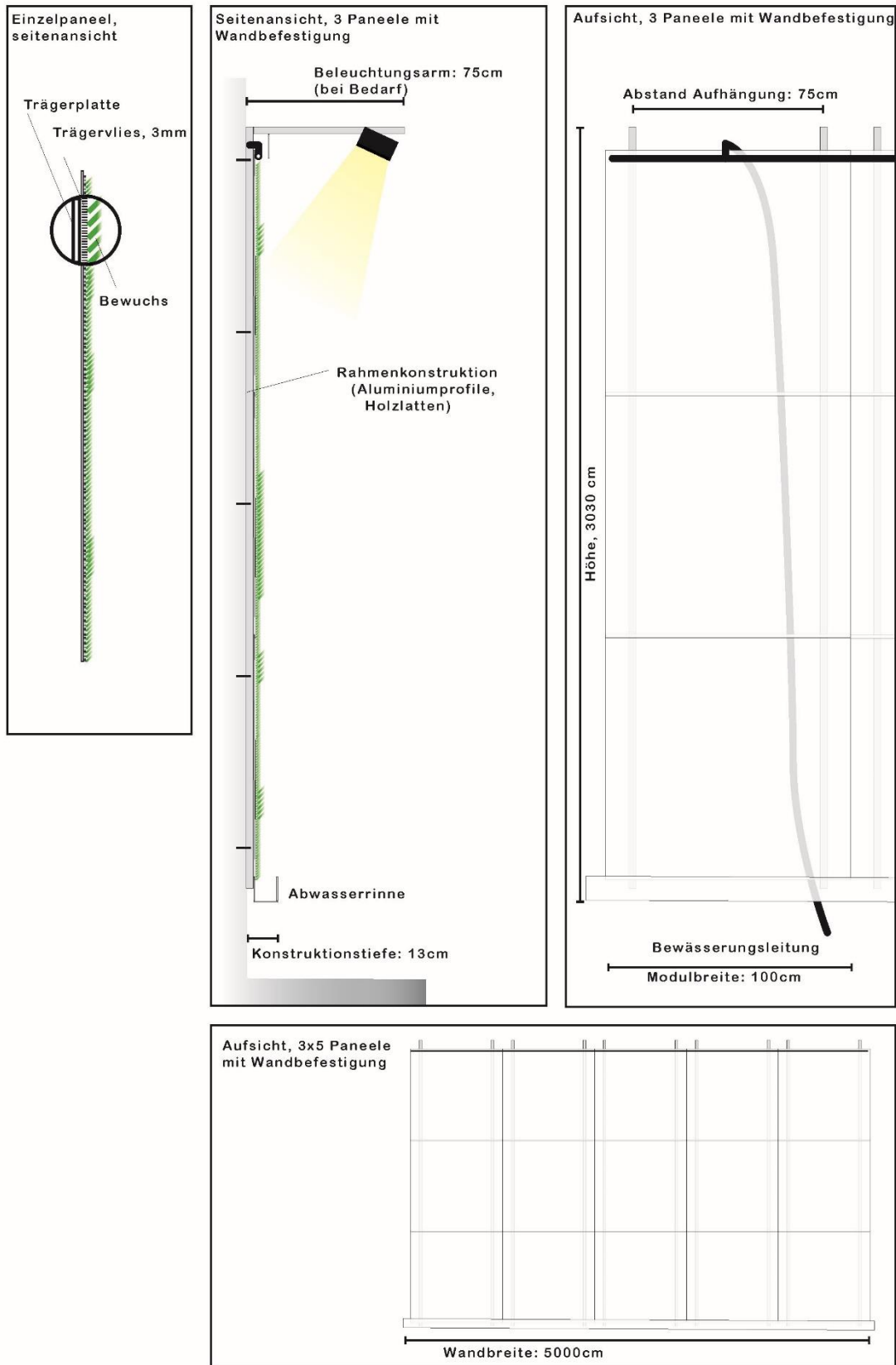


Abbildung 1 - Konstruktionszeichnung bei Umsetzung in Dachziegelbauweise; hier mit Trägerplatten aus festem PVC Hartschaum von 1m x 1m Fläche, die mit Moosmatten bestückt werden. Diese bestehen aus PET Trägervlies mit vorangezogenen Moosen.

4.3 Pflanzenauswahl

Die Studien zur Phytoremediation von Luftschadstoffen geben Hinweise auf Pflanzengattungen und Familien, die in der Reduzierung von Luftschadstoffen Anwendung finden können. Vor allem sind geeignete Charakteristika der Pflanzen und ihrer Blattstrukturen beschrieben: große Blattoberflächendichte (Blattfläche pro Volumen) und wachsabscheidende Blattoberflächen, sowie Härchen begünstigen die Partikelanhaftung. Diese Wirkung wird durch elektrostatische Anziehung der Partikel noch weiter verstärkt. Zusätzlich muss die Pflanzenauswahl auch standortspezifisch geschehen und die vor Ort herrschenden Umweltbedingungen und baulichen Bedingungen in Betracht ziehen.

Laubmoose bieten aufgrund ihrer feingliedrigen Blattstrukturen extrem große Oberflächen zum Anhaften von Luftpartikeln. Moose nehmen Nährstoffe direkt über die Blattoberflächen auf. Dadurch gelangen Bestandteile anhaftender Partikel direkt in den Stoffwechsel und dienen den Moosen als Nährstoff. Zusätzlich zu Moosen können Farne und Moosfarne (*Selaginella*) zum Einsatz kommen, die als Deckgrün die Luftströmungen verlangsamen und die Ablagerung von Partikeln verstärken sollen.

Moose und epiphytisch wachsende Farne benötigen zudem kein Substrat. Die Anhaftung von Moosen und Farnen auf rauen und strukturierten Untergründen und Kunstfasermatten mit aktiver Rieselbewässerung ist in der Terraristik erprobt. Dies ermöglicht eine flache Bautiefe der vertikalen Begrünung. Moose sind flächig oder polsterbildend und immergrün was eine dauerhaft ästhetische Wirkung der Fläche erzeugt. Sie sind pflegeleicht im Unterhalt, wenn das Bewässerungsregime und Beleuchtungsbedingungen richtig eingestellt sind.

Bei Nebel & Philippi (2000) werden folgende epiphytische Moose als „unempfindlich“ gegenüber Luftschadstoffen genannt: *Amblystegium serpens*, *Brachythecium rutabulum*, *Hypnum cupressiforme* var. *cupressiforme*, *Plagiothecium laetum* var. *curvifolium*, *Plagiothecium laetum* var. *laetum*, *Platygyrium repens*. In der Stuttgarter Modellanlage an der Cannstatter Straße wurde das Wachstum der Moose unter den straßennahen Stressbedingungen dokumentiert. Positives Wachstum sowie erfolgreiche Adhäsion von Feinstaubpartikeln konnte für folgende Arten gezeigt werden: *Ceratodon purpureus*, *Racomitrium canescens*, *Hypnum cupressiforme*.

Die Auswahl der jeweiligen Arten richtet sich nach den Standortbedingungen. Im Falle des Citytunnels kommen Arten der gemäßigten Breiten zum Einsatz welche z.B. Frost problemlos überstehen. *Ceratodon purpureus* und *Hypnum cupressiforme* zählen zu den häufigsten epiphytischen Moosen auf Bäumen und Baumstämmen. Beide bevorzugen kalkarme und sonnige Standorte. *Brachythecium rutabulum* ist ein schnell wachsender ubiquitist, der epiphytisch auch bei ständiger Beregnung bestens gedeiht. Ebenfalls feuchteliebend bei neutral bis saurem Milieu ist *Platygyrium repens*, das als Epiphyt auf Bäumen gedeiht, auch bei bisweilen kühlen und luftigen Oberflächen. Auch *Plagiothecium laetum* ist Epiphyt auf Baumstämmen, wächst aber nur auf basenarmen Flächen, typisch an Stammfüßen und Baumstämmen, sehr häufig Bodenmoos in sauren Nadelwäldern.

Eine große strukturelle und funktionelle Vielfalt der Arten, sowie eine Verträglichkeit der Arten mit der starken Luftverschmutzung wird durch eine diverse Animpfung der Paneele gewährleistet.

Nach einer Voranzuchtphase würden sich dann am finalen Standort die geeigneten Arten etablieren.

Da es bisher wenige Erfahrungswerte zu Wachstum und der Kulturbedingungen unter starker Luftschadstoffexposition gibt, kann eine Kultur der Moose nur durch ständige Beobachtung und ggf. Korrektur der Wasser- und Beleuchtungsregime gewährleistet werden. Eine intensive Begleitung am finalen Standort sollte für wenigstens 6-12 Monate vorgesehen werden.

4.4 Moosmatten und Voranzucht

Die Moosmatten werden vollflächig auf der wasserundurchlässigen Wandkonstruktion aufgebracht.

Im Handel in Deutschland bietet vor allem Vertiko (Vertiko GmbH, <https://vertiko-gmbh.de>), NIRA (NIRA GmbH & Co. KG, <https://www.xeroflor.de>), und Siemsen & Lasak Vegetationssysteme GbR, (<http://veg-sys.de/>) Moosmatten als Fertigware an, bestehend aus einem Kunstfaservlies und einem anorganischem Maschengewebe und einer unspezifischen Mischung schnellwachsender und unproblematischer Moos-Arten. Sie sind für Dachbegrünungen, d.h. horizontale bis geneigte Anbringung ausgelegt. Erhältlich sind vor allem Moosarten für diese Anwendungsbereiche, aber auch *Hypnum cupressiforme*, das für Wachstum in der vertikalen gut geeignet ist.

Eine Selbstanzucht im laufenden Betrieb in der Vertikalen kann auf anorganischem PET Pflanzvlies (z.B. unter dem Handelsnamen Hygrolon vertrieben) erfolgen, das in der Terraristik für die Mooskultur eingesetzt wird. Dank der strukturellen Micro-Fasern hält es bis zu 280% Wasser. Das Material imitiert die strukturellen und physikalischen Eigenschaften von Rindensubstrat, ist dabei aber nicht durch organische Prozesse zersetzbar. Somit stellt es die ideale dauerhafte Grundlage für die Ansiedelung von epiphytischen Moosen dar. Durch die Materialwahl wird eine maximale Lebensdauer der Pflanzkonstruktion, bei zugleich idealen Wasserleitfähigkeiten für die Kultur der Moose gewährleistet. Die Auswahl von Moosarten kann bei eigener Anzucht gezielt auf den Verwendungszweck am Straßenverkehr ausgerichtet werden (siehe 4.3).

Auch Vliesmatten aus verrottungsbeständigen Kunstfasern können für einige Moosarten verwendet werden. Ein gesichertes Wissen hierzu ist nur bedingt in schriftlicher Form in englischer oder deutscher Sprache verfügbar. Einige Hinweise zur gezielten Kultur von Moosen, auch auf entsprechenden Trägertextilen finden sich z.B. bei Frahm (2010) und Martin (2016). Moose werden als Bruchstücke in Mixtur oder Reinkultur auf das Trägermaterial aufgebracht. Bei ständiger Befeuchtung und günstigen Lichtverhältnissen ist eine Propagation und Anhaftung an das Trägermaterial in drei bis vier Monaten erreicht. Ein flächiger Bewuchs kann in acht bis zwölf Monaten erzielt werden.

In die befestigten Moosmatten können leicht auch zusätzliche epiphytische Staudenpflanzen und Farne eingesetzt werden. Diese werden mit weiterem Vlies aufgebunden oder durch Schnitte unter die Mooslage gepflanzt. In dem Textil finden die Wurzeln leicht Halt und können Nährstoffe und Wasser beziehen.

4.5 Wasserkreislauf und Nährstoffe

Die Konstruktion sieht bei aktiver Bewässerung eine Rezirkulation vor. Das Beregnungswasser wird aufgefangen und in einer Filteranlage aufgereinigt, bevor es wieder zur Bewässerung der Grünwand eingesetzt wird.

Bei Bedarf kann die Aufreinigung des Wassers, das mit Luftschadstoffen angereichert ist, durch weitere ökologische Komponenten realisiert werden: im Auffangbehälter könnten Torfmoose, sowie Riedgräser und Wasserpflanzen zur Filterung von Feinstaubpartikeln im Wasser eingesetzt werden. Bei starker Verunreinigung des Wassers können bei Bedarf biologische Klärbecken mit verschiedener Pflanzenkomposition (z.B. auch Wasserpflanzen und Riedgräser) zwischengeschaltet werden, bevor das Wasser in den Reservebehälter zurückfließt.

Die Wasserzirkulation und Nährstoffsteuerung kann je nach Standort "dezentralisiert" mit einem Wassertank und Pumpe pro Modulstreifen, oder "zentralisiert" mit einem Vorratstank und Pumpe in einem separaten Technikbereich realisiert werden. Letzteres wäre bei der Realisierung im Citytunnel wohl der Fall. Bei zentralisiertem Aufbau können je nach Raumverfügbarkeit mehrere biologische Klärbecken hintereinandergeschaltet werden. Die Schadstoffrückstände können hier beprobt und labortechnisch untersucht werden. Voraussetzung sind Kaltwasser- und Stromzuleitung (220V) sowie zur Absicherung über einen Notablauf eine Abwasserleitung.

Grobe Verunreinigungen werden durch mechanische Filtrierung aus dem Wasserkreislauf entnommen, bevor das Wasser in die Steigleitung angesaugt wird.

Um das Wachstum der Pflanzen aufrecht zu erhalten, werden bei Bedarf Nährstoffe in den Wasserkreislauf hinzugefügt. Dies geschieht entweder manuell oder je nach Anlagengröße automatisiert durch Dosierpumpen gekoppelt an eine Leitwertsensorik. Ebenso wird der pH-Wert des Wassers auf die von den Pflanzen benötigte Wasserhärte eingestellt.

Eine Automatisierung von pH und Leitwert (Nährstoffgehalt) kann mit etablierten Produkten aus der Aquaristik realisiert werden, oder mittels einer eigenen Anlagensteuerung (siehe 5.2).

4.6 Beregnung

Bei extremer Feinstaubbelastung oder starker Austrocknung der Bepflanzung kann zusätzlich zur Berieselung des Trägermaterials eine Stoßberegnung der Pflanzen notwendig werden, um die Blattoberflächen zu reinigen und die Partikel abzuwaschen. Eine Druckleitung mit Regendüsen kann konstruktiv nachgerüstet werden. Das zusätzlich eingebrachte Wasser wird dann über die zentral gesteuerte Filtrierungsanlage kompensiert.

4.7 Beleuchtung

Je nach Standort und vorherrschender photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) kann mit zusätzlichem Kunstlicht gearbeitet werden. Hier sieht die Konstruktion die Nutzung von speziellen Vollspektrum Pflanzenwachstums-LED's vor. Mittels entsprechender Optiken kann eine blendfreie Ausleuchtung der Zielflächen umgesetzt werden. Die spektrale Zusammensetzung bietet neben einer sehr hohen Effizienz (bis zu $3,3\mu\text{mol/J}$) auch ein optisch ansprechendes natürliches warmes Licht. Die vorgesehenen Beleuchtungsmodule sind staubdicht und geschützt gegen allseitiges Spritzwasser nach Schutzklasse IP64.

4.8 Wartung

Nach stabiler Einstellung der Kulturbedingungen und Einrichtung einer Überwachungssensorik (Wasserstand, Feuchtemessung, pH und Leitwert) kann die Anlage in den Regelbetrieb übergehen. In der Regel sind zwei Wartungsgänge der bepflanzten Wände pro Jahr notwendig (Herbst und Frühling). Eine Wartung des Bewässerungssystems und Pumpentechnik erfolgt in der Regel zweimal jährlich.

5 Entwicklungsforschung

Vor allem bei der Anzucht der Moose im laufenden Betrieb ist eine intensive Betreuung am Standort in den ersten Wochen und Monaten notwendig, um stabile Wachstumsbedingungen zu gewährleisten. Für die Entwicklungsforschung könnten zudem Fördermittel für Modellprojekte der Nachhaltigkeitsforschung und grüne Technologien eingeworben werden.

5.1 Wachstumsanalyse

Botanische Kartierungen und fotografische Dokumentation der Pflanzenbiomasse und Artenverteilung auf den Paneelen gibt Aufschluss über die Wachstumsraten und Idealbedingungen für die verschiedenen Arten. Probleme können so frühzeitig erkannt und mit technischen Lösungen adressiert werden.

5.2 Wachstumsregime

Bewässerung, Nährstoffgehalt, und Beleuchtung sind die kontrollierten Einflussgrößen auf das Wachstum der Moose. In der initialen Wachstumsphase muss mit intensiverer Wartung des Wasserkreislaufs und der technischen Steuerung gerechnet werden. Auch eine Nachrüstung von biologischen und mechanischen Filterstufen oder Bewässerungstechnik kann notwendig sein, bis ein stabiles Wasserregime für den Standort gefunden wird.

Verschiedene Moos-Arten haben unterschiedliche Ansprüche und Optima für das Wachstum. Um die optimalen Bedingungen für die gewünschten Arten zu finden, kann die Wirkung verschiedener Regime auf das Wachstum experimentell verglichen werden. Solche vergleichenden Set-Ups können erst nach einer gewissen Betriebszeit statistisch gegeneinander abgewogen werden. Bei einem modularen Aufbau mit mehreren dezentralen Wasserkreisläufen könnten auch verschiedene Nährstoffregime (Leitwert, pH) vergleichend getestet werden.

5.3 Anlagenautomatisierung

Die Einrichtung eines Sensornetzwerkes dient der Fernwartung und Überwachung der Anlage. Vor allem die technische Funktionsweise wird mittels Durchfluss- und Wasserstandssensoren, sowie Temperatur- und Feuchtefühlern überwacht. Zusätzlich können Parameter der Wasserqualität (pH, Leitwert) erhoben werden.

Eine Notabschaltung, etwa bei Wasserverlust oder Frost, könnte leicht an die Sensorik gekoppelt werden. Mittels einer automatisierten Schaltung von Pumpen zur Zugabe von Dünger und Ansäuerung können zudem die Anlagenwerte auf den Soll-Wert korrigiert werden. Auch ein Auffüllen der Verdunstungsverluste aus dem Wasserkreislauf durch Regen- oder Leitungswasser kann an

dieser Stelle geschehen. So wird der Verbrauch an Wasser auf ein Minimum reduziert und optimale Wachstumsbedingungen erhalten.

Die Feinjustierung und Positionierung einer solchen Anlagenautomatisierung können erst im laufenden Betrieb erfolgen.

5.4 Mikrobiologisches Management

Die Blattoberflächen der Pflanzen sind mit Pilzen und Bakterien besiedelt, die zur Phytoremediation von Luftschadstoffen einen Beitrag leisten können. Ebenso finden sich im Wasserkreislauf und Vlies Bakterienkulturen, die dem Abbau von Feinstaub und organischen Verbindungen zuträglich sein können. Die Etablierung mikrobieller Kulturen in der Grünwand muss ggf. durch Beigabe gewährleistet werden bzw. durch die Schaffung der geeigneten Umweltbedingungen in Stufen der Wasseraufbereitung gefördert werden. Bei der wissenschaftliche Erarbeitung der geeigneten mikrobiellen Kulturen können wir auf einschlägige Fachliteratur zur funktionellen Vielfalt von Boden- und Wasserorganismen zurückgreifen (Fierer, Barberán, und Laughlin 2014) sowie auf die Methoden in der Meerwasseraquaristik. Der Nachweis von geeigneten Mikroorganismen erfolgt durch Analyse von Wasserproben und Pflanzenoberflächen mit Methoden der Metagenomik zur Breitband-Sequenzierung von Umweltproben (,eDNA‘). Auch eine mögliche Anwendung Transgener Mikrobekulturen zur Förderung bestimmter enzymatischer Produkte muss geprüft werden.

6 Wirksamkeitsforschung

Über die Entwicklungsforschung (Punkt 5.) hinaus, ergeben sich zahlreiche Forschungsfragen zur Phytoremediation mit Moosen, die Anhand einer Mooswand im Citytunnel erforscht werden können. Bei Lage im Innenbereich des Tunnels herrschen zudem gut kontrollierte Umweltbedingungen: natürliche Witterung als Einflussfaktor ist ausgeschlossen. Diese laborartigen Konditionen eröffnen großes Potential für die Erforschung von Wirkmechanismen.

Einer Mooswand im Citytunnel der Wissenschaftsstadt Darmstadt könnte als offene Labor-Plattform für Forschungsprojekte dienen. Zusätzliche Fördermittel, etwa für einen lokalen Forschungsverbund, können von den interessierten Einrichtungen selbst eingeworben werden. Es ist zu prüfen, inwieweit eine Anschubfinanzierung, etwa für Workshops oder zur Koordination eines Projektantrags, aus städtischen Mitteln bereitgestellt werden könnte.

Im Folgenden sind nur einige Möglichkeiten der Datenerhebung und Erforschung angerissen.

6.1 Luftschadstoffmonitoring (Hessisches Luftmessnetz)

Die Daten des hessischen Luftmessnetzes am Standort Hügelstraße sind die primären Kennzahlen zur Überprüfung der Wirksamkeit. Die Messdaten für Feinstaub (PM₁₀), Stickoxid (NO & NO₂), sowie organische Verbindungen (Benzol, Toluol, Xylol) werden hier alle 5 Sekunden erhoben und sind öffentlich tagesaktuell abrufbar (<https://www.hlnug.de/?id=9231>). Eine statistische Auswertung der aktuellen Messwerte im Vergleich zu den Vorjahren kann auf Basis der Monatsmittelwerte erfolgen. Eine abschließende statistische Bewertung der Wirksamkeit aufgrund dieser Daten ist allerdings in Ermangelung identischer Vergleichsflächen nicht ohne weiteres möglich.

Hier muss darauf hingewiesen werden, dass ein Nachweis der Wirksamkeit der Einzelmaßnahmen bei gleichzeitiger Installation anderer Luftaufbereitungstechniken, z.B. photokatalytische Luftreinigung mit Titandioxid, oder Änderungen in der Verkehrsführung, nur noch sehr eingeschränkt möglich ist.

Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten können Aufgrund der jährlichen Variation im saisonalen Verlauf möglicherweise erst drei bis fünf Jahre nach Implementierung von Maßnahmen nachgewiesen werden. Maßgebend sollte daher die Anzahl der Tage sein, an denen die gesetzlichen Grenzwerte überschritten werden.

6.2 Zusätzliche Sensorik für Feinstaub, Temperatur und Luftfeuchte

Eine direkte Wirksamkeitsmessung kann durch Anbringung eigener Feinstaubsensorik an der Grünwand und einem vergleichbaren Kontrollstandort (anderer Ausgang des Citytunnels) erfolgen. Während des Betriebs können Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit durch Thermo-hygro-logger am Standort gemessen werden.

Eigene geeichte Sensortechnik zur Erfassung von Feinstaub und Stickoxid ist mit zusätzlichen Kosten verbunden. Eine solche Sensorik könnte leicht an die strukturellen Komponenten und Dateninfrastruktur der Grünwand ansetzen. Daten von dezentralisierten Sensoren würden dann in eine Datenbank zusammengeführt und im Internet zu Forschungszwecken und für interessierte BürgerInnen veröffentlicht.

6.3 Ökologische Merkmalsdaten

Basierend auf funktionalen Merkmalsmessungen („Traits“, wie Einzelblattfläche, Zellvolumen, Wuchsform) der Moose können funktionale Unterschiede mit Daten zur Adhäsion und chemische Rückstände (siehe unten) korreliert werden. So können allgemeine Charakteristika beschrieben werden, die eine Filterung von Schadstoffen begünstigen. Diese Erkenntnisse wären auf andere Standorte übertragbar und könnten zukünftig wertvolle Informationen für die Auswahl von Moos-Arten geben.

6.4 Filteranalyse (Filter im Wasserkreislauf, Rückstände und Sedimente)

Die Menge der Feinstaubpartikel und Rückstände von Schwermetallen kann durch elektronenmikroskopische und massenspektrometrische Analyse von Standardfiltern im Wasserkreislauf erfolgen.

6.5 Stoffwechselwege in Pflanzen und Mikroorganismen

Gewebeproben können elektronenmikroskopisch und massenspektrometrisch auf Feinstaubrückstände und Einlagerung von Schwermetallen untersucht werden. Die Wachstumsraten können im Abgleich mit den Nährstoffbeigaben Aufschluss über die Fixierung von Luftstickstoff geben. Die physiologische Fixierung durch den Stoffwechselweg der Pflanzen und Mikroorganismen kann durch massenspektrometrische Analyse des Pflanzengewebes untersucht werden. Die funktionelle Diversität der auf der Blattfläche vorhandenen Mikroorganismen kann mittels moderner genetischer Sequenzierungsmethoden (eDNA) quantifiziert werden.

6.6 Strömungsdynamik

Messungen und Simulationen der Luftströmungen im Tunnel und der durch die Mooswand bewirkten Aufrauung können einen Beitrag zur zukünftigen Positionierung ähnlicher Anlagen liefern. Auch kleinskalige aerodynamische Studien könnten die Adhäsion von Partikeln an der Mooswand weiter optimieren.

6.7 Sozialwissenschaftliche Wirkungsforschung

Die Perzeption der Grünwand kann durch Passanten- oder Anwohnerbefragungen erhoben werden, oder im Rahmen von städtischen partizipativen Plattformen diskutiert werden. Die Wirkung auf Gesundheit und Wohlbefinden, und auf verkehrspsychologische Aspekte könnte im Rahmen der Stadtforschung untersucht werden.

7 Bibliographie

- Bucher, Annette, Franziska Kohlrausch, Jens Michael Kuckelkorn, und Raphael Troll. 2016. *Berechenbare Unterstützung der Klimatisierung von energetisch hocheffizienten Gebäuden durch dezentrale, funktionale Innenraumbegrünung*. Forschungsinitiative ZukunftBau 2970. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- De Kempeneer, L., B. Sercu, W. Vanbrabant, H. Van Langenhove, und W. Verstraete. 2004. „Bioaugmentation of the phyllosphere for the removal of toluene from indoor air“. *Appl Microbiol Biotechnol* 64: 284–288.
- Dela Cruz, Majbrit, Renate Müller, Bo Svensmark, Jakob Skov Pedersen, und Jan H. Christensen. 2014. „Assessment of Volatile Organic Compound Removal by Indoor Plants—a Novel Experimental Setup“. *Environmental Science and Pollution Research* 21 (13): 7838–46. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2695-0>.
- Fierer, Noah, Albert Barberán, und Daniel C. Laughlin. 2014. „Seeing the forest for the genes: using metagenomics to infer the aggregated traits of microbial communities“. *Frontiers in Microbiology* 5 (November). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00614>.
- Frahm, J., und Marko Sabovljevic. 2007. „Feinstaubreduzierung durch Moose“. *Immissionsschutz-Berlin-* 12 (4): 152–56.
- Frahm, Jan-Peter. 2010. *Mit Moosen begrünen: Gärten, Dächer, Mauern, Terrarien, Aquarien, Straßenränder ; eine Anleitung zur Kultur*. Weissdorn-Verlag.
- Liu, Yan-Ju, Yu-Jing Mu, Yong-Guan Zhu, Hui Ding, und Nan Crystal Arens. 2007. „Which ornamental plant species effectively remove benzene from indoor air?“ *Atmospheric Environment* 41 (3): 650–54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.001>.
- Martin, Annie. 2016. *The Magical World of Moss Gardening*. Timber Press.
- Morikawa, H., A. Higaki, M. Nohno, M. Takahashi, M. Kamada, M. Nakata, G. Toyohara, u. a. 1998. „More than a 600-Fold Variation in Nitrogen Dioxide Assimilation among 217 Plant Taxa“. *Plant, Cell & Environment* 21 (2): 180–90. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1998.00255.x>.
- Nebel, Martin, und Georg Philippi. 2000. *Die Moose Baden-Württembergs, Bd.1, Allgemeiner Teil*. s.l.: Verlag Eugen Ulmer.
- Ottel , Marc, Hein D. van Bohemen, und Alex L. A. Fraaij. 2010. „Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls“. *Ecological Engineering*, Special Issue: BioGeoCivil Engineering, 36 (2): 154–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.007>.
- Perini, Katia, Marc Ottel , Saverio Giuliani, Adriano Magliocco, und Enrica Roccotiello. 2017. „Quantification of fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system“. *Ecological Engineering* 100 (M rz): 268–76. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.12.032>.
- S b , A., R. Poppek, B. Nawrot, H. M. Hanslin, H. Gawronska, und S. W. Gawronski. 2012. „Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces“. *Science of The Total Environment* 427–428 (Juni): 347–54. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084>.
- Wei, Xiangying, Shiheng Lyu, Ying Yu, Zonghua Wang, Hong Liu, Dongming Pan, und Jianjun Chen. 2017. „Phylloremediation of Air Pollutants: Exploiting the Potential of Plant Leaves and Leaf-Associated Microbes“. *Frontiers in Plant Science* 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01318>.

