

BBSR-  
Online-Publikation  
52/2024

# Algenbiofilm-Fassaden für reinere Luft und ein verbessertes Stadtklima

von

Dr. Julia von Werder  
André Gardei  
Prof. Dr. Anna Gorbushina  
Dr. Chiara Tonon  
Jake Cook

# Algenbiofilm-Fassaden für reinere Luft und ein verbessertes Stadtklima

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.07

Projektlaufzeit: 06.2021 bis 01.2024

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuerin

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“  
Verena Kluth  
verena.kluth@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin  
Dr. Julia von Werder  
julia.von-werder@bam.de

André Gardei  
Prof. Dr. Anna Gorbushina  
Dr. Chiara Tonon  
Jake Cook

### Redaktion

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin  
Dr. Julia von Werder

### Stand

Februar 2024

### Gestaltung

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin  
Dr. Julia von Werder

### Bildnachweis

Titelbild: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin  
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 108 f.

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

von Werder, J.; Gardei, A.; Gorbushina, A.; Tonon, C.; Cook, J., 2024: Algenbiofilm-Fassaden für reinere Luft und ein verbessertes Stadtklima. BBSR-Online-Publikation 52/2024, Bonn. <https://doi.org/10.58007/0pbf-ag59>

DOI 10.58007/0pbf-ag59

ISSN 1868-0097

Bonn 2024

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract in English	6
1 Einführung [-Was]	7
1.1 Biofilme auf Baustoffen	7
1.2 Untersuchungsgegenstand	9
2 Problemstellung [-Warum]	10
2.1 Stand der Forschung/Baupraxis	10
2.2 (daraus folgend) Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	11
3 Zielstellung [-Wofür]	13
3.1 Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu	13
4 Forschungsdesign [-Wie]	14
4.1 Arbeitshypothesen	14
4.2 Methodischer Ansatz	15
4.3 Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	17
4.4 Arbeitspakete und Meilensteine	17
5 Projektverlauf – Hauptteil, „Beweisführung“	18
5.1 Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	18
6 Ergebnisse	19
6.1 Auswahl und Anzucht der zu applizierenden Mikroorganismen	19
<i>Auswahl Algen zur Skalierung der Produktion (Solaga)</i>	19
<i>Auswahl Testorganismen (BAM)</i>	21
<i>Einfluss von pH-Wert und Nährmedium auf das Wachstum von Jaagichlorella (BAM)</i>	24
<i>Einfluss des pH-Werts in der Flüssigkultur</i>	25
<i>Einfluss des pH-Werts von festen Nährmedien</i>	25
6.2 Konzeption und Herstellung der Betonsubstrate (BAM, 7.1)	27
<i>Stufe 1- Proben aus UHPC</i>	28
<i>Stufe 2: Proben aus Standardmörtel mit CEM 1</i>	29
<i>Stufe 3 – Betonproben: Infraleichtbeton und "Altbeton"</i>	31

	<i>Künstliche Karbonatisierung</i>	32
	<i>Charakterisierung der Betonsubstrate (BAM, 7.1)</i>	34
	<i>Messung des pH-Werts an der Oberfläche</i>	34
	<i>Porengrößenverteilung bestimmt durch Quecksilberdruckporosimetrie</i>	36
	<i>Bestimmung der Wasseraufnahme durch kapillares Saugen</i>	39
	<i>Frost-Tausalzbeständigkeit</i>	41
6.3	<b>Laborversuchsreihen</b>	46
	<i>Versuche zur Kultivierung der unter biotechnologischen Gesichtspunkten ausgewählten Algen auf den Betonsubstraten (Solaga)</i>	46
	<i>Versuche zur Bewertung des Einflusses des pH-Werts und der Nährstoffverfügbarkeit? unterschiedlicher Substrate auf das Wachstum von Jaagichlorella bzw. den Modellbiofilm (BAM)</i>	47
	Untersuchungsmethodik	47
	Ergebnisse	52
	Schlussfolgerungen	56
6.4	<b>Freibewitterungsversuche</b>	58
	<i>Freibewitterungsversuche auf dem Gelände der BAM</i>	58
	<i>Freibewitterungsversuche am Standort von Solaga</i>	60
6.5	<b>Bestimmung der Ökosystemdienstleistungen</b>	68
	<i>Messung der Schadstoffbindung (Solaga)</i>	68
	<i>Versuche und Simulationsrechnungen zur Quantifizierung der Verdunstungskühle wassergesättigter Substrate (BAM)</i>	70
	Laborversuch	71
	Simulationsrechnungen	74
	<i>Biodiversitätsanalyse</i>	77
	Methodik	80
	Ergebnisse	82
	Ausblick	88
	<i>Ästhetische Bewertung und Workshop zur Gestaltung mit Algenfassaden</i>	89
7	<b>Fazit und Ausblick</b>	96
7.1	Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis	96
7.2	Bewertung/Diskussion/Zielerreichung	98
7.3	Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	99
7.4	Ausblick	99
8	<b>Verzeichnisse</b>	100
8.1	<b>Mitwirkende</b>	100
	<i>Autorinnen und Autoren</i>	100
	<i>Weitere Mitwirkende</i>	100
	<i>Projektpartner</i>	100

	<i>Fachliche Betreuung</i>	100
8.2	Kurzbiograpien	101
8.3	Literatur	103
8.4	Abbildungsverzeichnis	108
8.5	Tabellenverzeichnis	113

## Kurzfassung

Zielstellung der Forschungsarbeiten war die Entwicklung eines modularen Fassadenbegrünungssystems, das nicht auf der Anpflanzung höherer Pflanzen, sondern auf der Kultivierung von Algenbiofilmen direkt auf Fassadenplatten aus Beton basiert. Durch eine gezielte Anpassung des Betonsubstrats, die Auswahl geeigneter Pionierorganismen und eines geeigneten Bewässerungssystems sollten dauerhafte und ganzjährig ansprechende Fassadenelemente konstruiert werden, die zusätzlich die Luft reinigen und Verdunstungskühle bereitstellen.

Das Projektkonsortium umfasste Spezialist\*innen aus Wissenschaft und Baupraxis der Disziplinen: Ingenieur- und Baustoffwissenschaft, Geomikrobiologie, Biotechnologie und Architektur.

Die Untersuchungen ergaben, dass der pH-Wert der Betonmischung einen signifikanten Einfluss auf die Biorezeptivität hat und legen nahe, dass neben einem ausreichenden Feuchtigkeitsangebot auch die Verfügbarkeit von Mikronährstoffen eine größere Rolle spielt als zunächst angenommen.

Als größte Herausforderung stellte sich das Anwachsen der auf die Betonoberflächen aufgetragenen Mikroorganismen dar. Mit einem Pinsel auf die Baustoffoberflächen in hoher Konzentration aufgetragene Algen konnten in den Laborversuchen über mehrere Wochen konserviert werden. Exponiert auf Witterungsständen unter realen Verhältnissen verblassten die grünen Überzüge jedoch innerhalb weniger Tage. Laborversuchsreihen mit einem Modellbiofilm aus einer Alge und einem Pilz deuten darauf hin, dass sich die Mikroorganismen untereinander stabilisieren, indem sich die Algen zum Beispiel um Pilzhyphe gruppieren, die in den Untergrund einwachsen. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass Biofilme, in denen die Algen eine geringere Vitalität aufweisen, abrasiven Kräften durch simulierten Schlagregen besser standhalten.

Für eine dauerhafte Etablierung der Biofilme ist deshalb zukünftig die geeignete Anfangszusammensetzung in Bezug auf die Arten und Anteile der verschiedenen Organismen zu identifizieren. Bestätigt sich, dass Stress zu einer besseren Anhaftung der Organismen führt, ist dies in zukünftigen Laborversuchen zu berücksichtigen, um eine bessere Übertragbarkeit auf die natürlich bewitterten Oberflächen zu gewährleisten.

Grundsätzlich konnte verifiziert werden, dass die Kombination aus Betonsubstrat und Biofilm Luftschadstoffe binden kann und in den Sommermonaten Verdunstungskühle bereitstellt.

## Abstract in English

The aim of the research work was to develop a modular façade greening system that is not based on the planting of higher plants, but on the cultivation of algae biofilms directly on concrete façade panels. Through a targeted design of the concrete substrate, the selection of suitable pioneer organisms and an appropriate irrigation system, permanent and year-round attractive façade elements were to be designed which also purify the air and provide evaporative cooling.

The project consortium comprised specialists from the fields of science and construction practice: engineering and building materials science, geomicrobiology, biotechnology and architecture.

The investigations revealed that the pH value of the concrete mix has a significant influence on bioreceptivity and indicate that, in addition to a sufficient supply of moisture, the availability of micronutrients also plays a greater role than initially assumed.

The greatest challenge was sustaining the growth of the microorganisms on the concrete surfaces. High concentrations of algae applied to the building material surfaces with a brush could be preserved for several weeks in the laboratory tests. However, when exposed to the weather under real conditions, the green coatings faded within a few days. Laboratory test series with a model biofilm consisting of an alga and a fungus indicate a synergistic behavior of the microorganisms. Microscopic analysis shows that the algae group around the fungal hyphae which

grow into the substrate. The results also show that biofilms in which the algae have lower vitality are better able to withstand abrasive forces caused by simulated driving rain.

To ensure durable biofilms the appropriate initial composition in terms of species and proportions needs to be defined in future research. If it is confirmed that stress leads to better adhesion of the organisms, this should be considered in future laboratory tests in order to ensure better transferability to naturally weathered surfaces.

In principle, it could be verified that the combination of concrete substrate and biofilm can bind air pollutants and provide evaporative cooling in the summer months.

## 1 Einführung [-Was]



Bild: Benjamin Herzog

Abbildung 1. Wärmedämmverbundsystem mit Algenbiofilm

### 1.1 Biofilme auf Baustoffen

Wie auch auf natürlichen Oberflächen bilden sich auf bewitterten Baustoffen wie Fassaden im Laufe der Zeit Biofilme [1]. Besonders offensichtlich wurde der primär ästhetische Bauschaden Anfang der 90er-Jahre nach der großflächigen Sanierung von Plattenbauten bzw. der Neuerrichtung von Wohngebieten in den neuen Bundesländern ([2], [3]). Durch die gute Dämmung der Außenwände wurden die Oberflächentemperaturen der Wetterschutzschicht planmäßig reduziert und dadurch die Trocknungsbedingungen für Niederschlag und Tauwasser deutlich verschlechtert [4]. In zahlreichen Forschungsarbeiten zur Problematik des Algenbefalls an Fassaden wurden die Rauigkeit der Oberfläche sowie die hygrischen Materialeigenschaften als ausschlaggebend eingestuft [5], [6]. Insbesondere wurden lang anhaltende Feuchtigkeitsfilme auf den Oberflächen als Hauptursache für das Wachstum von Mikroorganismen identifiziert [7]. Auch visuell ist in der Regel sehr gut zu erkennen, dass die Gegenwart von grün-schwarzen Biofilmen mit dem Feuchteangebot auf den betroffenen Fassaden korreliert [8].



Im Forschungsprojekt Algenbiofilmfassade sollte der Nachteil des primär ästhetischen Problems in einen Vorteil umgemünzt werden und Fassadenelemente aus Beton entwickelt werden, die planmäßig mit einem Algenbiofilm ausgestattet sind. Das Projekt reiht sich ein in verschiedene internationale Ansätze mit dem Ziel einer mikrobiom-inspirierten grünen Infrastruktur zur Förderung gesunder städtischer Ökosysteme [9].

## 1.2 Untersuchungsgegenstand

Ziel des Forschungsprojekts war es, ein Betonsubstrat zu entwickeln, das die Etablierung eines großflächigen und beständigen Biofilms auf Fassaden ermöglicht und gleichzeitig dauerhaft ist. Die Algenbiofilm-Fassade soll eine Alternative zu konventioneller Fassadenbegrünung darstellen und weiterhin, einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung von Luftschadstoffen im innerstädtischen Bereich leisten. Außerdem wird erwartet, dass die neuartige Fassadenbegrünung die Artenvielfalt erhöht und den Hitzeinsel-Effekt dämpft.



Bild: André Gardei (BAM)

Abbildung 2. Vision einer Biofilmfassade

## 2 Problemstellung [-Warum]

Die innerstädtische Luftverschmutzung und der "Wärmeinsel-Effekts" nehmen infolge des Klimawandels zu und beeinträchtigen die Lebensqualität und die Gesundheit der Bewohner von Großstädten erheblich [10]. Nach Einschätzung der EU-Umweltagentur standen im Jahr 2021 rund 250.000 Todesfälle in der Europäischen Union im Zusammenhang mit zu viel Feinstaub in der Luft [11].

Pflanzen können Luftschadstoffe auf ihren Oberflächen fixieren und teilweise verstoffwechseln. Daher ist die Renaturierung der Innenstädte ein wichtiger Ansatz, der Luftverschmutzung zu begegnen. Begrünung führt dabei zusätzlich zu einer Verringerung der Lufttemperatur und der Lärmbelastigung sowie einer Verbesserung der Resilienz der Städte gegenüber dem Klimawandel [12], [13]. Studien bestätigen, dass der bloße Anblick von Pflanzen zu Stressabbau und Regeneration führen kann [14].

Die Nutzung der Fassadenflächen als vertikale Gärten erfordert in der Regel intensive Gartenarbeit und verursacht damit hohe Wartungskosten. Algen wachsen dagegen bei ausreichendem Feuchteangebot natürlicherweise auf Fassadenoberflächen auf und führen zu einer bislang meist ungewollten Vergrünung, die oft mit Bioziden bekämpft wird. Immobilisierte Algenbiofilme werden in der Abwasserbehandlung zur Klärung eingesetzt ([15], [16]). Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass Algenbiofilme auf Fassaden ebenfalls in der Lage sind, Luftschadstoffe zu binden und zu verstoffwechseln. Deshalb sollen im Rahmen der Forschung biorezeptive, mit einem Algenbiofilm begrünte Fassadenpaneele entwickelt werden, die zukünftig einen von vielen Bausteinen für die Begrünung der Innenstädte darstellen. Die Leistungsfähigkeit der Systeme in Abhängigkeit der klimatischen Randbedingungen – insbesondere der Verfügbarkeit von Wasser - soll bestimmt und mit konventioneller Begrünung verglichen werden.

### 2.1 Stand der Forschung/Baupraxis

Die gezielte Erhöhung der Biorezeptivität von Baumaterialien ist ein relativ neues Forschungsgebiet [5], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23]. Die Verschiebung des Fokus vom potenziellen Schädigungspotenzial auf den Mehrwert von Biofilmen hinsichtlich verschiedener Ökosystemleistungen und einer Schutzfunktion stellt einen Paradigmenwechsel dar, der selbst in der Denkmalpflege diskutiert wird [24]. In einer Vielzahl von Studien wurden die Auswirkungen spezifischer Eigenschaften wie der Textur, Farbe, Chemie und der Benetzungseigenschaften der Oberfläche sowie der Porosität des Baustoffs auf die Biorezeptivität von Beton ermittelt. [25], [26], [27]

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist der wichtigste Parameter für die Biorezeptivität die regelmäßige und längerfristige Verfügbarkeit von flüssigem Wasser an der Oberfläche. [7], [28], [29], [30] Die Verweildauer von flüssigem Wasser auf dem Substrat bzw. eine relative Porenluftfeuchte nahe der Sättigung werden durch die Adhäsion von Schlagregen und die Saugfähigkeit des Substrats gesteuert. [31] Oberflächen mit Rillen und Vertiefungen, die als Auffangflächen fungieren, und Rippen, die die Wasserbewegung über die Fassadenoberfläche verlangsamen, halten Regen- und Tauwasser besser zurück als ebene Oberflächen[20] und bieten darüber hinaus Verankerungsmöglichkeiten für die im Aerosol oder Regen enthaltenen Mikroorganismen und Nährstoffquellen sowie eine lokale Beschattung vor direkter Sonneneinstrahlung, Wind und Abrasion. [6]

Was die Oberflächenchemie betrifft, so wurde der ursprüngliche pH-Wert des Substrats als ein wichtiger Faktor für das Primärwachstum identifiziert. [32] Wie schnell sich dieser Wert mit der Bewitterung ändert, ist primär abhängig von der Porosität und den klimatischen Randbedingungen, aber auch die Deposition von Schmutzpartikeln an der Baustoffoberfläche, das Auslaugen von Porenlösung und der Prozess der Biofilmbildung haben einen Einfluss. Die irreversible Anhaftung von Mikroorganismen wird durch eine Konditionierungsschicht erleichtert, die sich aus verschiedenen organischen und anorganischen Partikeln zusammensetzen kann. [33] Sobald sich subaerobe Biofilme an der Grenzfläche zwischen der

harten Oberfläche und der Atmosphäre entwickeln, interagieren sie weiter mit ihrem Substrat und verändern es zum Beispiel durch die Absonderung von extrazellulärem Schleim, organischen Säuren und sauren Polysacchariden.

Die ersten Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Biorezeptivität von Baumaterialien konzentrierten sich auf die Förderung der natürlichen Besiedlung durch Auswahl oder Anpassung des Substrats [34], [35]. Auch der Einfluss verschiedener Nährstoffschichten sowie das Aufbringen von Saatgut höherer Pflanzen direkt auf durchlässige Betonoberflächen wurde untersucht [23],[36]

In den letzten Jahren wurden zunehmend auch Ergebnisse von Studien veröffentlicht, in denen Moose auf Beton transferiert bzw. direkt auf der Oberfläche angepflanzt wurden[37].

Neben dem Kunststein Beton wird auch die Eignung anderer Baumaterialien als Substrat für Biofilme, Moose und niedere Pflanzen untersucht. Die von der Wohnungsgenossenschaft Gartenheim aus Hannover mit Partner entwickelte Moosmaschine verbindet begrünte Moos-Trägerplatten mit einem in die Fassade integrierten ausgeklügelten Bewässerungskonzept und hat sich über mehrere Jahre im Freiland bewährt [[Lebende Mooswände und Wandbegrünung | Moosmaschine](#)]. An der Bartlett School of Architecture wurde weiterhin ein modulares Fliesensystem aus Ton entworfen, das fächerförmig von aderartigen Kanälen durchzogen ist, so dass von oben eingefülltes Schmutzwasser gleichmäßig über die Fläche verteilt wird. Die Kanäle enthalten auf einem Hydrogel stabilisierte Mikroalgen, die das Abwasser durch ihren Stoffwechsel biologisch klären [[Bio-ID Lab creates algae tiles that can extract heavy metals from water \(dezeen.com\)](#)].

Fast alle Forschungsarbeiten zur Biorezeptivität von Baumaterialien wurden entweder von Biologen oder von Ingenieuren und Materialwissenschaftlern durchgeführt. Das Fehlen eines wirklich interdisziplinären Ansatzes führte manchmal zu fragwürdigen Versuchsplänen und ist wahrscheinlich der Grund dafür, dass es so viele widersprüchliche Ergebnisse und keine standardisierten Versuchsaufbauten gibt. [38] Die Relevanz der experimentellen Parameter für die mikrobielle Besiedlung von Oberflächen lässt sich anhand der Wachstumsraten von Biofilmen bei unterschiedlichen Temperaturen und Wasserverfügbarkeitsgraden auf Granitoberflächen erkennen.[39] Darüber hinaus sind einige Standardparameter, die üblicherweise zur Charakterisierung von Materialeigenschaften verwendet werden, wie z. B. der pH-Wert, nicht ohne weiteres auf die Bewertung der Biorezeptivität übertragbar, da sie sich per Definition auf die Masse des Materials und nicht auf seine Oberfläche beziehen. [40]

Die Idee, ein technisch hergestelltes biorezeptives Betonsubstrat mit einem technisch hergestellten algendominierten Biofilm zu kombinieren, ist nach dem Kenntnisstand der Antragsteller ein neuer Ansatz, der bislang nicht systematisch und insbesondere nicht interdisziplinär erforscht wurde.

## 2.2 (daraus folgend) Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Folgende Forschungsfragen, sollten im Rahmen des Forschungsvorhabens beantwortet werden:

1. Wie muss der anfängliche Biofilm zusammengesetzt sein, um die langfristige Stabilität und das optische Erscheinungsbild zu gewährleisten?
2. Welche Betonrezeptur und -mikrostruktur sowie welches Benetzungsverhalten begünstigt die Anlagerung und gleichmäßige Ausbreitung der Mikroorganismen?
3. Wie kann die Etablierung eines Biofilms auf der Fassade beschleunigt werden?
4. Wie müssen die bedarfsgesteuerte Bewässerung und die Versorgung mit Spurenelementen gestaltet sein, um ein optimales Wachstum zu ermöglichen?
5. Welchen Beitrag leisten Fassadensysteme zum Metabolismus von Luftschadstoffen, insbesondere CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>?
6. Welchen Beitrag leisten die neuen Fassadenelemente zur Reduzierung der Oberflächentemperatur nach Sonneneinstrahlung und zur Rückhaltung von Niederschlagswasser?

7. Wie wird der ästhetische Eindruck bewertet und wie können die neuen Elemente architektonisch integriert werden?

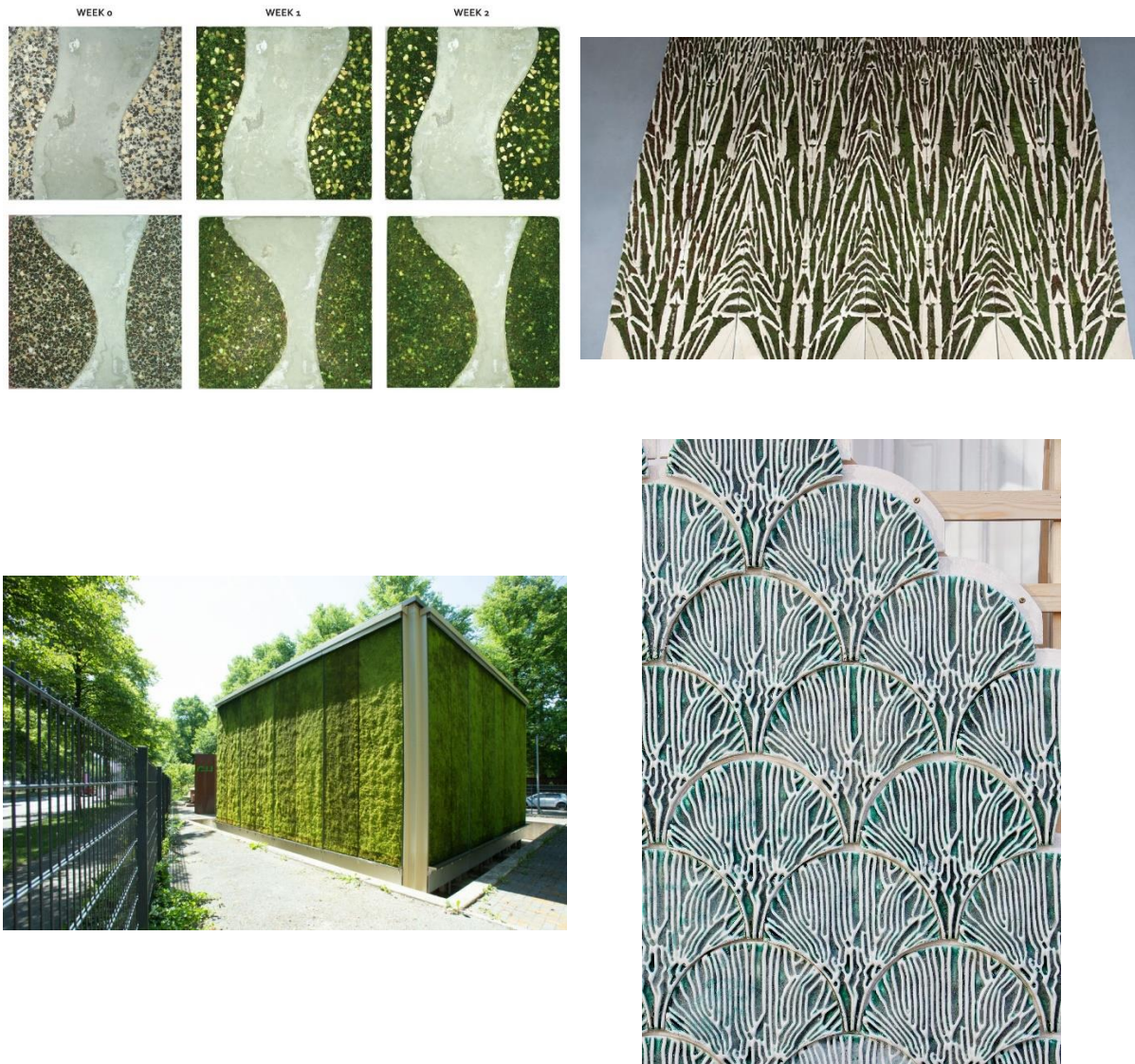


Abbildung 3. Stand der Forschung  
oben links: [34].: Biorezeptiver Beton – Entwicklung des Bewuchses unter optimalen Bedingungen  
oben rechts: [23] Poikolohydric Living Wall, Bartlett School of Architecture, unten links:  
Moosmaschine der Wohnungsgenossenschaft Gartenheim, Hannover [41], unten rechts: Algae  
infused tiles des Bio-ID Lab der Bartlett School of Architecture [42]

### 3 Zielstellung [-Wofür]

Die neuen Fassadenelemente sollen die Vielzahl der Möglichkeiten ergänzen, die Innenstädte der Zukunft grüner und lebensfreundlicher zu gestalten. Zielstellung war es mit einem Algenbiofilm ausgestattete Fassadenpaneele mit folgenden Eigenschaften zu entwickeln:

- ganzjährig ansprechende Optik
- Bindung von Luftschadstoffen
- Verbesserung des Stadtklimas durch Reduzierung des innerstädtischen Hitzeinseleffekts
- Erhöhung der Biodiversität im städtischen Raum
- akzeptable Herstellungskosten
- geringes Flächengewicht und einfache Montage
- geringer Wartungsaufwand
- dauerhaft und vollständig rezyklierbar

#### 3.1 Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Durch die Entwicklung von ganzjährig flächig mit einem Algenbiofilm bewachsenen Fassadenelementen wird das Problem des ungewollten Algenbewuchses von Fassaden, das bis dato als Mangel klassifiziert ist [43], in einen Mehrwert umgewandelt. Statt den Bewuchs durch eine biozide Ausrüstung der Fassadenfarben und Putze zu bekämpfen, werden gezielt Mikroorganismen auf den Oberflächen etabliert. Das Auswaschen von Bioziden und die potenzielle Belastung des Grundwassers [44], [45] kann damit sicher vermieden werden. Im Idealfall sind die Biofilm-Fassaden konventionellen Fassadenbegrünungssystemen in ihrem Potenzial zur Reduktion der Stickoxid- und Feinstaubbelastung vergleichbar.

Durch die interdisziplinäre Forschung wird der anthropogene Lebensraum so beeinflusst und gestaltet, dass er einen Beitrag zur Verbesserung des Stadtklimas und der Biodiversität leistet [46], [47]. Gelingt es eine neue und wartungsarme Fassadenbegrünung zu entwickeln, eröffnet dies Architekten neue Gestaltungsmöglichkeiten, mit der die Flächenversiegelung minimiert und eine städtepsychologisch ansprechende Wirkung erzielt wird [48].

## 4 Forschungsdesign [-Wie]

Da das Forschungsvorhaben in enger Zusammenarbeit mit dem Praxispartner Solaga bearbeitet wurde, ergänzten sich ein streng wissenschaftlicher und ein pragmatischen Ansatz.

An der BAM wurden reproduzierbare Experimente unter klar definierten, sterilen Bedingungen im Wachstumsschrank mit Testorganismen durchgeführt und Methoden für die Quantifizierung des Bewuchs sowie zur Bewertung der Interaktion der Testorganismen entwickelt.

Bei Solaga wurde dagegen versucht, den für das erfolgreiche Produkt Algenbild verwendeten Ansatz zu modifizieren und auf bewitterte Betonsubstrate zu übertragen. Die in den Photobioreaktoren für die Experimente gezüchteten Algen waren dabei keine Reinkulturen und unter streng wissenschaftlichen Kriterien deshalb nicht ausreichend definiert. Auch standen bei Solaga nicht wie an der BAM sterile Werkbänke und Wachstumsschränke zur Verfügung mit denen eine Verunreinigung bei der Applikation und Bewitterung der Proben verhindert werden konnte.

Für beide Ansätze wurden im ersten Schritt geeignete Algenstämme bzw. Mischungen aus den Testorganismen Alge und Pilz für die Untersuchungsreihen ausgewählt und verschiedene Möglichkeiten getestet, um die Organismen auf den Oberflächen zu applizieren. Anschließend wurde in Versuchsreihen analysiert, welche Eigenschaften der Betonsubstrate die Biorezeptivität des Materials verbessern. In den Versuchen an der BAM wurde insbesondere der Einfluß des pH-Werts und der Nährstoffverfügbarkeit untersucht und die Biozeptivität mittel verschiedener Fluoreszenzparameter ausgewertet.

Um die Dauerhaftigkeit der Algen auf den Betonoberflächen zu untersuchen, wurden von Solaga im nächsten Schritt Bewitterungsversuche mit verschiedenen Beregnungsschemata sowie unter realen Klimarandbedingungen durchgeführt. Die Quantifizierung der Biorezeptivität erfolgte primär über eine visuelle Auswertung sowie später auch Gaswechselfmessungen.

Da es bis zum Projektende nicht gelungen ist, kuratierte Biofilme langfristig auf den Betonsubstraten zu etablieren, erfolgten die Untersuchungen zur Verdunstungsleitung an den unbewachsenen Betonsubstraten. Die Leistungsfähigkeit der Schadstoffbindung wurde nur stichprobenhaft analysiert.

### 4.1 Arbeitshypothesen

Zielstellung des interdisziplinären Forschungsvorhabens unter Beteiligung von Partnern aus der Wirtschaft war die Entwicklung von robusten, mit Algenbiofilmen begrünten Fassadenelementen aus Beton, die das Stadtklima verbessern und die innerstädtischer Artenvielfalt erhöhen. Die Reduzierung von Luftschadstoffen und die Abschwächung der innerstädtischen Aufheizung ist mit Blick auf die erforderlichen Anpassungen an die unvermeidlichen Folgen des Klimawandels von besonderer Dringlichkeit.

Den Forschungsarbeiten lagen folgende Arbeitshypothesen zu Grunde:

- Durch eine gezielte Anpassung des Betonsubstrats, die Auswahl geeigneter Pionierorganismen sowie die Entwicklung eines geeigneten Bewässerungsregimes lassen sich dauerhafte und ganzjährig ansprechende grüne Fassaden gestalten.
- Die Algenbiofilmfassaden binden Luftschadstoffe und leisten einen Beitrag zur Reduzierung des innerstädtischen Hitzeinsel-Effekts.
- Sie sind mit konventionellen grünen Fassaden konkurrenzfähig.

## 4.2 Methodischer Ansatz

Zur Untersuchung der mit den Biofilmen ausgestatteten Betonsubstrate wurden sowohl quantitative als auch qualitative Methoden eingesetzt. Zunächst wurden robuste und schnell wachsende Algenstämme identifiziert, die auf den Oberflächen dominant aufwachsen und den wechselnden Klimarandbedingungen widerstehen können. Gleichzeitig wurden Betonmischungen und Oberflächeneigenschaften variiert, um die bestmögliche Kompatibilität zwischen Substrat und Biofilm zu erzielen und nicht nur eine Anheftung, sondern ein schnelles Anwachsen der Mikroorganismen auf den Flächen zu ermöglichen. In Labor- und Freibewitterungsversuchen wurde die Entwicklung der Biofilme auf den Oberflächen und ihrer Vitalität unter wechselnden Randbedingungen ausgewertet.

Während die Laborversuche an der BAM unter sterilen Bedingungen und horizontaler Lagerung in Wachstumsschränken stattfanden, wurde die Biorezeptivität der Substrate bei Solaga in modifizierten Aquarien durchgeführt, in denen die Proben auch unter einer definierten Neigung bzw. vertikal gelagert und mit verschiedenen Systemen beregnet werden konnten (Abbildung 4). Die unterschiedlichen Herangehensweisen sind in ihrer Aussagekraft beide limitiert und ergänzen sich in ihren Vor- und Nachteilen (Tabelle 1). Während z. B. nur bei den Versuchen von Solaga, der Einfluß der Textur auf die Anheftung und Dauerhaftigkeit der Organismen berücksichtigt wird, haben sie den Nachteil, dass die Zusammensetzung der Organismen und der Einfluß einer möglichen Interaktion nur sehr begrenzt zum Zeitpunkt der Inokulation kontrolliert werden kann. Da beide Versuchsaufbauten eine Inokulation der Proben mit den Mikroorganismen voraussetzen, werden die realen Bedingungen für eine Anheftung der Organismen, die mit dem Wind oder Regen an die Oberflächen verfrachtet werden nicht abgebildet.

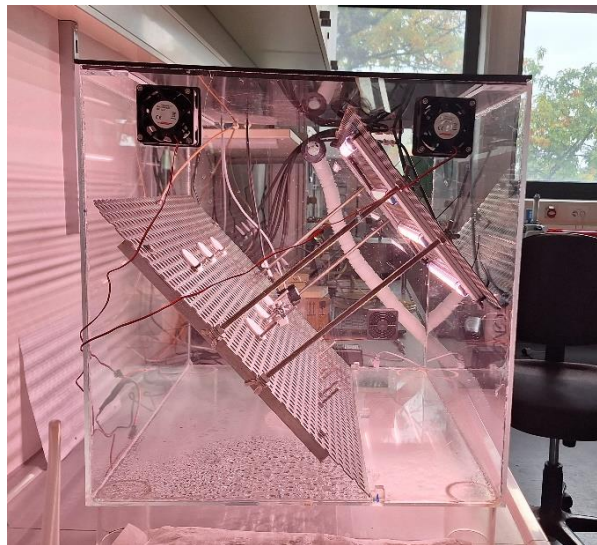


Abbildung 4. Nicht steriler Laborversuchsaufbau zur künstlichen Bewitterung von Baustoffproben (Bild BAM)



Tabelle 1. Vergleich der Laborversuchsreihen von Solaga / BAM in Abhängigkeit der wichtigsten Parameter zur Bewertung der Biorezeptivität

<b>Prüfkriterium</b>	Sterile Probenlagerung im Wachstumsschrank (BAM)	Labora Aufbau mit Probengestell und Beregnung (Solaga)
<b>Anheften der Mikroorganismen</b>	nicht repräsentativ	nicht repräsentativ
<b>Verfügbarkeit von Licht</b>	repräsentativ abbildbar	repräsentativ abbildbar
<b>Temperatur</b>	nur isotherme Bedingungen	nur isotherme Bedingungen
<b>Wasserverfügbarkeit</b>	Durch Sättigung der Proben vorab kein limitierendes Kriterium	Wechsel zwischen Befeuchtung und Trocknung kann in gewissen Grenzen simuliert werden
<b>Einfluss von Textur und Porosität der Substrate</b>	durch horizontale Lagerung und Sättigung Einfluss auf die Anheftung + Wasserverfügbarkeit nicht repräsentativ	Einfluss der Textur auf die Anheftung, Akkumulation und Verweildauer von flüssigem Wasser kann vereinfacht erfasst werden
<b>Wirkung abrasiver Kräfte</b>	nicht repräsentativ	in Grenzen durch Beregnung abbildbar
<b>Interaktion verschiedener Organismen</b>	für Testorganismen systematisch analysierbar	nicht kontrollierbar
<b>PH-Wert / Oberflächenchemie</b>	Grundsätzlich messbar, repräsentativ für Ausgangszustand (Bewitterung und Aerosoleinfluss wird nicht erfasst)	Karbonatisierung und Veränderungen der Oberflächenchemie durch instationäre Beregnung in Grenzen abbildbar
<b>Nährstoffverfügbarkeit</b>	Grundsätzlich messbar, repräsentativ für Ausgangszustand (Bewitterung und Aerosoleinfluss wird nicht erfasst)	Änderungen in der Nährstoffverfügbarkeit durch Auswaschung / Abrasion in Grenzen abbildbar

Da es bis zum Schluß nicht gelungen ist, die Algenbiofilme auf den Oberflächen dauerhaft zu etablieren, wurden erste Untersuchungen zur Schadstoffaufnahme und zur Bereitstellung von Verdunstungskühle nur im Labor durchgeführt. Die Analyse der mit Algenbiofilmen verbundenen Biodiversität erfolgte an freibewitterten Proben und Oberflächen, die einen natürlichen Aufwuchs zeigten.

Für die ästhetische Beurteilung wurden Labormuster und Fotografien von Fassaden mit natürlichem Bewuchs kombiniert. Für die Entwicklung von Entwurfsideen mit Algenbiofilmen diente ein reales Schulgebäude aus Dresden, das flächigen Algenbewuchs auf einem Wärmedämmverbundsystem aufweist.

### 4.3 Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

An der Bundesanstalt für Materialforschung wurde das Projekt vom Fachbereich Baustoffe und der Forschungsgruppe "Modellbiofilme und Geomykologie" der Abteilung Materialien und Umwelt bearbeitet. Während die Baustoffwissenschaftler biorezeptiven Beton entwickelten und charakterisierten, arbeiteten die Forscher aus der Abteilung 4 an der Auswahl geeigneter Mikroorganismen für den zu etablierenden Biofilm und Methoden, um die Interaktion mit dem Betonsubstrat zu quantifizieren. Langfristig soll mit dem Modellbiofilm ein Schnelltest zur Quantifizierung der Biorezeptivität entwickelt werden. Verbundpartner war das Berliner Start-up Solaga, das sich schwerpunktmäßig mit den biotechnologischen Fragen wie der Auswahl und Anzucht geeigneter Organismen und der Applikationstechnologie beschäftigte. Da die in den firmeneigenen Laboren keine definierten Reinkulturen hergestellt werden konnten und auch die Weiterverarbeitung der Algen nicht unter sterilen Bedingungen erfolgte, wurde hier ein pragmatischer, aber für die Baupraxis durchaus realistischer Ansatz verfolgt. Der Betonfertigteilterhersteller BNB aus Potsdam beriet bei der Rezepturentwicklung und fertigte zahlreiche Prüfkörper an. Über einen Unterauftrag war der Lehrstuhl für Sozial- und Gesundheitsbauten der Technische Universität Dresden eingebunden, der am Ende des Projektes einen Architektenworkshop zur ästhetischen Bewertung der Fassadenmuster durchführte.

### 4.4 Arbeitspakete und Meilensteine

Das interdisziplinäre Forschungsprojekt war gemäß den Antragsunterlagen in fünf Arbeitspakete unterteilt.

1. Inhalt des ersten Arbeitspakets war der Entwurf und die Herstellung von Betonsubstraten sowie die Auswahl der zu applizierenden Mikroorganismen. Aufgabe des Fachbereichs Baustoffe war es, die Substrateigenschaften so zu optimieren, dass sie den Mikroorganismen ideale Anheftungsbedingungen und eine ausreichende Wasserverfügbarkeit bieten. Um sicherzustellen, dass die Produktentwicklung mit den Anforderungen der Industrie übereinstimmt, wurde BNB, ein Hersteller von Betonfertigteilen, bereits in der Konzeptionsphase einbezogen. Die Abteilung Material und Umwelt der BAM wählte zusammen mit Solaga geeignete Mikroorganismen aus und erprobte Techniken zur deren Applikation auf den Oberflächen.
2. Das zweite Arbeitspaket umfasste die Durchführung von Laborversuchsreihen. Um die Biorezeptivität des Substrats zu optimieren, wurden Betone und ausgewählte Referenzen unter definierten Bedingungen bewittert und die Zunahme der Biomasse quantifiziert.
3. Im dritten Arbeitspaket wurden Bewitterungsexperimenten im Freien durchgeführt. Von Solaga wurde weiterhin das Aufnahmepotenzial für CO<sub>2</sub> und NO<sub>2</sub> im Zeitverlauf analysiert und ein Versuch zur Bindung von Luftschadstoffen konzipiert. Da es bis zum Projektende nicht gelungen ist, dauerhafte Biofilme auf den Oberflächen zu etablieren, wurde die Verdunstungsleistung für unterschiedliche Betonsubstrate im Labor und über numerische Simulationsrechnungen untersucht.
4. Inhalt des vierten Arbeitspaketes war nach der ursprünglichen Projektplanung das Upscaling der vielversprechendsten Lösung durch die Firma BNB. Aufgrund der ungelösten Dauerhaftigkeit der Biofilme, wurde das Upscaling zurückgestellt und stattdessen von BNB zusätzliche Prüfkörper des Formats 30 x 30 cm<sup>2</sup> hergestellt.
5. Abschließend wurde federführend durch den Lehrstuhl Sozial- und Gesundheitsbauten der TU Dresden im fünften Arbeitspaket ein Workshop konzipiert und durchgeführt., in dem interessierte Architekt\*innen gestalterische Kriterien für den Entwurf von Algenfassaden erarbeiteten und erste Entwürfe anfertigten. Weiterhin erfolgte eine Biodiversitätsanalyse, in die sowohl langjährig bewitterte als auch im Rahmen des Projekts exponierte Oberflächen eingebunden wurden.

Im Rahmen des Projektantrags wurden folgende Meilensteine definiert:

1. Etablierung eines flächigen Biofilms
2. Quantifizierung des Potenzials zur Luftreinigung unter definierten Klimarandbedingungen und Entwicklungsstadien des Biofilms
3. Aussage zur Reduktion des Heat-Island-Effekts
4. Bestimmung der Artenvielfalt im Vergleich zu Referenzflächen
5. Aussage zur Wirtschaftlichkeit der Systeme
6. Ästhetische Bewertung / Feedback aus Architektenschaft

Da es bis zum Projektende nicht gelungen ist, den flächigen Biofilm unter freier Bewitterung dauerhaft zu konservieren, sind die Versuchsergebnisse zur Quantifizierung der Schadstoffbindung nicht aussagekräftig. Die Bestimmung des Verdunstungspotenzials erfolgte für unterschiedliche Betonsubstrate ohne Berücksichtigung des Biofilms mit Hilfe von Laborversuchen und numerischer Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports.

## 5 Projektverlauf – Hauptteil, „Beweisführung“

### 5.1 Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Da an der BAM konnte erst nach Eingang des Zuwendungsbescheids mit der Akquise geeigneter Mitarbeiter\*innen für das interdisziplinäre Forschungsprojekt begonnen werden konnte, hat sich der Beginn der Arbeiten um einige Monate verschoben. In der Abteilung 4 (Material und Umwelt) konnte im Oktober 2021 eine Projektmitarbeiterin eingestellt werden, im Fachbereich Baustoffe erst im Februar 2022.

Da der Projektpartner Solaga für die Auswahl und großtechnische Anzucht der Algen zuständig war, konnte er unabhängig vom Start der Arbeiten an der BAM mit seinen Projektaufgaben beginnen. Die kontinuierliche inhaltliche Abstimmung mit der BAM wurde dabei durch die projektverantwortliche Mitarbeiterin in der Abteilung 4 sowie die Projektleitung sichergestellt.

Um die Arbeiten wieder zu synchronisieren, wurde am 03.06.22 ein Antrag auf kostenneutrale Verlängerung des Forschungsprojekts bis zum 31.01.2024 (ursprünglich 31.05.2023) gestellt, dem am 27.06.2022 stattgegeben wurde.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Auswahl und Anzucht der zu applizierenden Mikroorganismen

Für die Auswahl der Organismen auf den Betonoberflächen hatten die Verbundpartner unterschiedliche Kriterien. Während bei Solaga die biotechnologischen Gesichtspunkte im Vordergrund standen, war für die an der BAM durchgeführten wissenschaftlichen Experimente von besonderem Interesse, dass die verwendeten Organismen gut dokumentiert sind, es sich im Idealfall sogar um Modellorganismen handelt, deren Genetik und Physiologie im Detail bekannt sind und die bereits in bioinformatische Modelle integriert sind.

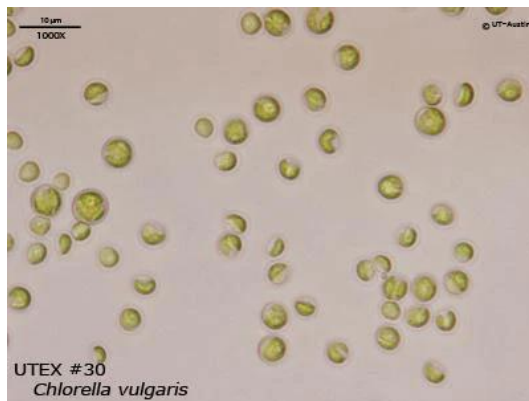
#### Auswahl Algen zur Skalierung der Produktion (Solaga)

Von Solaga wurde unter Berücksichtigung der für eine Skalierung relevanten biotechnologischen Parameter Wachstumsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert sowie Toxizität eine umfassende Literaturrecherche zu geeigneten Algen und deren Kultivierungsbedingungen durchgeführt und eine Liste geeigneter Algenstämme erstellt. Als erfolgversprechendste Stämme wurden identifiziert (Tabelle 2):

- *Klebsormidium flaccidum*
- *Chlorella vulgaris*
- *Neochloris vigensis*
- *Stichococcus bacillaris*

Die Algen wurden in verschiedenen Stammsammlungen bestellt und auf ihre Kultivierbarkeit in unterschiedlichen Nährmedien getestet. Im Laufe des Projektes wurde die Stammsammlung laufend aktualisiert. Insbesondere konzentrierten sich die Arbeiten auf die Anzucht einer größeren Menge von *Klebsormidium*. Da die Algenkulturen in den großen Reaktoren nicht steril gehalten werden können, weisen sie stets eine Kontamination durch verschiedene Bakterien auf. Die Versuche mit den großtechnisch produzierten Algen sind damit unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten nicht reproduzierbar. Für die Baupraxis, in der später ohnehin nicht steril gearbeitet werden kann, sind sie dennoch von Bedeutung.

Tabelle 2. Übersicht ausgewählter potenziell geeigneter Algen



### **Chlorella Vulgaris**

- Grünalge
- einzellig, biofilmbildend
- aerophytische Art (wächst beständig hoher Luftfeuchte ausgesetzt)
- nicht toxisch
- bildet keine Endosporen
- wächst unter Laborbedingungen bei 5-20°C

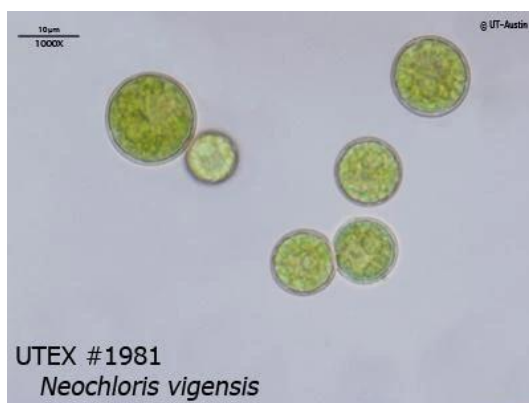
(Bild: UTEX Culture Collection of Algae)



### **Klebsormidium flaccidum**

- Grünalge
- fadenförmig, biofilmbildend
- aerophytisch (wächst beständig hoher Luftfeuchte ausgesetzt)
- nicht toxisch
- bildet keine Endosporen
- wächst unter Laborbedingungen bei 20°C

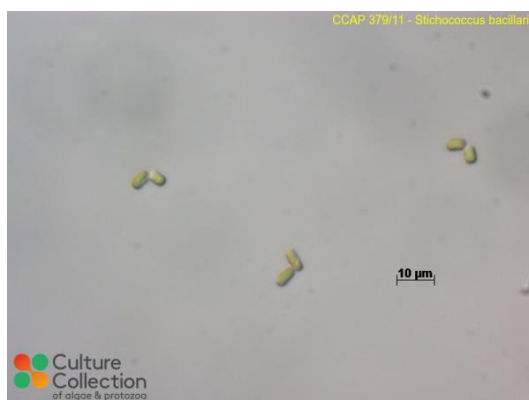
(Bild: Culture Collection of Algae and Protozoa - SAMS Limited)



### **Neochloris vigensis**

- Grünalge
- sphärisch, einzellig, biofilmbildend
- dicke Zellwand
- gute Anheftung an vertikalem Textil

(Bild: UTEX Culture Collection of Algae)



### **Stichococcus bacillaris**

- Grünalge
- wächst auf Boden, aber auch im Frisch- und Salzwasser
- Wachstum bei 23-25 °C
- einzellig und filamentös
- toxisch gegenüber individuellen Pflanzen

(Bild: Culture Collection of Algae and Protozoa - SAMS Limited)

Für die Versuche zur Applikation der Algen auf den Betonsubstraten wurden folgende Organismen ausgewählt und in ausreichender Menge produziert:

- Klebsormidium flaccidum
- Chlorella vulgaris und
- Neochloris vigensis

Es zeigte sich, dass insbesondere Klebsormidium flaccidum für eine industrielle Anwendung geeignet ist, da die Algen schnell genug wachsen und somit eine wirtschaftliche Produktion erlauben (Abbildung 5).

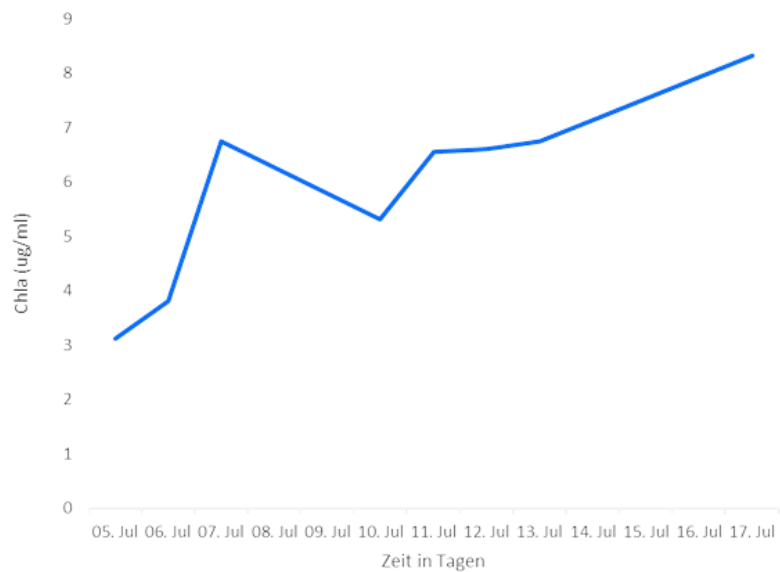


Abbildung 5. Skaliertes Medium des Algenstammes Klebsormidium flaccidum, links: Fotografie der Kultur, rechts: Wachstumsrate

### Auswahl Testorganismen (BAM)

Bei den natürlicherweise auf bewitterten Oberflächen aufwachsenden Biofilmen handelt es sich stets um eine Vergesellschaftung verschiedener Organismen, die in der Regel zum besseren Schutz vor Austrocknung in eine Schleimhülle extrazellulärer polymerer Substanzen (EPS) eingebettet sind. Eigene Forschung an der BAM mit einem Modellbiofilm hat gezeigt, dass sich das Wachstum von Pilzen und Algen gegenseitig begünstigen kann [49], [50]. Auch andere Forschungsgruppen arbeiten an einer Miniaturisierung der komplexen Feldbedingungen mit Hilfe von Testorganismen, um ein besseres Verständnis für die Etablierung von Biofilmen zu erlangen und die Biorezeptivität von unterschiedlichen Substraten zuverlässig testen zu können [46], [51]. Um langfristig zu gewährleisten, dass die auf die Oberflächen applizierten Mikroorganismen nicht nur oberflächlich anhaften, sondern sich fest mit dem Substrat verbinden und Biomasse aufbauen, wurden in einem ersten Schritt geeignete Mischungen von Algen und Pilzen identifiziert, die sich gegenseitig stabilisieren und ein Anwachsen auf den Oberflächen sicherstellen (Abbildung 6).

Grundidee der entwickelten Methodik zur Bestimmung der idealen Zusammensetzung eines Testbiofilms ist die Konzentration zweier Spezies systematisch zu variieren und ihr Wachstum unter

variablen Nährstoffangebot zu analysieren (Abbildung 7). Die Methodik wurde mit den Organismen *Jaagichlorella* und *Knufia Petricola* erprobt und soll später auch auf andere Kombinationen von Pilzen und Algen übertragbar sein. Die Alge *Jaagichlorella* wurde für den Versuch ausgewählt, da sie von Anna Gorbushina von einer Gebäudefassade in Berlin isoliert und anschließend in die Algensammlung von München überführt wurde. Im Vergleich mit anderen Algenarten weist sie ein schnelles Wachstum auf. Bei dem Pilzstamm *Knufia petricola* handelt es sich um einen sehr gut beschriebenen Referenzorganismus, der alle Merkmale schwarzer steinbewohnender Pilze aufweist [52]. Er ist auf kahlen Felsen, aber auch auf unterschiedlichsten Bauwerks Oberflächen und technischen Installationen in allen Klimazonen anzutreffen und kann sehr lange Zeiträume von Trockenheit überdauern [53].

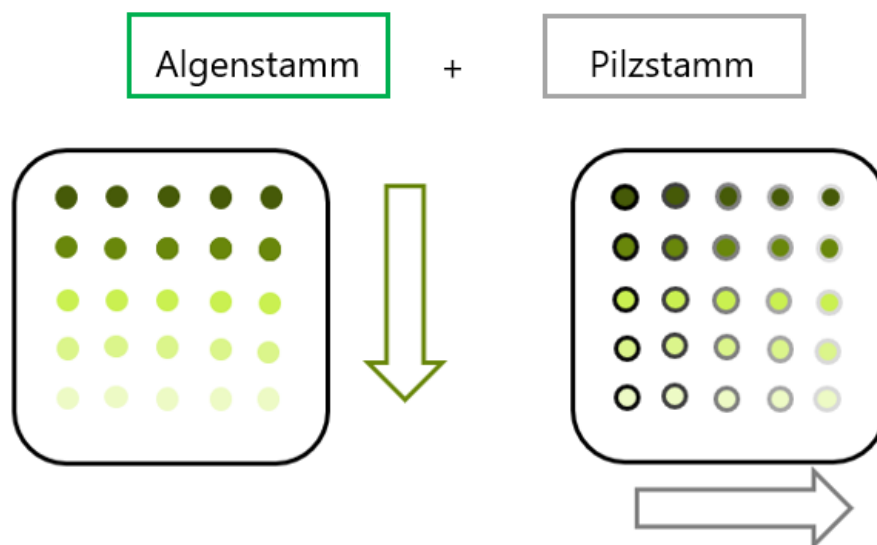


Abbildung 6. Versuchsschema zur Multispezies-Biofilmentwicklung

Die Biofilmentwicklung wurde auf Agarplatten aus verschiedenen Nährmedien betrachtet (Abbildung 8):

- Nährstoffarmer Wasser-Agar
- Bold's Basal Medium (Nährmedium optimiert für Algen)
- Malt Extract Agar (Nährmedium optimiert für Pilze)

Nach der Beimpfung der Nährstoffplatten wurden diese im Klimaschrank in Petrischalen bei einer Temperatur von 25° C und Tag- und Nachtzyklen von jeweils 12 h inkubiert und das Wachstum nach 3 Wochen sowie 1,5 Monaten visuell und mikroskopisch analysiert.

Die Auswertung der Versuchsreihe zeigt, dass das Wachstum und die Interaktion der Organismen stark vom Nährmedium sowie der Konzentration der Organismen abhängt. Auf dem für Pilze optimierten Nährmedium MEA wachsen sowohl *Jaagichlorella* als auch *K. petricola* dicht und homogen, aber sie zeigen keine offensichtlichen Interaktionen. Dies ist besonders offensichtlich für *K. petricola*, die auf dem optimierten Medium alle für ihr Wachstum notwendigen Nährstoffe erhält und kleine, kugelförmige Kolonien entwickelt, die typisch für das mikrokoloniale Wachstum von Pilzen sind. Eine Interaktion mit den Algenzellen ist dabei nicht zu beobachten. Durch höhere Konzentrationen von Algen scheint das Pilzwachstum jedoch gehemmt zu werden.

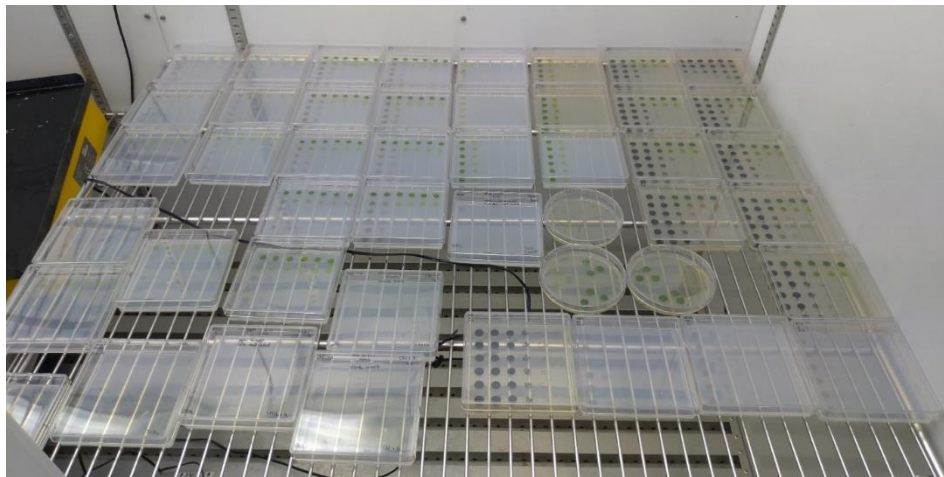


Bild: Benjamin Herzog

Abbildung 7. Biofilmentwicklung auf verschiedenen Nährmedien

Auf BBM entwickelte sich die Alge schneller und besser als auf dem eher einer Betonoberfläche nährstoffarmen Medium Agar/Wasser. Nach ausreichender Zeit ist aber auch auf dem nährstoffarmen Medium Wachstum nachweisbar. In Abwesenheit von organischen Nährstoffen entwickelt sich der Pilz mit einer fadenförmigen Wachstumsform, die enger und diffuser mit den Algenzellen interagiert, ohne das grüne Aussehen zu beeinträchtigen. (Abbildung 8).

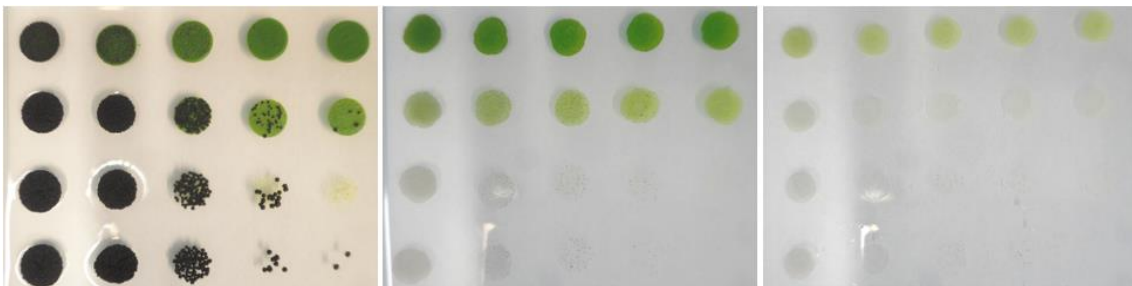


Abbildung 8. Biofilmentwicklung auf den Nährmedien MEA (Links), BBM (Mitte), und Wasser-Agar (rechts)



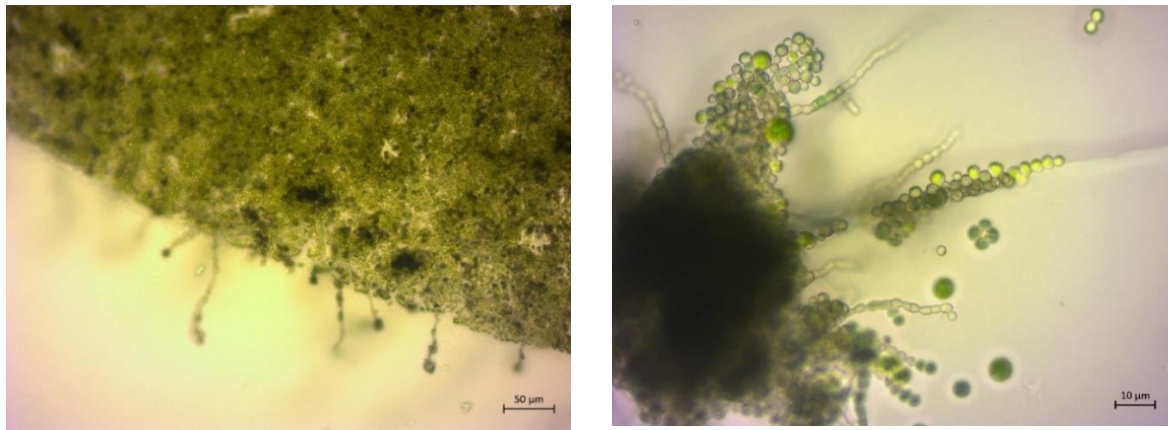


Abbildung 9. Mikroskopische Aufnahme der Modellbiofilme auf dem Wasser-Agar  
links: hohe Konzentration an Organismen, rechts niedrige Konzentration an Organismen

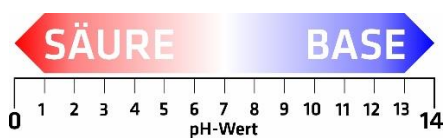
Die mikroskopische Analyse der Agarplatten zeigt eindeutig eine strukturierte Anordnung der Algen entlang der Pilzhyphe und bestätigt damit, dass die Organismen interagieren. Während die hohen Konzentrationen beider Organismen eine homogene Interaktion zeigen (Abbildung 9, links), ist es bei niedrigeren Konzentrationen möglich, die Details der Interaktionen genau zu untersuchen (Abbildung 9, rechts).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein nährstoffarmes Medium wie eine Betonoberfläche das fadenförmige Wachstum des Pilzes begünstigt und somit eine Interaktion des Pilzes mit der Alge fördert.

#### Einfluss von pH-Wert und Nährmedium auf das Wachstum von Jaagichlorella (BAM)

Da der pH-Wert des Substrats die Nährstoffverfügbarkeit sowie die Enzymaktivität und die Zusammensetzung der Metaboliten beeinflusst [54], stellt er einen wichtigen Wachstumsparameter sowohl für die Algen als auch für Pilze dar. Gleichzeitig beeinflussen auch die Mikroorganismen durch ihren Metabolismus den pH-Wert ihrer Umgebung. Um zu untersuchen wie sich der pH-Wert auf den Modellbiofilm aus der Alge Jaagichlorella und dem Pilz Knufia Petricola auswirkt bzw. durch die Organismen und Nährmedien moduliert wird, wurden erste Untersuchungen zum Wachstum von Jaagichlorella in Abhängigkeit vom pH-Wert der Umgebung (pH = 6/6.5/7/7.5/8 eingestellt durch entsprechende Pufferlösungen) und den folgenden Nährmedien durchgeführt:

- Bold Basal Medium (BBM)
- Malt extract broth (MEB)



Dabei wurden die Wachstumsraten sowohl in gepufferten Flüssigkulturen durch regelmäßige Zellzählungen als auch auf Agarplatten mit Hilfe von Farbmessungen ermittelt. Als Kontrollmedium diente Reinstwasser (mQ-water) mit verschiedenen pH-Werten. Zusätzlich wurde die Validität von Messungen der optischen Dichte bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 700$  als alternative, weniger zeitaufwendige Methode zur Zellzählung in flüssigem Medium evaluiert.

#### Einfluss des pH-Werts in der Flüssigkultur

Die Auswertung der Wachstumsraten in den flüssigen Medien zeigte im untersuchten Bereich keine signifikante Abhängigkeit vom pH-Wert. Trotz der fehlenden Signifikanz erreichten die alkalischen Kulturen in BBM eine höhere Zellkonzentration, so dass angenommen werden kann, dass ein leicht alkalisches Milieu das Wachstum begünstigt.

Für das Medium MEB wurde eine starke Veränderung des pH-Werts über die Versuchsdauer festgestellt, so dass hier keine Aussage zum Einfluß des pH-Werts auf das Algenwachstum getroffen werden kann. Die erreichte Algenkonzentrationen in MEB sind im Vergleich zu BBM jedoch etwa 10- bis 12-mal höher. Ursache für die hohe Wachstumsrate ist, dass die Algen von einem photoautotrophen auf einen heterotrophen/mixotrophen Stoffwechsel umschalten können. [55], der sehr viel effizienter ist als der rein autotrophe Stoffwechsel. Der Verbrauch der Glukose durch oxidative Assimilation durch die Algen führt zu einer Versauerung des Mediums durch die Produktion von  $\text{CO}_2$  im Rahmen der Atmung [56]. Da das  $\text{CO}_2$  von den Algen nicht mehr verbraucht wird, steigt die Menge im Medium an und führt zu einem Absinken des pH-Wertes. Interessanterweise konnte bei Reinstwasser, das als Kontrollkultur verwendet wurde, ein leichter Einfluß des pH-Werts festgestellt werden. Das schlechtere Wachstum bei alkalischen pH-Werten kann hier möglicherweise auf einen Verbrauch des Puffers als Nährstoff oder aber Stress zurückzuführen sein.

#### Einfluss des pH-Werts von festen Nährmedien

Auch bei der Beobachtung des Wachstums auf den festen Medien zeigten die Kulturen auf MEB im Vergleich zu BBM deutlich mehr Wachstum (Abbildung 10). Aufgrund der hohen Standardabweichungen konnte auf BBM kein signifikanter Unterschied des Wachstums in Abhängigkeit des pH-Werts festgestellt werden. Da die Standardabweichungen auf MEB deutlich geringer waren, wurde hier pH = 7,5 als bevorzugter pH-Wert identifiziert. Auf den Kontrollplatten (mQ-Wasser) konnte ebenfalls Wachstum festgestellt werden. Im Vergleich zu den Flüssigkeitsansätzen konnte hier jedoch kein Unterschied zwischen saurem/neutralem und alkalischem pH-Wert in den Trends beobachtet werden.

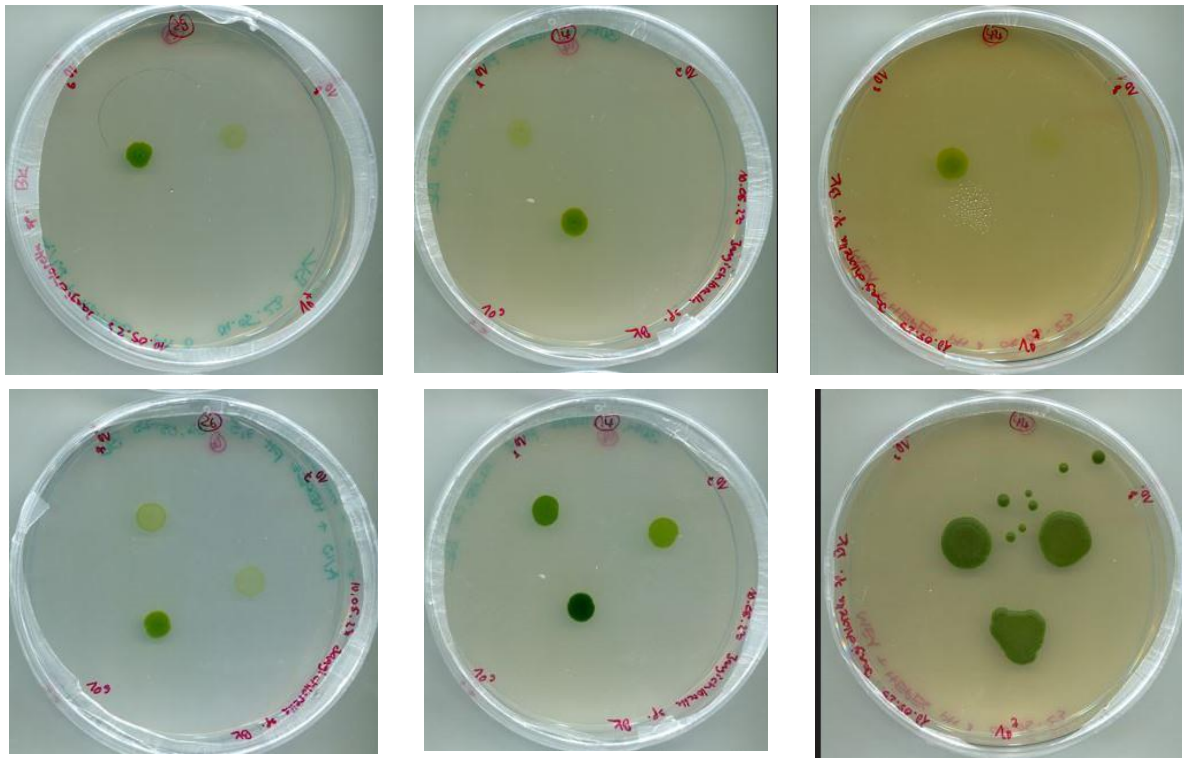


Abbildung 10. Wachstum von *Jaagichlorella* sp. (3 unterschiedliche Zeldichten) auf Agar-Water (links), BBM (Mitte und MEA (rechts) bei pH = 8, Vergleich Ausgangszustand (oben) und Zustand nach 24 Tagen (unten), Scans mit einer Auflösung von 2400 dpi. (A) 0 h, (B) 288 h, (C) 576 h

Die Versuchsergebnisse zur Kultivierung der Algen unter verschiedenen pH-Werte lassen folgende Rückschlüsse zu:

- *Jaagichlorella* wächst in Flüssigkultur und auf Agarplatten mit den Nährmedien BBM und MEA im untersuchten Bereich von pH = 6 bis pH = 8 bevorzugt unter leicht alkalischen Bedingungen.
- Selbst bei Kombination der Stressfaktoren: keine Nährstoffe und nicht idealer pH-Wert konnte auf Agarplatten Wachstum festgestellt werden.
- Für die Anzucht von Algen vor Applikation auf den Fassadenplatten kann mit einem nährstoffreichen Medium die Wachstumsrate deutlich erhöht werden. Es ist jedoch zu überprüfen, ob und unter welchen Bedingungen die Algen sich vor der Applikation auf die Betonsubstrate wieder an den autotrophen Stoffwechsel anpassen können.

Weiterhin konnte im Rahmen der Untersuchungen gezeigt werden, dass die Messung der optischen Dichte bei  $\lambda = 750 \text{ nm}$  zur Bestimmung der Zelldichte unter photoautotrophen Bedingungen wie BBM geeignet ist und die sehr aufwändigen Zellzählungen ersetzen kann. Für eine Quantifizierung von Algenkonzentration die wie in MEB mixotroph/heterotroph wachsen, ist die Korrelation dagegen zu ungenau.

Da die im Labor kultivierten Algen später auf die Betonsubstrate appliziert werden sollen, stellt sich die grundsätzliche Frage, ob eine Kultivierung bei optimalen Bedingungen bezüglich Nährstoffe, Temperatur und pH-Wert tatsächlich vorteilhaft ist. Eventuell muss vor der Applikation durch eine systematische Veränderung der Kultivierungsbedingungen eine Gewöhnung an die adversen

Bedingungen (nährstoffarme Umgebung mit hohem pH-Wert und starken Temperaturschwankungen) erfolgen, um ein schnelles Absterben nach dem Transfer der Algen aus dem Medium zu verhindern.

Unter dem Gesichtspunkt der Anwendung der Algen auf Beton ist weiterhin zu überprüfen, ob eine Kultivierung auf festen Substraten grundsätzlich besser geeignet ist als die Anzucht der Algen in Flüssigkultur. Erfolgsversprechend könnten hier Bioreaktoren sein, bei denen die Organismen auf porösen Substraten aufwachsen und nur von der Rückseite mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden und im Englischen als "Porous Substrate Bioreactors" bezeichnet werden (Padola et al., 2017).

An der BAM durchgeführte Versuche zur Kultivierung von Klebsormidium ergaben ein besseres Wachstum auf Nährböden im Vergleich zur Flüssigkultur.

## 6.2 Konzeption und Herstellung der Betonsubstrate (BAM, 7.1)

Eine ausführliche Literaturrecherche ([17]) ergab, dass folgende Baustoffparameter die Biorezeptivität beeinflussen:

- Oberflächenrauigkeit / Textur
- Wasserrückhaltevermögen an der Oberfläche / Benetzungseigenschaften
- Porosität
- pH-Wert
- Oberflächenchemie / Verfügbarkeit von Spurenelementen

Die Auswahl der Betonsubstrate erfolgte dreistufig. Zunächst wurde auf Proben aus dem Promotionsprojekt Funktionsbeton zurückgegriffen, für die ein hochfester, sehr gefügedichter Beton verwendet wurde. In Phase 1 wurden diese Substrate ergänzt durch Proben aus einem Standardmörtel bei dem nur die Porosität sowie die Textur systematisch verändert wurde. In Phase 2 wurden schließlich die wesentlichen Ergebnisse auf einen realen Beton übertragen, der zur Erhöhung der Nachhaltigkeit mit rezyklierter Gesteinskörnung und einem alternativen Bindemittel produziert wurde.



Abbildung 11. Schema zur Entwicklung der Betonsubstrate

### Stufe 1- Proben aus UHPC

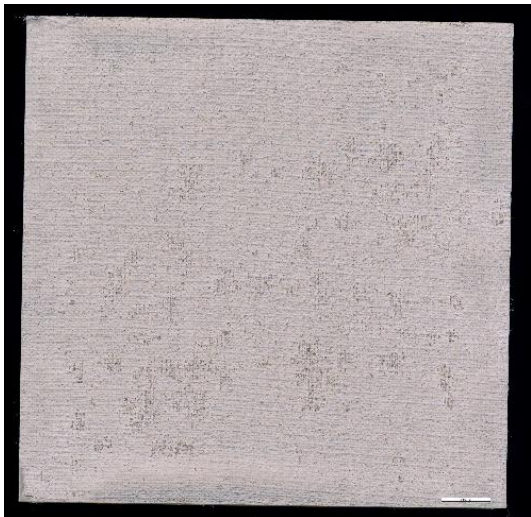
Um sofort Algen auf Betonsubstrate applizieren zu können, wurden aus dem parallel laufenden Forschungsprojekt Funktionsbeton Proben aus Ultrahochfestem Beton (UHPC) ausgewählt und in die Untersuchungen einbezogen (Abbildung 12). Die verwendete UHPC-Rezeptur basiert auf dem Produkt Nanodur® Compound 5941 auf Basis des Dyckerhoff Premium-Zements NANODUR® CEM II/B-S 52,5R mit Quarzmehl im Verhältnis 59: 41. UHPC zeichnet sich durch eine sehr gefügedichte Matrix und daraus resultierend hohe Festigkeit und Dauerhaftigkeit aus. Das Nanodur Compound wird mit Sand einer definierten Sieblinie und Fließmittel angemischt und ergibt eine sehr feinkörnige, fließfähige Masse. Der Wasser-Bindemittelwert der Rezeptur beträgt 0,17 und liegt damit deutlich unter den Werten der für das Forschungsprojekt in Stufe 2 neu hergestellten Substrate. Bei der Betonage können über Strukturmatrizen gezielt Texturen in den noch flüssigen Baustoff eingepreßt und so das Benetzungsverhalten gezielt beeinflusst werden. 24h nach der Betonage wurden die Prüfkörper ausgeschalt und sechs Tage in Wasser gelagert. Anschließend erfolgten 21 Tage Lagerung in einem Klimaraum bei 25 °C mit einer relativen Luftfeuchte von 50%. Laut Literatur sollten die eingepreßten Strukturen für eine optimale Anheftung etwas größer sein als die ansiedelnden Organismen (Ledwoch et al. 2015). Da in der Natur sowohl einzellige Algen als auch filamentöse Algen auf den Fassadenoberflächen anzutreffen sind (Tabelle 2) wurden zwei Substrate mit unterschiedlich großen Strukturen und Oberflächeneigenschaften für die Untersuchungen ausgewählt. Die Rauheit der Proben wurde mit einem optischen Sensorsystem der Firma Form + Test erfasst. Dazu wurden auf den 10 cm x 10 cm großen Proben je 5 Messungen horizontal und vertikal in regelmäßigen Abständen von 20 mm durchgeführt und aus den Daten der Mittenrauwert (Ra) ermittelt. Die Gesamttextur wurde weiterhin mit Licht- und Digitalmikroskopie und einem Flachbettscanner dokumentiert (Abbildung 12).



#### Struktur „Vinidur“

Für die gröbere Texturierung wurden Löcher der Tiefe 0,5 mm mit einem Versatz von 1,0 mm direkt in die verwendete Schalung aus Vinidur eingefräst. Trotz der Struktur ist die Oberfläche noch sehr glatt und hydrophob.

$$R_a = 65,92 \pm 25,6 \mu\text{m}$$



#### Struktur „Textile“

Zur Erzeugung der feintexturierten Oberfläche wurde direkt auf eine Gardine betoniert. Da sich die Gardine nach dem Aushärten nur mit Kraft von der Oberfläche ablösen ließ, wurde die Oberfläche zusätzlich aufgeraut und zieht Wasser

$$R_a = 62,36 \pm 7,0 \mu\text{m}$$

Abbildung 12. Texturierte Betonoberflächen aus UHPC aus dem Forschungsprojekt Funktionsbeton links Scans der originalen 10 x 10 cm Betonplatten, rechts Beschreibung der Textur

#### Stufe 2: Proben aus Standardmörtel mit CEM 1

Da den chemischen Eigenschaften in der Mehrheit der Veröffentlichungen eine untergeordnete Bedeutung zugewiesen wird, wurde im ersten Schritt eine Serie von Betonsubstraten aus Standardmörtel hergestellt, bei der die Oberflächenrauigkeit und Textur sowie die Porosität systematisch variiert wurde (Tabelle 3). Im Sinne einer bestmöglichen Reproduzierbarkeit wurde für die Rezeptur ein Portlandzement (CEM 1) und als Gesteinskörnung CEN Normsand nach EN 196-1 verwendet. Um zu verhindern, dass die Proben der Größe 30 x 30 cm<sup>2</sup> an der Oberfläche organische Bestandteile aus den Rückständen von Schalungsöl aufweisen wurden sie auf eine Teflonmatte betoniert. Im Sinne bestmöglicher Reproduzierbarkeit wurden sie nach dem Ausschalen für 28 Tage in kalkgesättigtem Wasser gelagert.

Der pH-Wert wurde nach Erhärtung der Proben über eine künstliche Karbonatisierung der Betone modifiziert.

Um unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten / Texturen miteinander vergleichen zu können, wurden schalungsglatte Oberflächen hergestellt und andere Prüfkörperserien sandgestrahlt (sandblasted) oder oberflächlich mit Säure behandelt (acid washed). Eine weitere Serie von Prüfkörpern (u-grooved) wurde nach der Erhärtung mit einer Fräse bearbeitet, wobei auf einem Drittel des Prüfkörpers Rillen von 0,5 mm Breite und 0,5 mm Tiefe und auf einem weiteren Drittel Rillen von 5 mm Breite und 5 mm Tiefe eingefräst wurden. Unterschiedliche Porositäten wurden durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Wasser-Bindemittel-Werten (0,5 und 0,6) eingestellt (Tabelle 3, Abbildung 13 & Abbildung 14). Da für die Hydratation von Zement nur 40 % seiner Masse chemisch und physikalisch gebunden werden, hinterlässt das darüber hinausgehende Wasser im Zementstein Kapillarporen.

Tabelle 3. Prüfkörpermatrix der Stufe 2: AbifFA Phase 1

Gruppe	Probenkürzel	Oberfläche	w/z-Wert	Probengröße [cm]
<b>SM 1</b>	S1-N	schalungsglatt	0,5	30x30x1
<b>SM 2</b>	S2-N	schalungsglatt	0,6	30x30x1
	S2-AW	säuregewaschen	0,6	30x30x1
	S2-SB	sandgestrahlt	0,6	30x30x1
	S2-UG	gefräst	0,6	30x30x1

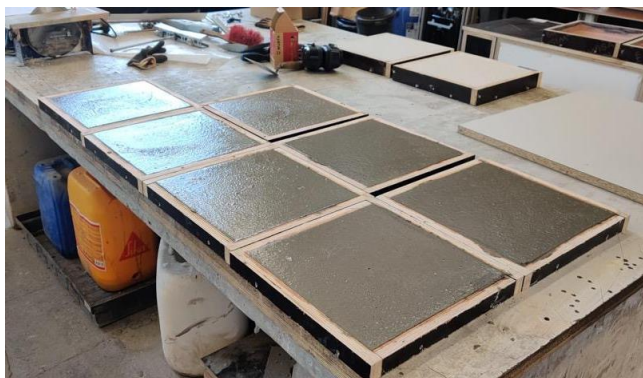


Abbildung 13. Probenherstellung Stufe 2: AbifFA; Links: mit dem Frischbeton befüllte Schalungen, rechts: nach 28-tägiger Lagerung in Kalkwasser ausgehärtete Prüfkörper

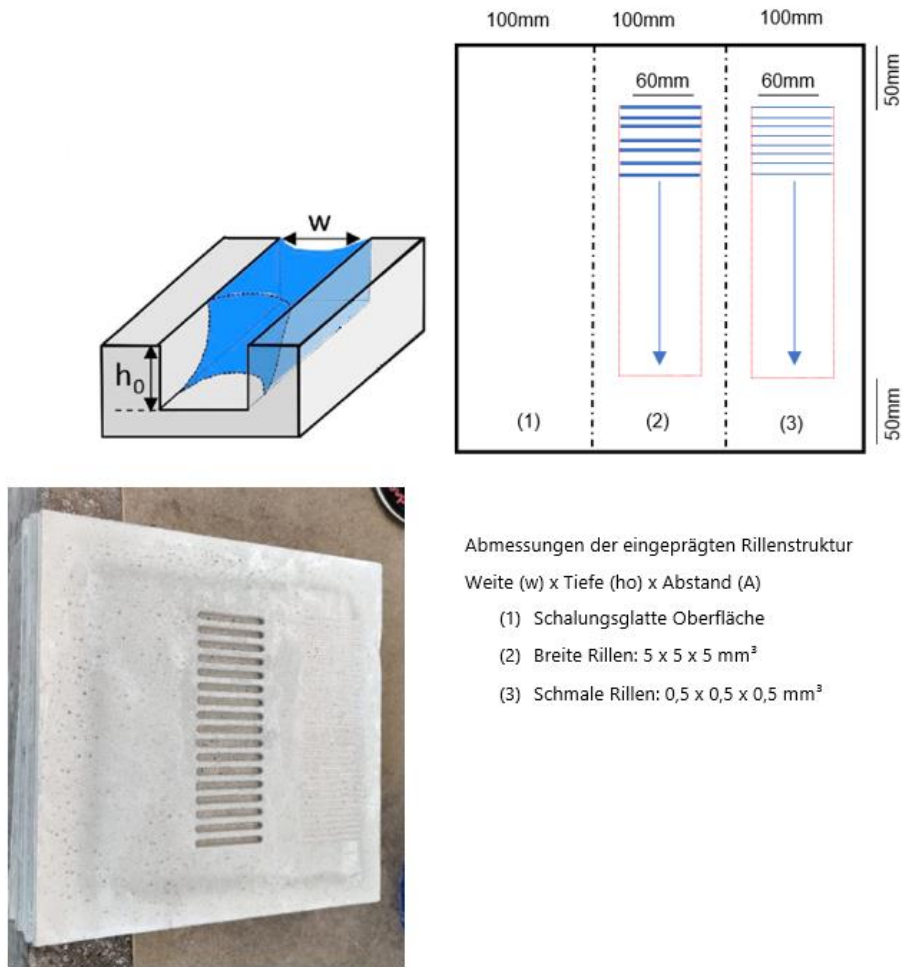


Abbildung 14. Prüfkörper S2-UG ( U-grooved) mit zwei verschiedenen Texturen unterschiedlicher Größenordnung, die durch Fräsen hergestellt wurden, oben: Skizze mit den geometrischen Angaben, unten: Fotografie

### Stufe 3 – Betonproben: Infraleichtbeton und "Altbeton"

Zielstellung war es einen biorezeptiven Beton zu konzipieren, der gleichzeitig ressourceneffizient ist und sich durch ein CO<sub>2</sub>-reduziertes Bindemittel auszeichnet. Hierfür wurde eine Rezeptur für einen Leichtbeton getestet, die im parallel laufendem Forschungsprojekt REALight – Leichtgranulate und REA-Gips aus Bauschutt und industriellen Nebenprodukten – erarbeitet wurde, in das die Firma BNB als Partner des Fachbereichs Baustofftechnologie und weiterer Forschungseinrichtungen involviert ist.

Die Rezeptur **Infraleichtbeton (ILB)** zeichnet sich durch Gesteinskörnung aus porösen Granulaten aus, die aus gesintertem Glasbruch (Liaver) bzw. in einem hydrothermalen Prozess aus Mauerwerkbruch hergestellt werden. Als Bindemittel wird statt Zement das kalkarme Celitement verwendet, bei dessen Produktion sowohl stofflich als auch prozessbedingt deutlich weniger CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. Der Wasser-Bindemittelwert für die Rezeptur betrug 0,46. Um den Einfluß des pH-Werts zu untersuchen, wurden auch Prüfkörper aus dieser Serie gezielt karbonatisiert.



Um einen Beton mit einer sehr hohen Wasseraufnahme in die Untersuchungen miteinbeziehen zu können, wurde die Matrix weiterhin durch einen **Grundkörperbeton der Altbetonklasse A2** nach dem Merkblatt "Spritzmörtel/Spritzbeton nach ZTV-W-LB 219, Abschnitt 5 (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für die Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219)" ergänzt.

Dieser Beton basiert auf Portlandzement und weist einen sehr hohen Wasser-Bindemittelwert von 0,89 auf.

#### Künstliche Karbonatisierung

Sowohl Proben aus dem Standardmörtel aus Stufe 2 als auch Proben des Infralichtbetons wurden einer künstlichen Karbonatisierung unterzogen.

Die Karbonatisierung wurde nach der Norm DIN EN 13295:2004 (beschleunigte Karbonatisierung bei 1% CO<sub>2</sub>) und DIN 12390-10:2019-08 (natürliche Karbonatisierung bei atmosphärischem CO<sub>2</sub>-Niveau) durchgeführt. Die Mörtelproben wurden als einzelne Platten direkt in die Karbonatisierungskammer überführt. Im Fall des Leichtbetons wurden die Proben als größere Blöcke (rechteckiger Quader) geliefert und karbonatisiert und anschließend in Scheiben geschnitten. Aus den Platten bzw. Scheiben wurden schließlich Proben mit einem Durchmesser von 3 cm herausgebohrt (Abbildung 15). Ein Teil dieser Proben wurde für die Messung des pH-Werts verwendet. Ein anderer Teil für die Wachstumsexperimente im Klimaschrank.

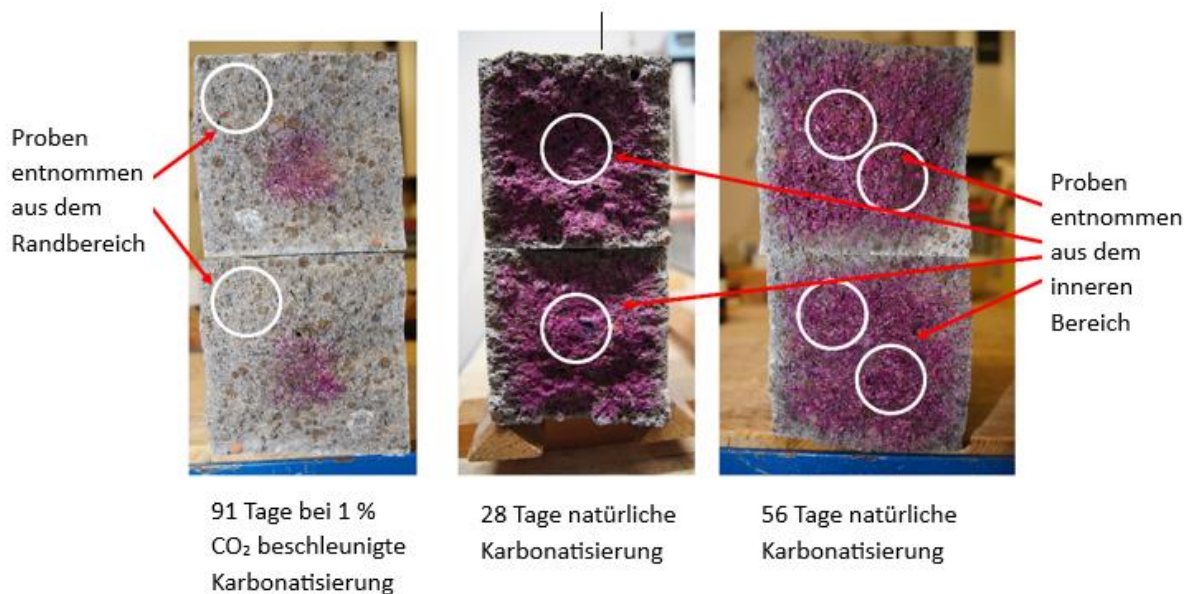


Abbildung 15. Fotografien der beschleunigt karbonatisierten Proben (Bild links) im Vergleich zu den natürlich karbonatisierten Proben (Bild Mitte und rechts) nach dem Besprühen mit 1 %iger Phenolphthaleinlösung. Die lila gefärbten Bereiche kennzeichnen einen pH > 9.

Insgesamt werden somit aktuell 5 verschiedene Mörtel / Betone untersucht, die sich in ihren Rezepturen bezüglich der Parameter

- Wasser-Bindemittelwert
- Art des Bindemittels
- Art der Gesteinskörnung und
- Oberflächentextur
- Karbonatisierung

signifikant unterscheiden (Tabelle 4)

Ausschließlich als Referenz für den Frost-Tausalz-Widerstand wurde noch ein weiterer Beton der Firma BNB in die Untersuchungen einbezogen.

Tabelle 4. Prüfkörpermatrix für alle 3 Stufen (weiß hinterlegt: Stufe 1 / Projekt Funktionsbeton, gelb hinterlegt: Stufe 2 / AbifFa Phase 1, grün hinterlegt Stufe 3 / AbifFa Phase 2)

Name	w/b	Bindemittel /-gehalt	Gesteinskörnung / Größtkorn	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Textur	Karbonatisierung
<b>UHPC</b>	0,17	Nanodur 430,5 kg/m <sup>2</sup> (BM-Gehalt Nandor 41%)	Rheinsand nachgestellt GK = 2 mm	137.9 ± 4.3	Vinidur Textil	
<b>SM 1</b>	0,5	CEM I ca. 340 kg/m <sup>3</sup>	Normsand GK = 2 mm		schalungs- glatt	ohne
<b>SM 2</b>	0,6				schalungs- glatt	
					säure- gewaschen	
					sand- gestrahlt	
					gefräst	
<b>ILB</b>	0,46	Celitement 360 kg/m <sup>3</sup>	Granulate aus Altglas und Mauerwerksbruch GK = 8 mm	Ziel: 7/8 erreicht 6-9	schalungs- glatt	ohne mit
<b>Altbeton</b>	0,89	CEM I 180 kg/m <sup>3</sup>	Korngemisch aus Sand und Kies GK = 16 mm	15±3	schalungs- glatt	ohne
<b>Referenz für F/T- Widerstand</b>	0,47	CEM II-B-M(S- LL) 42,5 400 kg/m <sup>3</sup>	Sand, RC-Kies, Kies GK = 16 mm	35/45	schalungs- glatt	ohne

## Charakterisierung der Betonsubstrate (BAM, 7.1)

Um mögliche Zusammenhänge zwischen den Substrateigenschaften und der Biorezeptivität bzw. der Verdunstungsleistung aufzeigen zu können, wurden folgende Kenngrößen bestimmt:

- Entwicklung des pH-Werts an der Oberfläche
- Porengrößenverteilung bestimmt durch Hg- porosimetrie
- Wasseraufnahmekoeffizient in Anlehnung an DIN EN 1062-3
- Wasserrückhaltevermögen nach kapillarer Sättigung

Während die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten in Anlehnung an die DIN EN 1062-3 erfolgte, wurden für die Messung des pH-Werts an der Oberfläche sowie die Quantifizierung der Abkühlung durch Verdunstung nach Wassersättigung neue Versuchsaufbauten konzipiert. Das Wasserrückhaltevermögen nach kapillarer Sättigung wurde im Rahmen der Versuche zur Quantifizierung der Verdunstungskühle wassergesättigter Substrate (Siehe dazu Kapitel 6) bestimmt.

### Messung des pH-Werts an der Oberfläche

Für die Bewertung der Biorezeptivität spielt der pH-Wert des Substrats eine entscheidende Rolle, da er ein entscheidender Faktor für die Verteilung der Algenvorkommen sowohl in aquatischen als auch in terrestrischen Umgebungen ist. Die verschiedenen Algenspezies sind durch individuelle Toleranzbereiche gekennzeichnet. Wird ein kritischer Wert langfristig überschritten, sind sie nicht mehr in der Lage ist,  $\text{CO}_2$  für ihr Wachstum zu akkumulieren und werden irreversibel geschädigt wird. Nach Tran (2012) wird davon ausgegangen, dass pH-Werte oberhalb 10 für die meisten Organismen zu alkalisch sind, und ein niedriger pH-Wert besser für Wachstum ist.

Beton ist ein alkalischer Baustoff, der anfänglich pH-Werte von über 12 manchmal sogar 13 aufweist. Mit der Zeit carbonatisiert der Baustoff. Die Mineralphasen Portlandit und Calciumsilikathydrat (C-S-H) reagieren mit dem Kohlendioxid in der Atmosphäre und bilden Kalziumkarbonat. Die Aufnahmefähigkeit des Betons für  $\text{CO}_2$  und damit der Fortschritt der Karbonatisierung hängt stark von seinem Feuchtegehalt ab. Wassergesättigte Körper nehmen praktisch kein Kohlendioxid auf. Aber auch ein vollständig trockener Betonkörper carbonatisiert nicht. Ideal für einen schnellen Karbonatisierungsfortschritt sind hohe Luftfeuchten.

Die Karbonatisierungstiefe wird insbesondere von der Porosität und Durchlässigkeit des Zementsteins bestimmt. Die Alkalitätsreserve bezeichnet die Fähigkeit eines Betons, das durch Karbonatisierung aufgebrauchte Calciumhydroxid im Porenwasser des Zementsteins zu ersetzen.

Im Rahmen des Stahlbetonbaus ist der pH-Wert vorwiegend für den Schutz der Bewehrung relevant. Nur wenn die Alkalität des Betons im Bereich der Bewehrung langfristig gesichert ist, kann der Stahl vor Korrosion geschützt werden. Es gibt deshalb verschiedene Ansätze die Karbonatisierungstiefe in Beton zu messen, aber keine Methode, um die Entwicklung des pH-Wert an der Oberfläche von Betonbauwerken zu erfassen. Betonsubstrate sind porös und je nach vorliegenden klimatischen Randbedingungen wird Porenwasser entweder kapillar von der Oberfläche in den Baustoff hinein, oder aber umgekehrt vom Baustoffinneren zur Oberfläche transportiert. Neben der Auslaugung von alkalischer Porenlösung werden Aerosolpartikel auf den Oberflächen abgelagert und können den pH-Wert durch die Bildung von Separierungsschichten modifizieren. Um repräsentative Daten zu gewinnen, muss deshalb der Verlauf des pH-Werts über die Zeit untersucht werden.

Um die Substrate in ihrem Ausgangszustand vergleichend bewerten zu können, wurde folgende Methodik konzipiert. Aus den Betonproben werden Bohrkern mit einem Durchmesser von 3 cm gebohrt und in den Boden von Kunststoffflaschen eingebaut (Abbildung 16). Anschließend wird eine Menge von 10 g deionisiertes Wasser auf die Probe gefüllt und der pH-Wert in regelmäßigen Abständen mit einer

Elektrode (Mettler Toledo inlab micro) gemessen und aufgezeichnet. Vergleichend wurde die pH-Wertentwicklung von aufgemahlene Proben, gemessen, die mit 10 g Wasser überdeckt wurden.

Die Ergebnisse für den Infrareichtbeton (ILB) zeigen, dass der pH-Wert nach Wasserkontakt innerhalb der ersten halben Stunde stark ansteigt und anschließend kleineren Schwankungen nach oben und unten aufweist. Während der pH-Wert der (künstlich) carbonatisierten Probe maximal einen Wert von 9 für die massive Probe und 9,5 für die aufgemahlene Probe erreicht, liegt dieser für die nicht künstlich carbonatisierten massiven Proben bei 10,5 und für die aufgemahlene Proben aufgrund der höheren Oberfläche bei 11,5 (Abbildung 17).

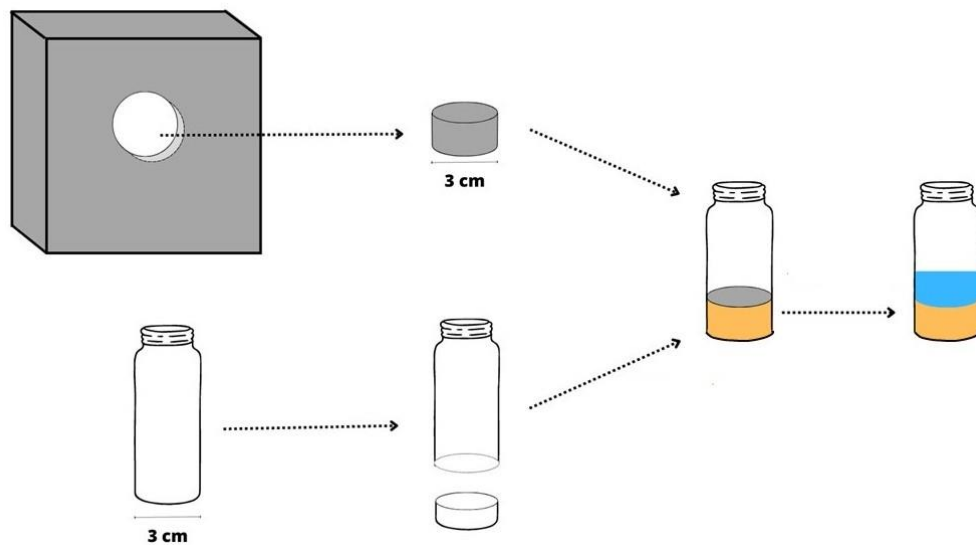


Abbildung 16. Probenpräparation für die pH-Wert-Messung

Tabelle 5 zeigt die pH-Werte der unterschiedlichen Substrate nach 2 Stunden Wasserkontakt. Da der ultrahochfeste Beton (UHPC) ein sehr dichtes Gefüge aufweist, ist eine künstliche Karbonatisierung in diesem Fall zu langwierig und aufwändig.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass der auf dem ILB gemessene pH-Wert von 10,2 fast an den auf der UHPC-Oberfläche "Vinidur" gemessenen Maximalwert von 10,4 heranreicht. Dies ist auf die große Porosität und die damit verbundene stärkere Auslaugung der Alkalien aus der Betonmatrix zurückzuführen.

Tabelle 5. Auf den Betonsubstraten gemessene pH-Werte nach 2 Stunden Wasserkontakt

Betonsubstrat	pH-Wert gemessen an der Oberfläche nach 2 h Wasserkontakt	
	Lagerung im Innenklima	nach künstlicher Karbonatisierung
SM 2	9,3	8,3
ILB	10,2	9,0
UHPC_Vinidur	10,4	
UHPC_Textil	9,5	

Die Unterschiede zwischen den vor der Messung circa 1 Jahr im Innenraum gelagerten, verschieden strukturierten UHPC-Oberflächen "Vinidur" und "Textil" verdeutlichen, dass bei der Textilloberfläche durch die oberflächliche Porosität eine größere Oberfläche für die Karbonatisierungsreaktion zur Verfügung steht, die in diesem Fall die mit der größeren Oberfläche und Porosität ebenfalls verbundene erhöhte Auslaugung dominiert. Da die Rauheit der Oberflächen Textil und Vinidur in einem ähnlichen Bereich liegt (Siehe Abbildung 12), ist für den geringeren pH-Wert der Textilloberfläche die Porosität verantwortlich, die durch die oberflächliche Beschädigung der Probe beim Abziehen des Textils entstanden ist.

Der geringste pH-Wert nach 2 Stunden Wasserkontakt von 9,3 wird ohne künstliche Karbonatisierung auf der Oberfläche des Standardmörtels S2 mit einem w/c-Wert von 0,6 gemessen. Durch eine künstliche Karbonatisierung kann der pH-Wert des Standardmörtels um 1 Zähler auf 8,3 und im Fall des ILB um 1,2 Zähler auf einen Wert von 9,0 abgesenkt werden

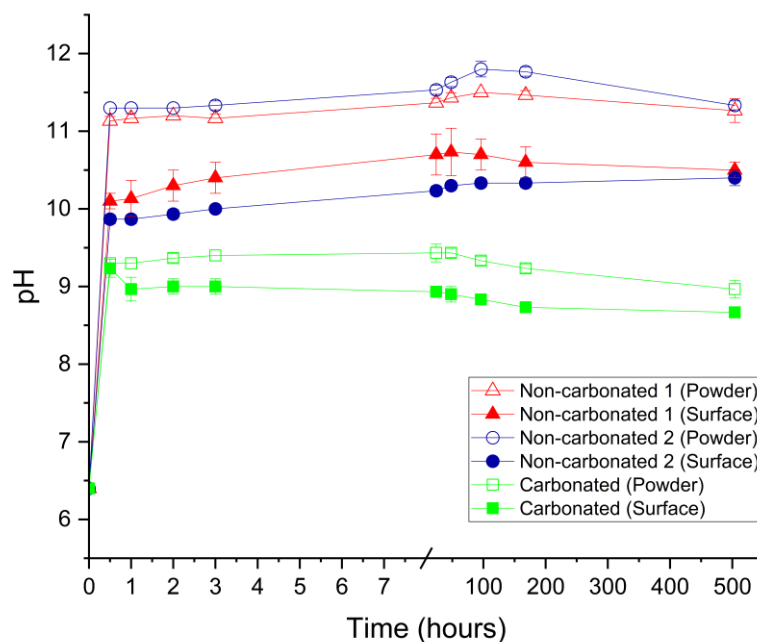


Abbildung 17. Entwicklung des pH-Werts von ILB, Vergleich der Proben 1 (natürliche Karbonatisierung 28 Tage) und 2 (natürliche Karbonatisierung 56 Tage) mit Probe 3 (beschleunigte Karbonatisierung für 91 Tage) jeweils als festes Substrat und im aufgemahlene Zustand

### Porengrößenverteilung bestimmt durch Quecksilberdruckporosimetrie

Die Porosität der Substrate wurde mittels Quecksilberdruckporosimetrie charakterisiert. Dazu wird die nicht benetzende Flüssigkeit Quecksilber (Hg) mit zunehmendem Druck in die Poren einer Materialprobe gepresst und über die Korrelation des Drucks mit der Porengröße die Porenradienverteilung ermittelt. Über die Gesamtmenge an Quecksilber, die von der Probe aufgenommen wird, ergibt sich die Gesamtporosität.

Die Messergebnisse beziehen sich jeweils auf den Mittelwert von 3 Parallelproben und zeigen, dass die Gesamtporosität des Infraleichtbetons (ILB) im nicht carbonatisierten Zustand (0,63 ml/g) fast um den Faktor 10 größer ist als die Porosität der anderen Betone. Ursächlich hierfür sind neben den Poren in der Bindemittelmatrix die Poren in den rezyklierten leichten Gesteinskörnungen aus Altglas und Mauerwerksbruch. Während der sehr gefügedichte UHPC die geringste Gesamtporosität von 0,03 mL/g aufweist, wurde für die beiden Standardmörtel trotz unterschiedlicher Wasser-Bindemittelwerte von 0,5 (S1) bzw. 0,6 (S2) jeweils eine Porosität von 0,07 mL/g gemessen. Auch der Altbeton, der durch einen Wasser-Bindemittelwert von 0,89 charakterisiert ist, weist mit 0,08 mL/g nur eine etwas höhere Porosität als die Standardmörtel auf. Durch die künstliche Karbonatisierung der Proben reduziert sich sowohl für den Standardmörtel S2 als auch für den ILB die Porosität. Ursächlich hierfür ist die durch die Ausfällung von Calciumkarbonat bedingte Gefügeverdichtung (Abbildung 18).

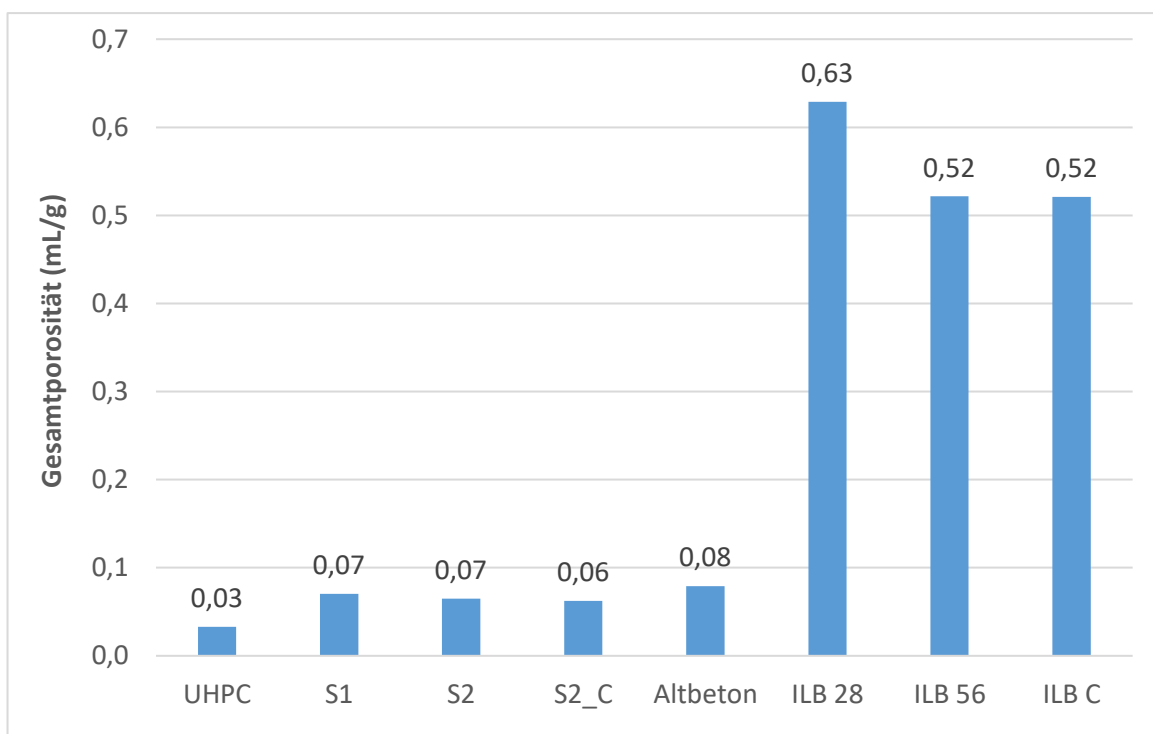


Abbildung 18. Gesamtporosität der untersuchten Betonsubstrate

Folgt man der Definition, dass sich der Bereich der Kapillarporen auf den Porenraum von 10 nm bis 10 µm erstreckt, weist nur das Substrat aus dem Standardmörtel S2 einen vergleichsweise hohen Anteil von Gelporen < 10 nm von 15,9 % bzw. 22,2 % (im carbonatisierten Zustand) im Vergleich zu den anderen Substraten auf, bei denen ein Gelporenanteil von 6,1 (ILB:C) bis 8,7 (ILB 56) gemessen wurde. Der Anteil von Poren größer 1 µm liegt für alle Substrate zwischen 4,1 % (S1) und 7 % Altbeton. Während die Substrate "Altbeton" und "Infraleichtbeton" einen größeren Anteil von größeren Kapillarporen im Bereich von 200 nm bis 10 µm aufweisen, sind die Mörtel durch einen vergleichsweise hohen Anteil an Poren im Bereich von 50 bis 200 nm charakterisiert, der UHPC dagegen durch einen Anteil von über 50 %-an Poren im Bereich von 20-50 nm (Abbildung 19).

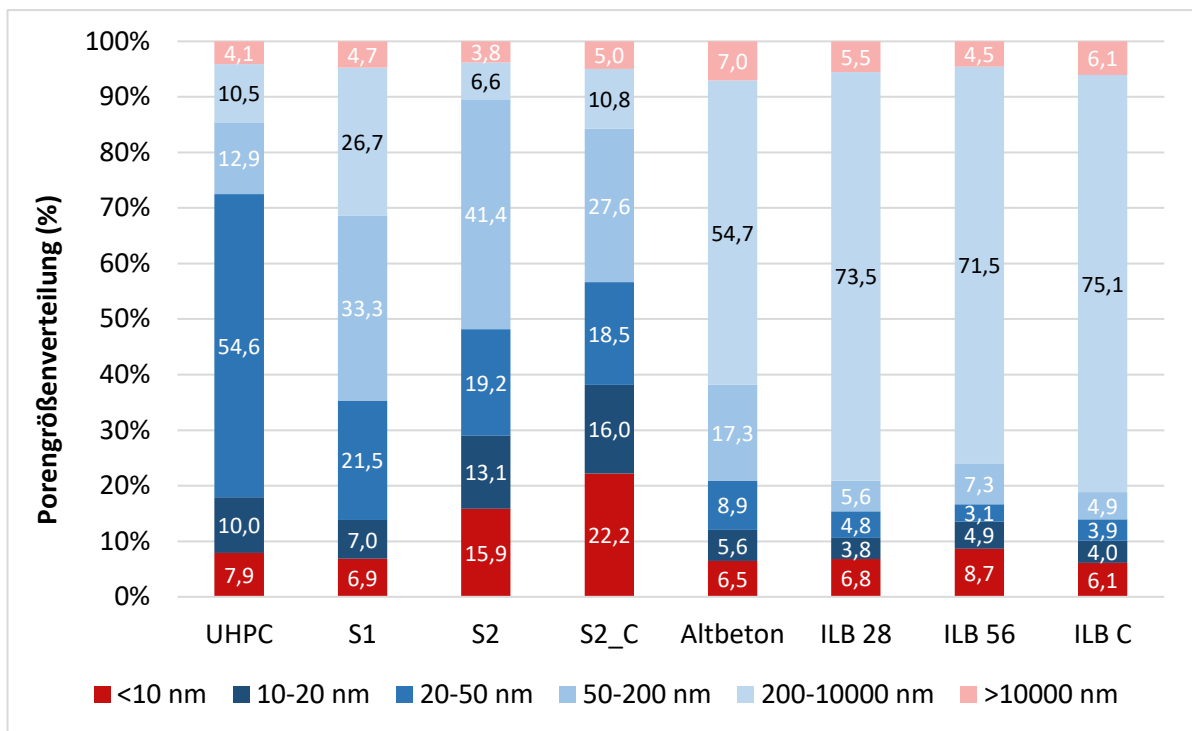


Abbildung 19. Aufteilung der Poren in unterschiedliche Porenklassen

Multipliziert man den Anteil von Kapillarporen mit der Gesamtporosität ergibt sich für die unterschiedlichen Substrate folgender Anteil an Kapillarporen (Tabelle 6):

Tabelle 6. Anteil der Kapillarporen in % sowie in mL/g

Substrat	Anteil Kapillarporen [%]	Gesamtporosität [mL/g]	Kapillarporosität [ml/g]
UHPC	88	0,03	0,0264
S1	88,4	0,07	0,0616
S2	80,3	0,07	0,0616
S2_C	72,8	0,06	0,0528
Altbeton	86,5	0,08	0,0704
ILB 28	87,7	0,63	0,5544
ILB 56	86,8	0,52	0,4576
ILB C	87,8	0,52	0,4576

Vergleicht man die Kapillarporosität umgerechnet in mL/g zeigen sich wiederum die wesentlichen Unterschiede zwischen dem gefügedichteten UHPC (0,0264 mL/g), den Standardmörtel sowie dem

Altbeton (0,0616-bis 0,0704 mL/g) und dem Infraleichtbeton (0,5544 mL/g], der sich durch einen mittleren Wasser-Bindemittelwert aber poröse Gesteinskörnung auszeichnet. Die carbonatisierten Proben S2\_C und ILB\_C, zeigen eine reduzierte Porosität in Folge der mit der Calciumcarbonatausfällung verbundenen Verdichtung der Porenstruktur.

#### Bestimmung der Wasseraufnahme durch kapillares Saugen

Das Wasseraufnahmevermögen der Oberflächen wurde in Anlehnung an den gravimetrischen Ansatz der DIN EN 13057 grob ermittelt. Die aktuellen betontechnologischen Normen sind, wie auch die pH-Messungen, nicht für den Kontext der Biorezeptivität ausgelegt und müssen angepasst werden. Die Proben wurden zunächst bis zur Massenkonstanz getrocknet, dann wurden die Rück- und Seitenflächen der Proben abgedichtet, so dass Wasser nur über die teilweise strukturierten Oberflächen der Proben aufgenommen werden konnte (Abbildung 20).

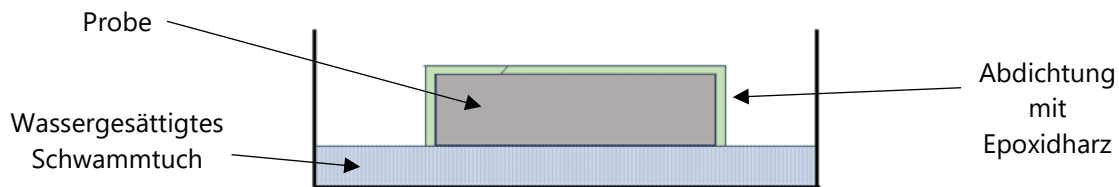


Abbildung 20. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Wasseraufnahme

Nach Bestimmung der Ausgangsmasse wurden die Proben mit der Vorderseite nach unten auf ein wassergesättigtes Schwammtuch gelegt und in definierten Zeitabständen gewogen. Die Lagerung auf dem gesättigten Schwammtuch statt im Wasserbad soll dabei eine kurzzeitige Wasseransammlung in Folge eines kurzen Regen- oder Kondensationsereignis simulieren. Um die Substrate vergleichen zu können, wurde die flächenbezogene Wasseraufnahme in  $\text{kg}/\text{m}^2$  über die Wurzel der Zeit aufgetragen (Abbildung 21). Die Sorptionskoeffizienten ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{h}^{0,5})$ ) wurden für die Steigung der Linie nach 5, 10 und 30 Minuten berechnet und in Abbildung 22 gegenübergestellt.



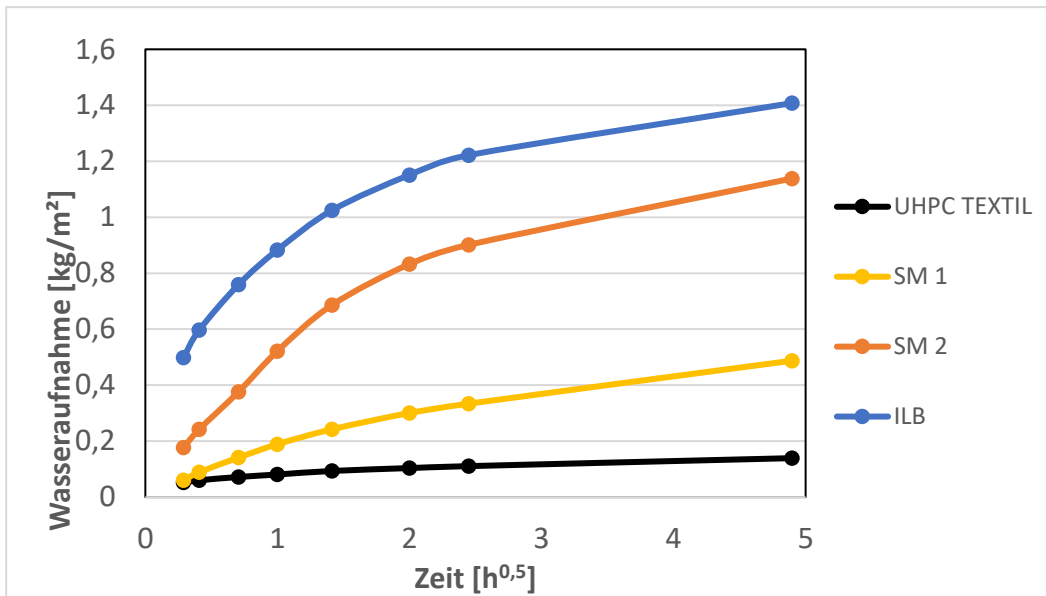


Abbildung 21. Wasseraufnahme aufgetragen über die Wurzel der Zeit

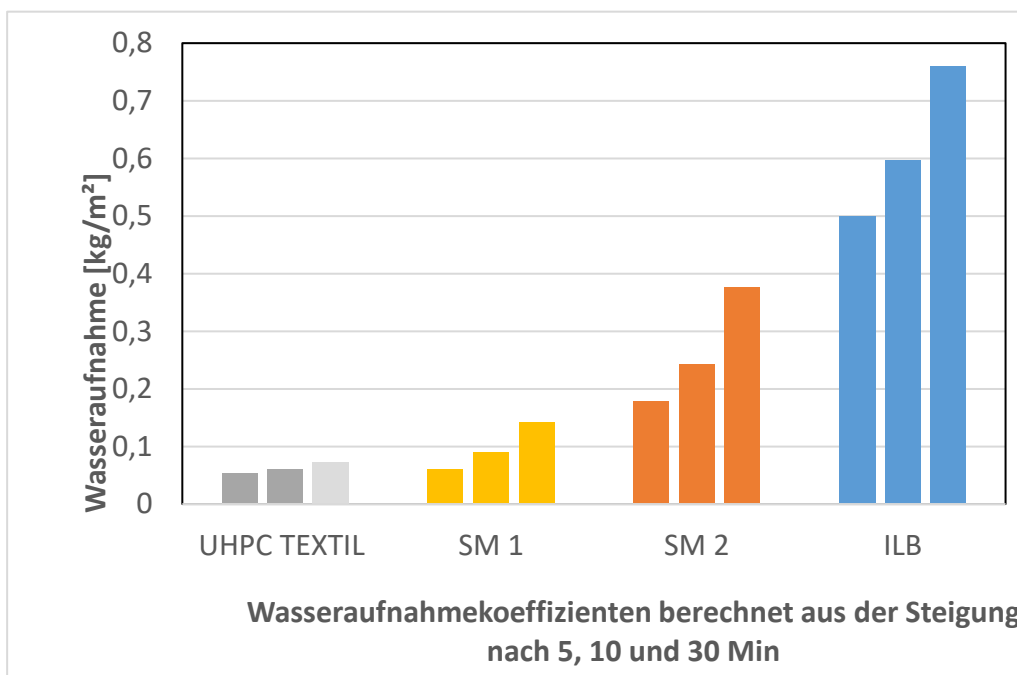


Abbildung 22. Sorptionskoeffizienten bestimmt für den linearen Anstieg der flächenbezogenen Wasseraufnahme nach 5, 10 und 30 Minuten

Die Ergebnisse verdeutlichen die geringe Wasseraufnahme des Substrats aus dem gefügedichten UHPC gegenüber dem Infralichtbeton ILB. Der höhere Wasser-Zementwert des Standardmörtels SM 2 von 0,6 im Vergleich zum Standardmörtel SM 1 mit 0,5 spiegelt sich in einer größeren Saugfähigkeit des Substrats wider. Die Unterschiede in den Wasseraufnahmekoeffizienten sind nicht so deutlich wie der

Kontrast in der Kapillarporosität (Tabelle X) hätte vermuten lassen und weisen darauf hin, dass für die Saugfähigkeit die Poren im Bereich von 50-200 nm (Abbildung Y) eventuell eine übergeordnete Rolle spielen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass nur auf der karbonatisierten Probe SM2 nach 2-stündiger Befeuchtung ein pH-Wert von  $\leq 9$  gemessen wird, der nach Untersuchungen von Cheah und Chan [57] für das Wachstum und die Gesundheit von Organismen optimal ist.

Bezüglich der Saugfähigkeit der Oberflächen und damit der Wasserverfügbarkeit in Oberflächennähe zeigen die Substrate deutliche Unterschiede. Inwieweit dieser Parameter jedoch die Biorezeptivität beeinflusst, oder aber von Effekten der Oberflächenstruktur überlagert wird, kann nur in Versuchen geklärt werden, in denen die Befeuchtung der Proben realitätsnah abgebildet wird. Auch der Zusammenhang zwischen der Saugfähigkeit und der Porenradienverteilung der Substrate sollte durch die Analyse zusätzlicher Substrate weiter aufgeklärt werden.

### Frost-Tausalzbeständigkeit

Für den Infraleichtbeton mit einer Rohdichte von ca.  $1000 \text{ kg/m}^3$  wurde weiterhin die Frost-Tausalzbeständigkeit (CDF-Verfahren) in Anlehnung an das Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Frostprüfung von Beton (MFB), Ausgabe 2012 bestimmt. Als Referenz diente eine Standard-Betonmischung des Projektpartners BNB mit einer mehr als doppelt so hohen Rohdichte von  $2300 \text{ kg/m}^3$ .

Der Frost-Tausalzwiderstand ist nur für Fassadenbauteile, die sich im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen befinden, relevant. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen sind in DIN EN 206-1/DIN 1045-2 die Einwirkungen der Umgebungsbedingungen in Expositionsklassen für Bewehrungs- und/oder Betonkorrosion unterteilt aus denen sich wiederum deskriptive Anforderungen an die Betonrezeptur (Bindemittelgehalt, maximaler Wasser-Bindemittelwert, Mindestdruckfestigkeitsklasse, Notwendigkeit der Zugabe von Luftporenbildnern) ableiten.

Eine mäßige Wassersättigung mit Taumitteln, die als "worst case" für Fassadenbauteile im Spitzwasserbereich von gesalzene Straßen anzunehmen ist, entspricht hier Expositionsklasse XF2 nach DIN 1045-2. Die entsprechenden deskriptiven Forderungen werden vom Infraleichtbeton der eine Festigkeitsklasse 7/8erreichen sollte bei weitem nicht eingehalten (Tabelle 7).

Tabelle 7. Anforderungen an Betone, die durch Frostangriff mit oder ohne Taumittel belastet werden (Expositionsklasse XF)

<b>Expositions-klasse</b>	<b>Angriffsart Umgebungs- bedingungen</b>	<b>Beispiele für die Zuordnung</b>	<b>Mindest- druck- festig- keits- klasse</b>	<b>Mindest- zement- gehalt [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Max. Wasser/ Zement- Wert</b>
XF1	mäßige Wasser- sättigung  ohne Taumittel	Außenbauteile	C25/30	280	0,6
XF2	mäßige Wasser- sättigung  mit Taumittel	Bauteile im Sprühnebel oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrs- flächen soweit nicht XF4, Bauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser	C35/45	320	0,5
			C25/30 (LP)	300	0,55
XF3	hohe Wasser- sättigung  ohne Taumittel	Offene Wasserbehälter, Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser	C 35/45	320	0,5
			C 25/30 (LP)	300	0,55
XF4	hohe Wasser- sättigung  mit Taumittel	Verkehrsflächen, die mit Taumittel behandelt werden; überwiegend horizontale Bauteile im Spritz- wasserbereich von taumittel- behandelten Verkehrsflächen, Räumerlaufbahnen von Klär- anlagen, Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone	C 30/37 (LP)	320	0,5

Da die deskriptiven Forderungen nicht erfüllt sind und sich weiterhin auf das Bindemittel Portlandzement beziehen, wurde die Frost-Tausalzbeständigkeit experimentell nach einem Verfahren der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) bestimmt, das wiederum auf einer Empfehlung der International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structure (RILEM) beruht und für den Wasserbau geringfügig modifiziert wurde. Um die Dauerhaftigkeit des ILB einordnen zu können, wurde er zusammen mit einem Referenzbeton geprüft. Dabei wurde bewusst in Kauf genommen, dass dieses Prüfverfahren für eine praxisgerechte Beurteilung nicht repräsentativ ist [Maik Seidel, 2015]. Um zu überprüfen, wie sich die neue Rezeptur gegenüber einer Referenz verhält, wurde auch eine Serie Prüfkörper aus einer Standard-Betonrezeptur der Firma BNB getestet, bei der die Anforderungen an die Expositionsklasse X2 erfüllt werden.

Zwei Prüfserien bestehend aus jeweils 3 bis auf die Prüffläche abgedichteten Prüfkörpern wurden nach kapillarer Sättigung mit einer Salzlösung in einer Frosttruhe insgesamt 28 Frost-Tauwechseln unterzogen

und die abgewitterte Masse nach jedem 4. bis maximal jedem 6. Frost-Tau-Wechsel, sowie nach 28 Frost-Tau-Wechseln durch Filtration und Wägung bestimmt. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn für die Abwitterung, d.h. den Materialverlust der Oberfläche, gilt, dass der Mittelwert der Prüfserie  $< 1500 \text{ g/m}^2$  und das 95%-Quantil  $< 1800 \text{ g/m}^2$  ist.

Während der Infraleichtbeton den Test bestanden hat, ist dies für die Standardbetonmischung nicht der Fall.

Im Rahmen der kapillaren Sättigung mit der Prüflösung wurden für die beiden Prüfserien trotz der unterschiedlichen Rohdichte ein sehr ähnlicher Verlauf für die Flüssigkeitsaufnahme über die Zeit ermittelt. Insgesamt wurden über die Prüffläche im Fall des Infraleichtbetons  $25,9 \text{ g}$  und im Fall des Referenzbetons  $23,5 \text{ g}$  aufgenommen (Abbildung 23).

Im Verlauf der sich an die kapillare Sättigung anschließenden Frost-Tauwechsel wurde im Fall des Referenzbetons bereits nach 8 Frost-Tauwechseln der Grenzwert der maximalen flächenbezogenen Abwitterung für die Frostbeständigkeit von  $1500 \text{ g/m}^2$  knapp überschritten (Mittelwert der Serie von  $1508 \text{ g/m}^2$ ). Im weiteren Verlauf nahm die Abwitterung weiter linear zu und erreichte einen mittleren Endwert von  $4219 \text{ g/m}^2$ . Der Infraleichtbeton dagegen zeigt ebenfalls einen linearen Verlauf der Abwitterung, erreicht aber nach 28 Tagen nur einen Mittelwert von  $463 \text{ g/m}^2$ . Der Maximalwert der Abwitterung für die Frost-Tausalzbeständigkeit nach BAW-Merkblatt ist damit deutlich unterschritten (Abbildung 24).

Interessant ist, dass der Materialverlust sich im Fall des Referenzbetons in einer Abnahme der Prüfkörpermasse spiegelt, während der Infraleichtbeton trotz Abwitterung an Masse zunimmt. Ursächlich muss hierfür eine weitere Flüssigkeitsaufnahme im Verlauf der künstlichen Bewitterung sein (Abbildung 24 & Abbildung 25), die von Setzer als Frostpumpe beschrieben wurde (Setzer, 2013).

Die fotografische Dokumentation (Abbildung 26) zeigt, dass die gesamte Zementsteinmatrix im Rahmen der Frost-Tauwechsel abgetragen wird und nach Abschluss die Gesteinskörnung wie bei einem Waschbeton freiliegt. Die Oberfläche des Infraleichtbeton ist dagegen noch partiell intakt. Hier wurden nur einzelne Bereiche der Zementsteinmatrix abgewittert.

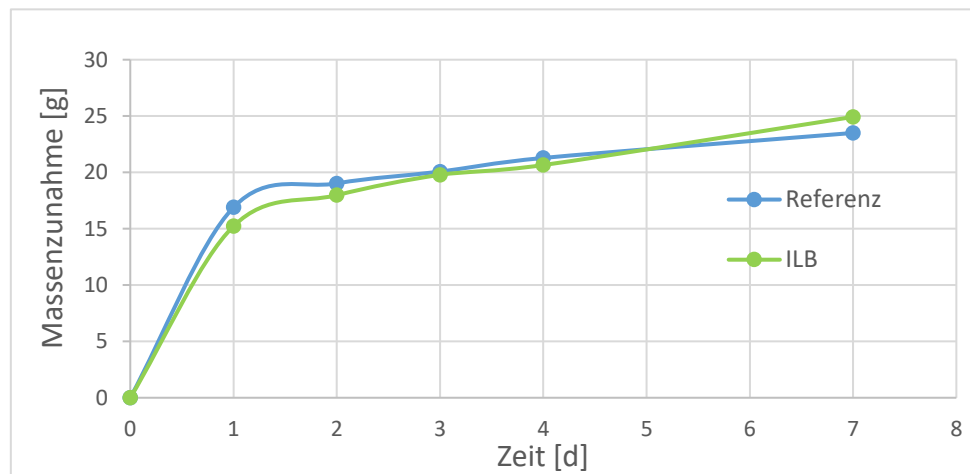


Abbildung 23. Massezunahme über die Zeit für die beiden Prüfkörperserien Referenz und ILB (Mittelwert aus 3 Prüfkörpern)

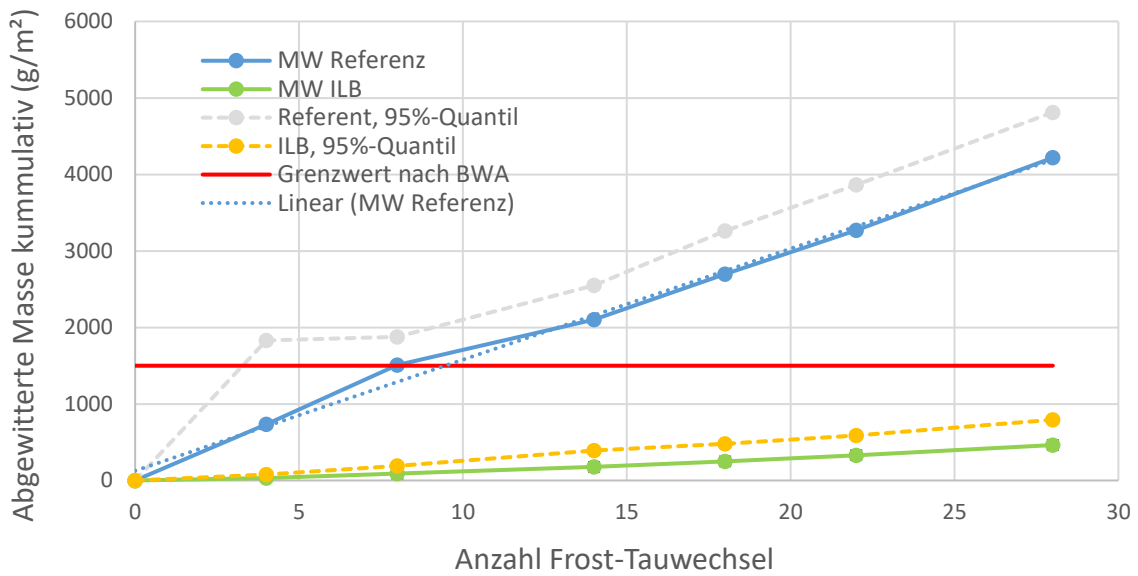


Abbildung 24. Abgewitterte Masse über die Zeit für die beiden Prüfkörperserien Referenz und ILB (Mittelwert aus 3 Prüfkörpern)

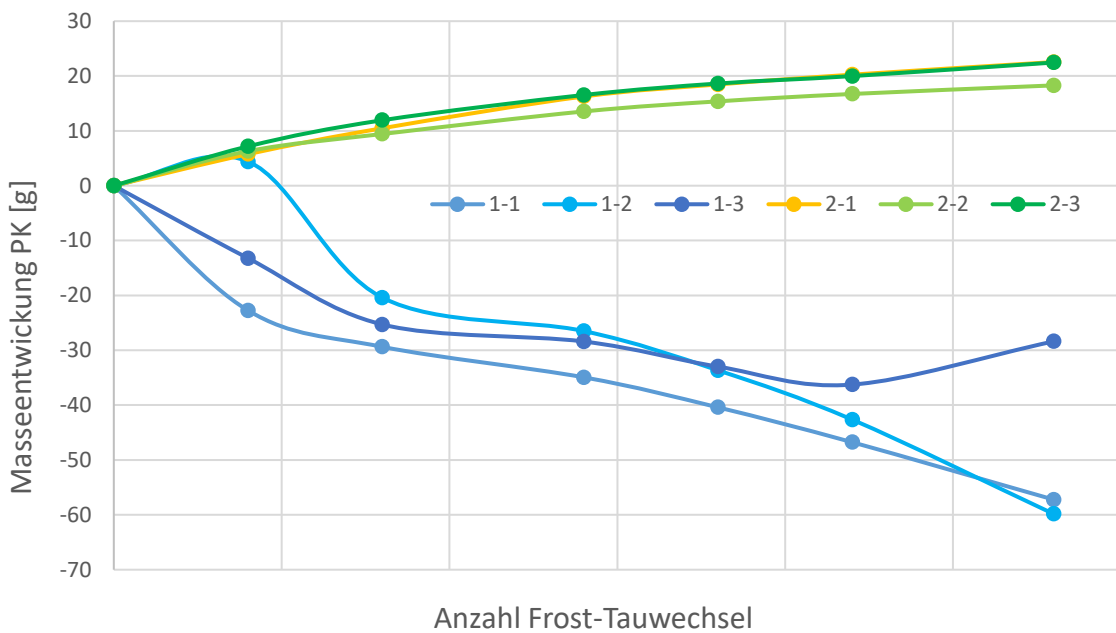


Abbildung 25. Masseentwicklung der Prüfkörperserien Referenz und ILB mit zunehmender Anzahl der Frost-Tauwechsel

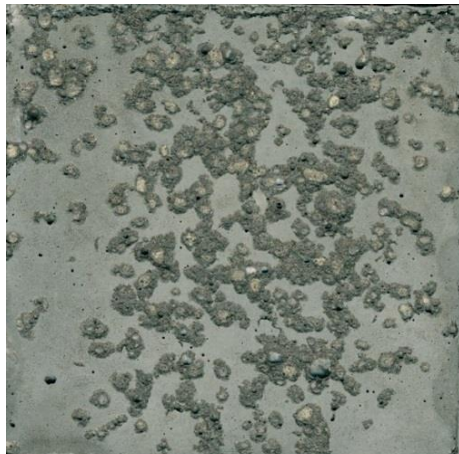
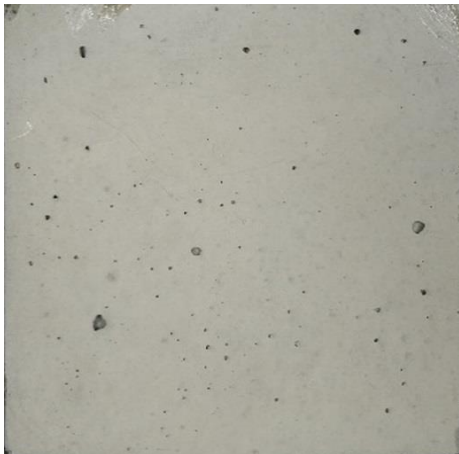
Ausgangszustand



Zustand nach 28-Frost-Tauwechseln



Referenz



Infraleichtbeton

Abbildung 26. fotografische Dokumentation der Prüfkörper vor und nach dem Test der Frost-Tausalzbeständigkeit

### 6.3 Laborversuchsreihen

Versuche zur Kultivierung der unter biotechnologischen Gesichtspunkten ausgewählten Algen auf den Betonsubstraten (Solaga)

Um zu überprüfen, ob die ausgewählten Algenkulturen auf den von der BAM bereitgestellten Betonsubstraten überleben, wurde im ersten Schritt ein Versuchsaufbau mit horizontaler Installation der Probekörper unter definierter Belichtung und CO<sub>2</sub>-Begasung entwickelt, wobei die Applikation der Algen durch regelmäßiges, manuelles Auftropfen erfolgte. In einem 2. Schritt wurde der Versuchsaufbau weiterentwickelt. Die über eine Zentrifugierung angereicherte Algensuspension wurde mit einem Pinsel aufgetragen und die unter einem Winkel von 45° gelagerten Proben über einen Nebelgenerator kontinuierlich befeuchtet. In Schritt 3 schließlich wurden die Betonsubstrate vertikal gelagert und sowohl mit einer Tropfbewässerung als auch mit dem Nebelgenerator befeuchtet.

Im Ergebnis konnte aufgezeigt werden, dass die Algen auch auf den unter einem Winkel von 90° gelagerten Proben über mehrere Wochen im Labor konserviert werden konnten, ohne dass visuell eine Abnahme der Grünfärbung und /oder eine signifikante Reduktion der begrüneten Fläche zu erkennen war (Abbildung 27).

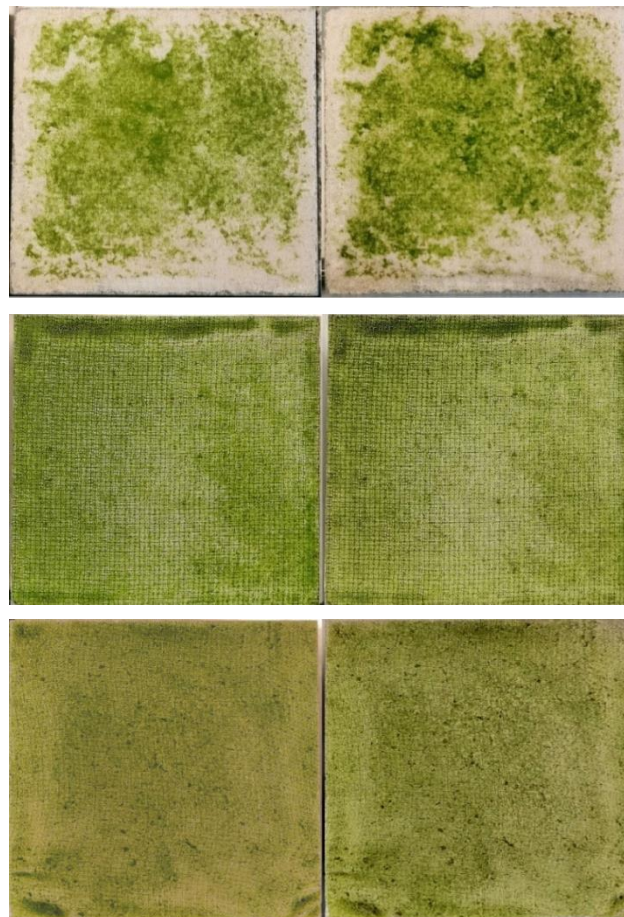


Abbildung 27. Wachstum von *Klebsormidium flaccidum* auf UHPC Vorhangstruktur von 30.06.2022 bis 05.08.2022 (oben) von *Chlorella vulgaris* auf UHPC Vinidur von 30.05.2022 bis 23.07.2022 (Mitte) und von *Neochloris vigensis* auf UHPC Vinidur von 30.05.2022 bis 23.07.2022 (unten)

Die Laborversuche zeigten weiterhin, dass die Dauerhaftigkeit der Biofilme auf den texturierten Oberflächen größer ist als auf den schalungsglatten Oberflächen. Als besonders dauerhaft erwiesen sich die applizierten Algen auf der UHPC-Vorhangstruktur (Abbildung 27, oben).

Ein Einfluß der Oberflächenchemie (pH-Wert) sowie der hygri-schen Kennwerte war in den Laborversuchen nicht erkennbar.

Die Bewässerung durch Sprühnebel führte zu einer höheren Dauerhaftigkeit als die Tropfenbewässerung, die insbesondere auf den schalungsglatten Oberflächen zu einem Abtrag von Biomasse führte

Versuche zur Bewertung des Einflusses des pH-Werts und der Nährstoffverfügbarkeit? unterschiedlicher Substrate auf das Wachstum von Jaagichlorella bzw. den Modellbiofilm (BAM)

Um den Einfluss der chemischen Eigenschaften pH-Wert und Nährstoffverfügbarkeit auf die Biorezeptivität der Substrate zu untersuchen und zu analysieren, inwieweit diese durch die Zusammensetzung des Biofilms beeinflusst werden, wurden Laborversuche in einem Wachstumsschrank unter sterilen Bedingungen durchgeführt.

Als Substrate wurden der Infraleichtbeton ILB (Versuch 1) sowie der der Standardmörtel SM2 (Versuch 2) im Ausgangszustand sowie nach künstlicher Karbonatisierung untersucht. Die Proben wurden in beiden Versuchen jeweils einmal mit einem Multi-Spezies-Biofilm bestehend aus Jaagichlorella-Mikroalgen und Knufia Petricola-Pilzen inokuliert als auch mit einem Biofilm, der nur aus Jaagichlorella besteht. Als 3. Faktor wurde im zweiten Experiment die Verfügbarkeit von Nährstoffen in das Untersuchungskonzept miteinbezogen: Während auf einem Teil der Proben vor Inokulation ein für das Algenwachstum optimiertes Medium appliziert wurde, wurde der zweite Teil der Proben zum Vergleich nur mit Reinstwasser beträufelt. Mit Hilfe eines faktoriellen Untersuchungsplans wurden die Auswirkungen der Faktoren pH-Wert, Nährstoffe und Typ des Biofilms und ihrer potenziellen Wechselwirkungen auf die Biorezeptivität analysiert und bezüglich ihres Einflusses priorisiert. Im letzten Schritt wurde schließlich die Biofilm-Substrat-Haftung durch das Aufbringen einer abrasiven Belastung in Form eines Wasserstrahls getestet.

### *Untersuchungsmethodik*

#### Faktorielle Versuchsplanung

Die Versuchspläne (Tabelle 8) wurden mit der Software DesignExpert® 13.0.14.0 (Stat-Ease Inc., USA) erstellt und die beiden Experimente nacheinander durchgeführt. Im ersten Versuch wurden zwei Faktoren (pH-Wert, Mikroorganismus) auf 2 Ebenen variiert. Der 2. Versuch beinhaltete 3 Faktoren (pH-Wert, Mikroorganismen, Nährstoffe), die ebenfalls auf 2 Ebenen variiert wurden. Beim Faktor pH-Wert entsprechen die niedrigen und hohen Werte dem Beton im Ausgangszustand bzw. dem künstlich carbonatisierten Beton. Für den Faktor Mikroorganismus sind die Ebenen Jaagichlorella allein und Jaagichlorella in Kombination mit Knufia Petricola. Für den Nährstofffaktor schließlich sind die Werte „ohne Nährstoffe“ (Wasser) und „Bold's Basal Medium“ (BBM). Tabelle 8 gibt einen Überblick über die einzelnen Versuchsreihen. Jeder Versuch wurde dreifach durchgeführt, und alle Versuche wurden vollständig randomisiert.



Tabelle 8. Übersicht der faktoriellen Versuchsplanung, links: Experiment 1, rechts: Experiment 2

Experiment 1			Experiment 2			
Run	Factor		Run	pH	Micro-organismen	Nährstoffe
	pH	Micro-organismen				
1	carbonatisiert	Jaag.	1	carbonatisiert	Jaag.	BBM
2	carbonatisiert	Jaag./Knuf.	2	carbonatisiert	Jaag./Knuf.	BBM
3	nicht carbonatisiert	Jaag.	3	nicht carbonatisiert	Jaag.	BBM
4	nicht carbonatisiert	Jaag./Knuf.	4	nicht carbonatisiert	Jaag./Knuf.	BBM
			5	carbonatisiert	Jaag.	Wasser
			6	carbonatisiert	Jaag./Knuf.	Wasser
			7	nicht carbonatisiert	Jaag.	Wasser
			8	nicht carbonatisiert	Jaag./Knuf.	Wasser

### Nährstoffaufbereitung

Um den Einfluss von Nährstoffen auf das Wachstum und die Vitalität der Mikroorganismen zu untersuchen, wurde vor der Inokulation des Biofilms eine Nährstoffschicht auf die Oberfläche der Betonproben aufgetragen. Dazu wurde eine Stammlösung von Bold's Basalmedium (BBM) für Süßwasseralgen in 1-facher Konzentration mit ultrareinem Milli-Q® Wasser (Merck, Deutschland) hergestellt. Um sich den optimalen Wachstumsbedingungen anzunähern, wurden 88,5 µL/cm<sup>2</sup> BBM auf die Oberfläche appliziert und trocknen gelassen. Die Kontrollproben wurden mit der gleichen Menge an Reinstwasser versehen.

### Kultivierung der Mikroorganismen und Inokulation der Proben

Um die Biomasse zu erhöhen, wurde Jaagichlorella zunächst in einer Flüssigkultur von BBM in einem Kuhner Climo-Shaker ISF1-X (Adolf Kühner AG, Schweiz) bei 20°C und ~100 µmol/m<sup>2</sup>s (400-700 nm) in einem 12/12-stündigen Licht-/Dunkelzyklus kultiviert. Um die Algen an subaerale Bedingungen zu gewöhnen, wurden die Flüssigkulturen anschließend in einer Zelldichte von 10<sup>6</sup> Zellen/cm<sup>2</sup> auf Agarplatten mit BBM übertragen und diese im Wachstumsschrank Percival CU-22L (Percival Scientific Inc., USA) bei 18°C und 7 µmol/m<sup>2</sup>s (400-700 nm) in einem 12/12-stündigen Licht-/Dunkelzyklus gelagert. Knufia petricola wurde über 7 Tage bei 25°C auf Malzextrakt-Agar (MEA) 7 Tage lang kultiviert.

Die Betonsubstrate wurden in einer Petrischale mit Agar fixiert, der während des Versuchs für eine Feuchtigkeit in der Petrischale von nahezu 100 % sorgt.

Für die Inokulation der Substrate wurden *Jaagichlorella* und *Knufia petricola* von den Agarplatten geerntet und entweder in Wasser oder in flüssigem BBM suspendiert. Die Alge wurde allein oder in Kombination mit dem Pilz in einer Zelldichte von  $8,85 \times 10^5$  Zellen/cm<sup>2</sup> bzw.  $8,85 \times 10^3$  Zellen/cm<sup>2</sup> auf die Probenoberfläche beimpft und unter der Cleanbench kurz trocknen gelassen. Anschließend wurden die Petrischalen mit Parafin versiegelt, um Sterilität zu gewährleisten und ein Austrocknen zu verhindern (Abbildung 28).

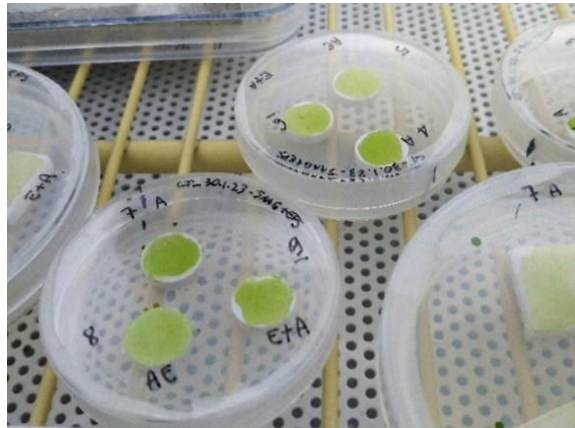


Abbildung 28. Proben in Petrischalen im Wachstumsschrank

#### Quantifizierung der Algenbiomasse und der Vitalität der Organismen

Die Quantifizierung der Algenbiomasse und der photosynthetischen Aktivität erfolgte mittels bildgebender PAM-Fluorometrie. Das verwendete Imaging-PAM der Firma Walz misst die Photosyntheseaktivität von Pflanzen oder chlorophyllhaltigen Mikroorganismen durch die Messung der Chlorophyllfluoreszenz bei verschiedenen Lichtverhältnissen (Abbildung 29). Aus den Fluoreszenzmessungen können wichtige Informationen zur effektiven Quantenausbeute sowie dem Elektronentransport und Energiefluss während der Photosynthese gewonnen werden, die wiederum Rückschlüsse auf das Wachstum und die Vitalität der Pflanzen sowie ihre Reaktion auf verschiedene Umweltbedingungen erlauben. Über das Umschalten in den Videomodus, können Besonderheiten spezifischen Merkmalen des inhomogenen Substrats zugeordnet werden und im Nachgang weiter analysiert werden (Abbildung 30).

Im Rahmen der Laborversuche wurden zwei Parameter gemessen bzw. berechnet. Zur Quantifizierung der Biomasse wurde die Chlorophyllfluoreszenz nach Dunkeladaption  $F_0$  herangezogen, während die Vitalität der Organismen über den Yieldwert ( $F_v/F_m$ ) beurteilt wurde.

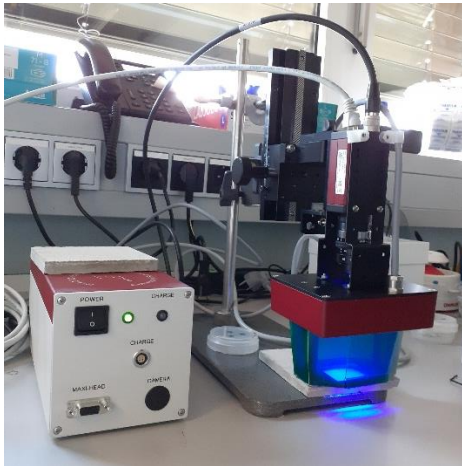


Abbildung 29. Durchführung einer PAM-Messung im Labor (links) sowie im Freien (rechts). Das schwarze Textil dient der Dunkeladaption des Messbereichs

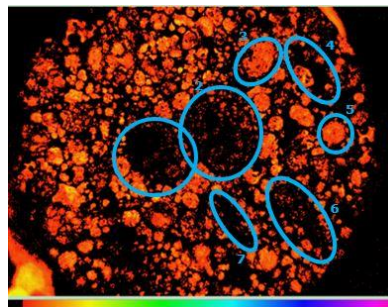
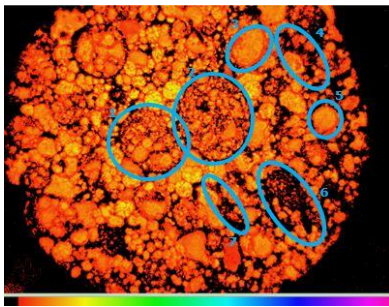


Abbildung 30. lokal starke Veränderung der Grundfluoreszenz nach Dunkeladaption über die Zeit und Lokalisierung der betroffenen Flächen über das Livebild

## Wachstumsversuche

Die Messung des Ausgangszustands mit dem Imaging-PAM erfolgte nach dem Verschließen der Petrischalen und 20-minütiger Dunkeladaption. Über die Versuchsdauer wurden die Proben in einem Wachstumsschrank Percival CU-22L mit kontrollierten Umgebungsbedingungen (18 °C, 7  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  (400-700 nm), 12/12 Stunden Licht-/Dunkelzyklus) gelagert. Weitere PAM-Messungen wurden in regelmäßigen Abständen über einen Zeitraum von 3 Monaten durchgeführt. Um Sterilität zu gewährleisten, blieben die mit den Biofilmen versehenen Substrate über den gesamten Zeitraum in den Petrischalen versiegelt. Für die Fluoreszenzmessungen wurden die Substrate kurzzeitig aus dem Klimaschrank entnommen. Die Messung erfolgte durch die transparente Abdeckung.

## Bestimmung der Adhäsion des Biofilms an der Substratoberfläche

In Versuch 2 wurde nach dem 3-monatigen Wachstumsexperiment die Adhäsion der Biofilme auf den Substraten analysiert.

Dazu wurden die Proben vertikal positioniert und einem Wassersprühnebel ausgesetzt, der aus einer Entfernung von 24 cm einen festen, flächigen Aufpralldruck ausübte (Abbildung 31). Als Maß zur Beurteilung der Adhäsion wurde die Differenz der Biomasse vor und nach dem Aufbringen der abrasiven Belastung bestimmt ( $\Delta F_0$ ). Die Proben wurden dazu vor und nach dem Versuch mit dem Imaging-PAM gemessen und die Grundfluoreszenz nach Dunkeladaption  $F_0$  aufgezeichnet.



Abbildung 31. Versuchsaufbau zur Bestimmung der Adhäsion des Biofilms an der Substratoberfläche

## Datenanalyse

Zur Quantifizierung der Biomasse sowie der Vitalität der Biofilme auf den Substraten werden die Durchschnittswerte von  $F_0$  und des Yieldwerts  $F_v/F_m$  über die Probenoberfläche ermittelt und über die Zeit in Wachstumsgraphen bzw. Vitalitätsgraphen aufgezeichnet

Die Differenz der Werte über die Versuchsdauer bilden die Grundlage für die statistische Analyse zur Quantifizierung des Einflusses der untersuchten Faktoren bzw. ihrer Wechselwirkungen. (Gleichung 1).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3 + \epsilon \quad (1)$$

In Gleichung 1 entspricht Y der Antwortvariablen und die X-Werte den untersuchten Einflussfaktoren ( $X_1$  = pH-Wert,  $X_2$  = Nährstoffe,  $X_3$  = Mikroorganismen). Die  $\beta$ -Koeffizienten beschreiben jeweils den Einfluss eines spezifischen Faktors bzw. Kombination von Faktoren auf die Biorezeptivität unter der Voraussetzung, dass alle übrigen Faktoren konstant gehalten werden.  $\beta_0$  bezeichnet die durchschnittliche Antwort aller Versuchsreihen und  $\epsilon$  ist der Fehler. Alle Terme, die den Nährstofffaktor  $X_2$  enthalten, werden in Experiment 1 weggelassen (Tabelle 8).

Mit Hilfe der in der Software DesignExpert® integrierten Varianzanalyse (ANOVA) wird analysiert, welche Faktoren oder Interaktionen statistisch signifikant sind. Die Entfernung aller nicht signifikanten Terme auf der Grundlage eines p-Werts  $< 0,05$  erlaubt im Anschluss eine Verfeinerung des Modells

Wachstumsversuch 1: Einfluss von pH-Wert und Biofilmtyp

Die Veränderung der  $F_0$ - und  $F_v/F_m$ -Werte über die Zeit ist in Abbildung 32 dargestellt. In beiden Fällen ist auf den nicht carbonatisierten Proben ein rascher Rückgang der Werte festzustellen. Auf den carbonatisierten Substraten ist dagegen zunächst ein Zuwachs an Algenbiomasse  $F_0$  und Vitalität der Algen ( $F_v/F_m$ ) zu verzeichnen bevor die Werte nach circa einem Monat absinken.

Zum Ende der dreimonatigen Wachstumsperiode zeigt sich auf den carbonatisierten Proben eine Differenz in der Vitalität in Abhängigkeit des Biofilms. Die Substrate, die nur mit der Alge Jaagichlorella inokuliert wurden, zeigen eine geringere Vitalität im Vergleich zu den mit dem kombinierten Biofilm aus Jaagichlorella und Knufia Petricola inokulierten Proben.

Die Auswertung mit ANOVA (Tabelle 9) zeigt einen signifikanten Einfluss des pH-Werts sowohl auf die Biomasse als auch die Vitalität der Algen. Für die Entwicklung der Biomasse ( $\Delta F_0$ ) ist der Einfluss der Zusammensetzung des Biofilms als auch der Interaktionseffekt (pH-Wert und Biofilm) nicht signifikant. Für die Vitalität ( $\Delta F_v/F_m$ ) dagegen ergibt die Auswertung eine signifikante Interaktion und für den Einfluss der Zusammensetzung liegt der p-Wert mit 0,064 nahe dem Grenzwert von  $< 0,05$  liegt.

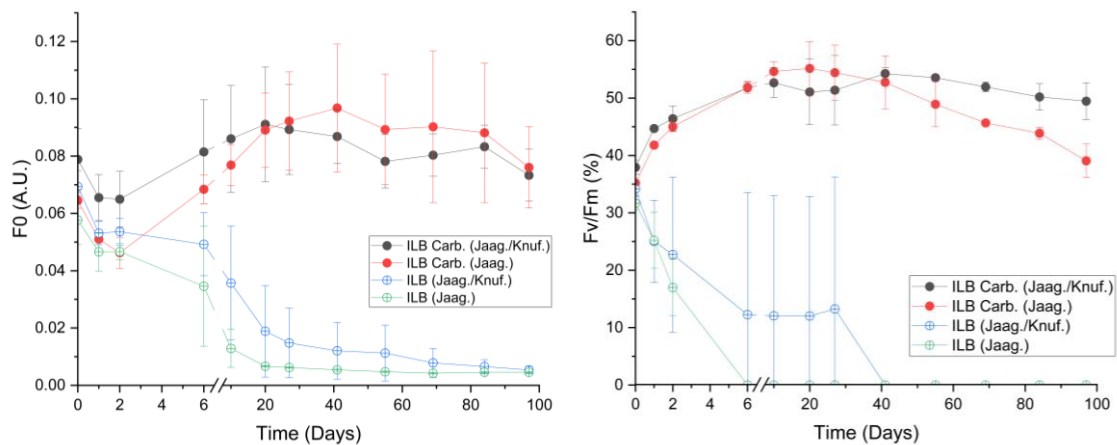


Abbildung 32. links: Entwicklung der Biomasse über die Zeit und rechts: Entwicklung des Yieldwerts über die Zeit im Experiment 1 (Einfluss von pH-Wert und Biofilm)

Tabelle 9. Auswertung der Varianzanalyse mit der Software ANOVA für den Versuch 1, links: Parameter Biomasse ( $F_0$ ), rechts Parameter Vitalität / Yield ( $F_v/F_m$ )

Parameter	Sum of Squares	Mean Square	p-value	Parameter	Sum of Squares	Mean Square	p-value
<b>Model</b>	0.0120	0.0040	0.0002	<b>Model</b>	5051.00	1683.67	<0.0001
A-pH	0.0114	0.0114	<0.0001	A-pH	4953.20	4953.20	<0.0001
B-Microorganism	0.0006	0.0006	0.0969	B-Microorganism	19.76	19.76	0.0639
AB	0.0000	0.0000	0.6882	AB	78.03	78.03	0.0027
<b>Fehler</b>	0.0013	0.0002		<b>Fehler</b>	34.24	4.28	

### Wachstumsversuch 2: Einfluss von pH-Wert des Substrats, Nährstoffzugabe und Biofilmtyp

Abbildung 33 zeigt die Veränderung von  $F_0$  und  $F_v/F_m$  über den Verlauf des dreimonatigen Versuchszeitraums. Wie bereits in Experiment 1 zeigt sich der deutliche Einfluss des pH-Werts auf die Entwicklung der Biomasse und die Vitalität der Organismen. Die Vitalität der Algen ( $F_v/F_m$ ) ist im Durchschnitt höher als in Experiment 1, was vermutlich auf den niedrigeren pH-Wert des Substrats Standardmörtel im Vergleich zu den Substraten aus Infraleichtbeton sowohl im nicht carbonatisierten Zustand (9,3 statt 10,2 nach 2 Stunden Wasserkontakt) als auch nach künstlicher Karbonatisierung (8,2 statt 9,0 nach 2 h Wasserkontakt) zurückzuführen ist.

Auch die Varianzanalyse (Tabelle 10) zeigt, dass der pH-Wert der signifikanteste Faktor ist, während der Faktor Mikroorganismus im Vergleich zu Versuch 1 deutlich weniger signifikant ist. Die Zugabe von Nährstoffen zeigt nahezu einen signifikanten Effekt und bei isolierter Betrachtung der carbonatisierten Proben kann ein signifikanter positiver Effekt für  $\Delta F_v/F_m$  beobachtet werden (Abbildung 34, Tabelle 11). Die Interaktionsterme (pH-Wert, Nährstoffzugabe, Biofilmtyp) sind in beiden Fällen nicht signifikant und wurden während der Verfeinerung aus dem  $\Delta F_0$ -Modell entfernt.

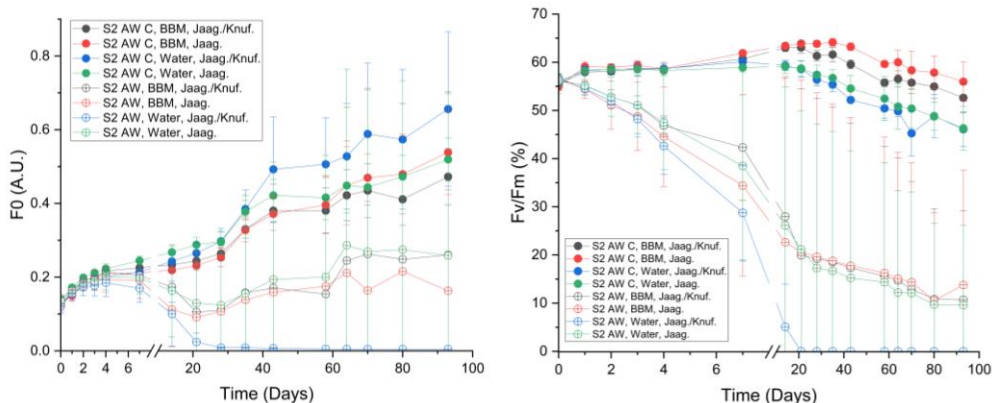


Abbildung 33. links: Entwicklung der Biomasse über die Zeit und rechts: Entwicklung des Yieldwerts über die Zeit im Experiment 2 (Einfluss von pH-Wert und Biofilm)

Tabelle 10. Auswertung der Varianzanalyse mit der Software ANOVA für den Versuch 2, links: Parameter Biomasse ( $F_0$ ), rechts Parameter Vitalität / Yield ( $F_v/F_m$ )

Parameter	Sum of Squares	Mean Square	p-value	Parameter	Sum of Squares	Mean Square	p-value
<b>Model</b>	0.8107	0.2702	<b>0.0196</b>	<b>Model</b>	11143.28	1591.9	<b>0.0002</b>
A-pH	0.8095	0.8095	<b>0.0022</b>	A-pH	10210	10210	< <b>0.0001</b>
B-Microorganism	0.0022	0.0022	0.8546	B-Microorganism	102.2	102.2	0.4483
C-Nutrients	0.0001	0.0001	0.9733	C-Nutrients	376.24	376.24	0.156
<b>Fehler</b>	1.06			AB	30.2	30.2	0.6781
				AC	2	2	0.9146
				BC	3.65	3.65	0.885
				ABC	43.09	43.09	0.6205
				<b>Fehler</b>	2529.03		

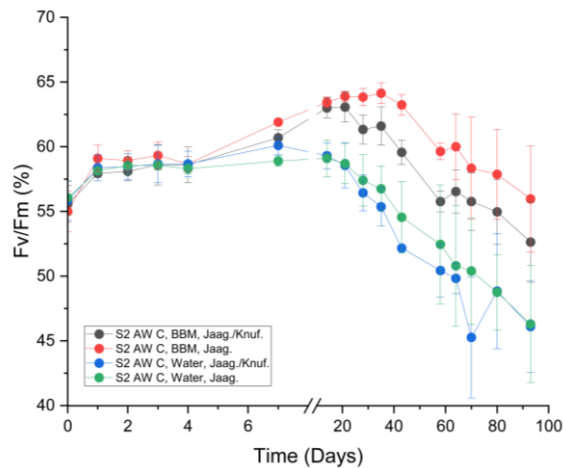


Abbildung 34. Entwicklung des Yieldwerts über die Zeit für die künstlich carbonatisierten Proben im Experiment 2 (Einfluss des Biofilms und der Nährstoffe)

Tabelle 11. Auswertung der Varianzanalyse mit der Software ANOVA ausschließlich für die carbonatisierten Proben des Versuchs 2, Parameter Vitalität / Yield ( $F_v/F_m$ )

Parameter	Sum of Squares	Mean Square	p-value
<b>Model</b>	231.94	77.31	0.0114
A-Nutrients	204.56	204.56	0.0025
C-Microorganism	10.05	10.05	0.3407
AB	10.23	10.23	0.3368
<b>Fehler</b>	67.34		

### Adhäsion des Biofilms an der Substratoberfläche

Die Analyse der Messdaten ergibt, dass die durch die abrasive Belastung abgetragene Biofilmmenge ( $\Delta F_0$  vor und nach dem Sprühen) auf den nicht carbonatisierten Proben geringer ist als auf den carbonatisierten Substraten. Trägt man die Vitalität der im Biofilm enthaltenen Algen ( $F_v/F_m$ )-vor Applikation der Sprühbelastung gegen die durch das Sprühen verursachte Abnahme des Biofilms ( $\Delta F_0$ ) auf, ergibt sich eine negative Korrelation zwischen Vitalität und Adhäsion des Biofilms auf der Oberfläche (Abbildung 35).

Dies könnte auf die niedrigeren anfänglichen  $F_0$ -Werte dieser Proben zurückzuführen sein. Vergleicht man jedoch nur die  $F_0$ -Werte nach Applikation des Wasserdrucks ist ein ähnlicher Trend zu erkennen (Abbildung 36), der ebenfalls auf eine verbesserte Adhäsion des Biofilms auf den Substraten mit höherem pH-Wert hinweist. Sowohl die Nährstoffzugabe-als auch die Zusammensetzung der Mikroorganismen scheinen nur einen geringen Einfluss auf die Haftfestigkeit zu haben.

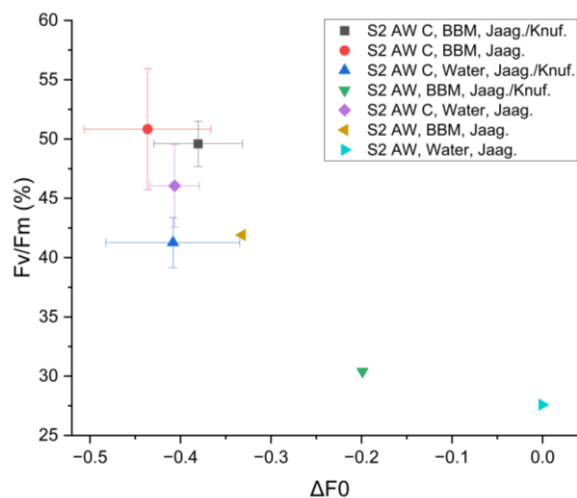


Abbildung 35. Vergleich zwischen der Vitalität der Algen im Biofilm ( $F_v/F_m$ ) unmittelbar vor der Sprühbelastung und der Abnahme des Biofilms durch die Belastung ( $\Delta F_0$ )



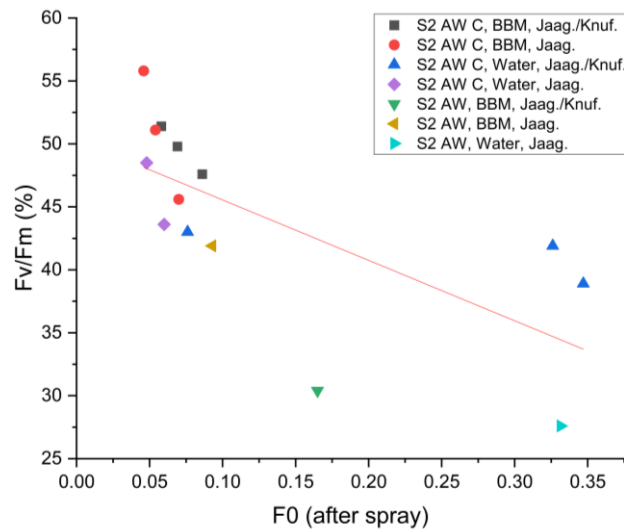


Abbildung 36. Vergleich zwischen der Vitalität der Algen im Biofilm ( $F_v/F_m$ ) unmittelbar vor der Sprühbelastung und der Algenbiomasse nach der Sprühbelastung quantifiziert über den Parameter  $F_0$

### Schlussfolgerungen

Mit dem entwickelten Test kann der Einfluss der chemischen Eigenschaften der Substrate (pH-Wert und Nährstoffverfügbarkeit) sowie der Organismenzusammensetzung auf die Biorezeptivität und die Dauerhaftigkeit der Biofilme quantifiziert werden. Die Ergebnisse unterstreichen die kritische Rolle des pH-Werts sowohl für das Wachstum als auch für die Gesundheit der Organismen und verdeutlichen, dass eine Reduzierung des pH-Werts für die erfolgreiche Besiedlung von zementhaltigen Materialien entscheidend ist.

Die Ergebnisse zur Adhäsion der Biofilme auf den Substraten deuten jedoch auch darauf hin, dass ein gewisser Stress für die Organismen deren Widerstandsfähigkeit gegen hydrodynamischen Stress erhöht. Diese Erkenntnis korrespondiert mit den Untersuchungsergebnissen zur Auswahl und Zusammensetzung der Testorganismen, die gezeigt haben, dass *Knufia Petricola* nur auf einem nährstoffarmen Medium ein fadenförmiges Wachstum zeigt und mit den Algen interagiert (Siehe Abbildung 9, Abbildung 36). Forschungsarbeiten von Sekhar et al. zeigen weiterhin, dass die Kieselalge *Nitzschia am-phia* unter Stress ihre EPS-Produktion erhöht, um sich vor extremen pH-Veränderungen zu schützen und ihre Adhäsion an der Oberfläche zu verbessern.

Kombiniert man die Datensätze zur Vitalität  $F_v/F_m$  aus beiden Experimenten, ergibt sich ein klarer und enger Bereich, in dem der pH-Wert suboptimal wird und der  $F_v/F_m$ -Wert deutlich abfällt (Abbildung 37).

Beide Beobachtungen könnten erklären, warum Algenbiofilme, die unter sehr günstigen Laborbedingungen kultiviert wurden, oft versagen, wenn sie den Umweltbedingungen im Freien ausgesetzt werden.

Die Tatsache, dass der Einfluss der Zusammensetzung der Mikroorganismen (Biofilm aus Alge und Pilz versus reiner Algenbiofilm) auf das Wachstum und die Vitalität der Algen im Versuch 2 deutlich geringer ist als im Versuch 1, könnte ebenfalls mit dem aus dem höheren pH-Wert resultierendem Stresslevel der Organismen in Versuch 1 zu tun haben. Untersuchungen von Cheah & Chan zeigen, dass ein pH-Wert von 9 oder niedriger für das Wachstum und die Gesundheit der Organismen optimal ist [57]. Dieser Wert

wird auf dem in Versuch 1 getesteten Substrat aus Infrleichtbeton eventuell phasenweise überschritten und könnte selektiv eine erhöhte Interaktion der Mikroorganismen analog zu den Beobachtungen auf dem nährstoffarmen Substrat oder aber eine erhöhte Bildung von extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) befördern. Weitere Studien wären erforderlich, um die Sensitivität der Organismen gegenüber Schwankungen im pH-Werte zu bestimmen.

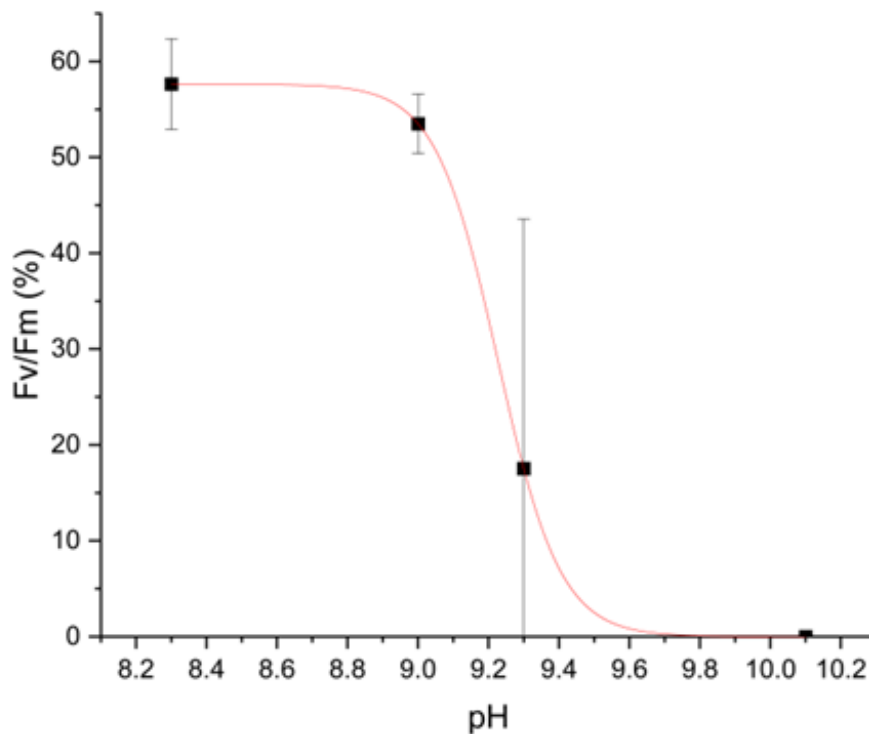


Abbildung 37. Durchschnittlicher pH-Wert (nach 2 Stunden) aufgetragen gegen die zu Versuchsende gemessene Vitalität (Fv/Fm-Wert) nach 41 Tagen in beiden Versuchen

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass ein Gleichgewicht zwischen photosynthetischer Effizienz, Wachstum und Biofilmadhäsion erreicht werden muss, um ein effektives und dauerhaftes Algen-Biofilm-Fassadensystem zu schaffen. Bestehende Versuchsaufbauten für den Test der Biorezeptivität von Substraten basieren auf der Grundidee, dass mit optimalen Randbedingungen eine beschleunigte Besiedlung der Substrate erreicht werden kann. Da aber unter optimalen Bedingungen das Verhalten der Organismen an der Fassade vermutlich nicht repräsentativ abgebildet wird und eine gute Anhaftung am Untergrund eventuell nicht befördert wird, müssen diese in Zukunft angepasst werden.

Untersuchungen von Cheah & Chan zeigen, dass ein pH-Wert von 9 oder niedriger für das Wachstum und die Gesundheit der Organismen optimal ist [57]. Dieser Wert wird auf dem in Versuch 1 getesteten Substrat aus Infrleichtbeton eventuell phasenweise überschritten (Abbildung 37) und könnte selektiv eine erhöhte Interaktion der Mikroorganismen analog zu den Beobachtungen auf dem nährstoffarmen Substrat oder aber eine erhöhte Bildung von extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) befördern. Weitere Studien wären erforderlich, um die Sensitivität der Organismen gegenüber Schwankungen im pH-Werte zu bestimmen.

## 6.4 Freibewitterungsversuche

### Freibewitterungsversuche auf dem Gelände der BAM

Auf dem Stammgelände der BAM in Berlin-Steglitz wurden im September 2022 erste Versuche zur Witterungsbeständigkeit der auf Betonsubstrate aufgetragenen Algenart *Chlorella vulgaris* durchgeführt. Um eine hohe Zellzahl zu erhalten, wurden die von Solaga angezüchteten Algen durch Zentrifugieren aufkonzentriert und die Suspension an die BAM übergeben, wo sie mit einem Pinsel auf die saugfähigeren Substrate S2 AW (durch Säurebehandlung aufgeraute Oberfläche) und S2 SB (sandgestrahlte Oberfläche) aufgetragen wurde. Um beobachten zu können, inwiefern die applizierten Algen aus dem oberen Bereich des Prüfkörpers durch die Beregnung in darunter liegende Bereiche transportiert werden, wurden nur die oberen Drittel der beiden Betonsubstrate mit Algen bestrichen (Abbildung 38).

Weiterhin wurde auch ein Thüster Kalkstein, der sich durch einen geringeren pH-Wert auszeichnet, in die Untersuchung miteinbezogen, wobei eine kleinformatige Platte auf der gesamten Fläche mit Algen bestrichen und eine zweite Platte als unbehandelte Referenz diente.

Die Proben wurden nach eintägiger Lagerung im Labor bei 23°C und 60 relativer Luftfeuchte am 02.09.2022 auf einem Bewitterungsstand nach Norden ausgerichtet montiert und mit einer Nebelbewässerung täglich befeuchtet (Abbildung 39).

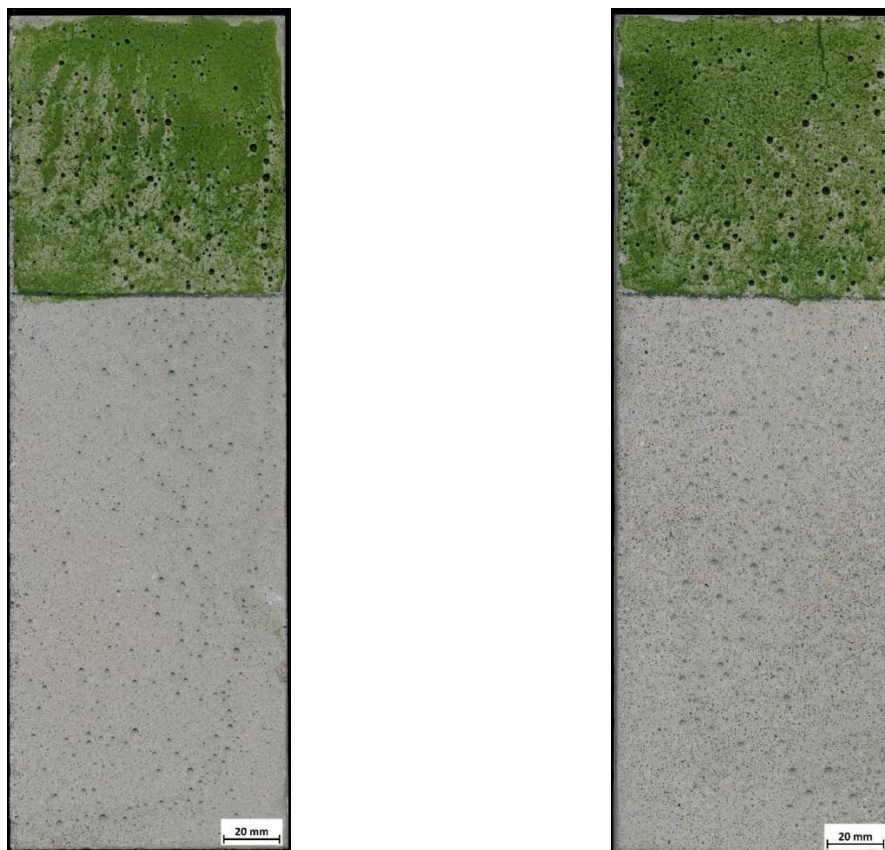


Abbildung 38. Betonsubstrate im oberen Drittel bestrichen mit einer Suspension aus aufkonzentrierten Algen (*Chlorella Vulgaris*), links Substrat S2AW (säuregewaschen), rechts S2SB (sandgestrahlt)



Abbildung 39. Bewitterungsstand auf dem Stammgelände der BAM in Berlin Steglitz

Um zu analysieren, inwieweit die aufgetragene Algensuspension an den Oberflächen unter den vorherrschenden Wetterbedingungen stabil ist, wurden die Prüfkörper die erste Woche täglich und abschließend nochmal nach 28 Tagen um etwa dieselbe Uhrzeit fotografiert (Abbildung 40).

Dabei zeigte sich, dass die Algenbiomasse – erkennbar durch die Grünfärbung der Oberfläche - schnell verblasst und nach 7 Tagen kaum mehr erkennbar ist. Nach 28 Tagen haben alle in die Untersuchung einbezogenen Prüfkörper visuell wieder den Ausgangszustand erreicht, so dass davon auszugehen ist, dass die applizierte Algensuspension komplett abgewaschen wurde (Abbildung 40). Ein Verfrachten von Biomasse auf den Betonsubstraten S2AW und S2SB aus dem behandelten Bereich in den unbehandelten Bereich konnte nicht beobachtet werden. Auch auf dem Thüster Kalkstein ist nach 28 Tage visuell keine Grünverfärbung mehr wahrnehmbar.

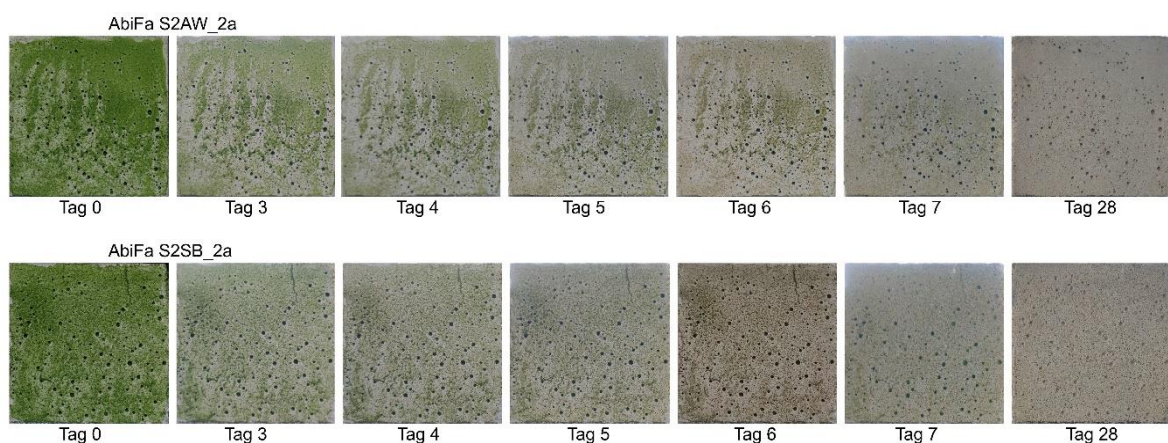


Abbildung 40. fotografische Dokumentation einer mit Chlorella-Suspension beimpften Proben

### Freibewitterungsversuche am Standort von Solaga

Über einen Zeitraum von 14 Tagen (Tag 0 – Tag 13) wurde eine Reihe Proben am Standort von Solaga den natürlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt. Die Substrate wurden vorab in einem Bereich von  $8 \times 8 \text{ cm}^2$  mit einer definierten Menge der Algenart *Klebsormidium flaccidum* (circa.  $1,64 \times 10^9$  Zellen /  $\text{cm}^2$ ) beimpft. Neben einer fotografischen Dokumentation der Proben wurde in definierten Abständen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme der Oberflächen sowie verschiedene Fluoreszenzparameter analysiert. Die visuelle Auswertung von Grünton und Flächenbelegung wurde somit durch Parameter ergänzt, die eine semiquantitative Erfassung der Biomasse (Grundfluoreszenz) bzw. der Effizienz des Stoffwechsels (Yield und  $\text{CO}_2$ -Aufnahme) erlauben. Zusätzlich wurde ein Versuchsaufbau zur Messung der Schadstoffbindung konzipiert und erprobt.

Es wurden Proben in jeweils zweifacher Ausfertigung des Mörtels SM-1 sandgestrahlt (Probennummer 1+2) und säuregewaschen (Probennummer 7+8) sowie des UHPC mit Baumrindentextur (Probennummer 9+10) untersucht. Zusätzlich wurden Referenzen aus Terrakotta, Putz und Kalziumsilikat (Abbildung 41) in die Analysen einbezogen. Um Messartefakte bei den Messungen zum Gasaustausch und der Schadstoffbindung ausschließen zu können, wurden neben den Substraten mit Biofilm auch Referenzen ohne Biofilm als Blindproben vermessen.






Bild	Materialspezifikation
	Probennummer: <b>1+2</b> <b>Standardmörtel (SM-2) sandgestrahlt</b> hergestellt von BNB
	Probennummer: <b>3 und 4</b> <b>Wandfliese Terrakotta</b> Lieferant: Golem GmbH
	Probennummer: <b>5 und 6</b> <b>Fassadenputz</b> Lieferant CAPAROL Farben Lacke Bautenschutz GmbH
	Probennummer: <b>7 und 8</b> <b>Standardmörtel (SM-2) säuregewaschen</b> hergestellt von BNB
	Probennummer: <b>9 und 10</b> <b>UHPC mit Baumrindentextur</b> hergestellt von BAM
	Probennummer: <b>11 und 12</b> <b>Kalziumsilikatplatte</b> Lieferant: Baustoffwerke Havelland GmbH

Abbildung 41. Übersicht der freibewitterten Proben zur Messung von Gasaustausch und Schadstoffbindung (Bilder: Solga)

Die Bewitterung der Proben erfolgte ab Oktober 2023 in einem transparenten Gehäuse. Die Temperatur schwankte im Betrachtungszeitraum zwischen 5 und 22 °C, während Luftfeuchten zwischen 65 und 100 % gemessen wurden (Abbildung 42). In den Daten sind auch Zeiten enthalten, in denen die Box für weitere Messungen in ein Fahrzeug verfrachtet wurde.

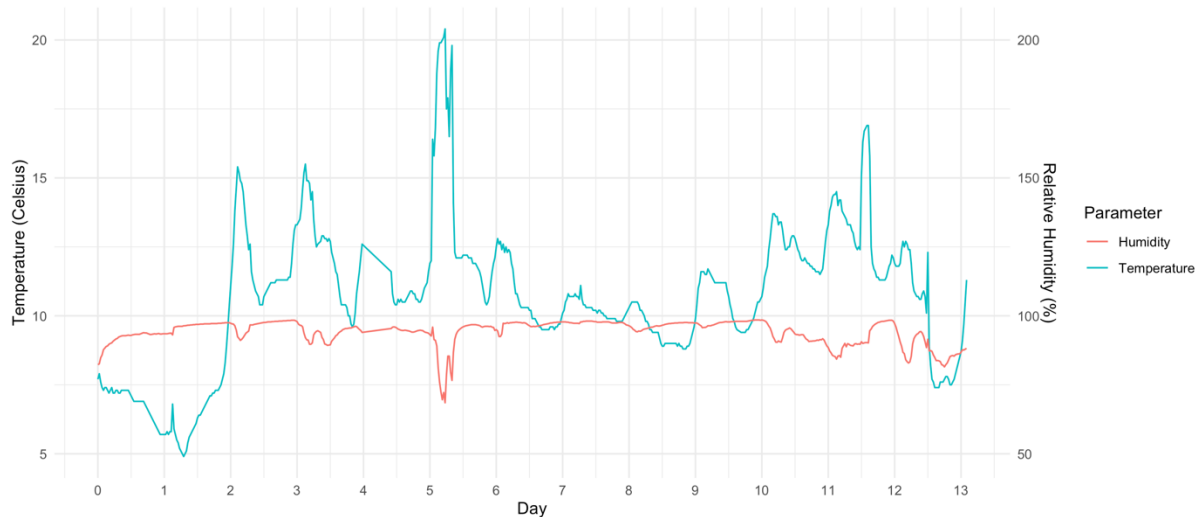


Abbildung 42. Verlauf der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte gemessen mit einem Thermo-Hygrometer während der Freibewitterung. Die rote Linie stellt das Temperaturprofil dar, die blaue Linie die relative Luftfeuchtigkeit (Bild: Solga)

Es wurde folgender Messablauf gewählt:

- Die bewitterten Proben wurden täglich mit definierter Beleuchtung fotografiert und anschließend mit deionisiertem Wasser besprüht.
- Messungen zum Gasaustausch erfolgten an den Tagen 1, 7 und 14.
- Messungen zur Vitalität mittel PAM wurden an an den Tagen 7 und 14 durchgeführt.

Für die Messung des Gasaustauschs wurde eigens eine Messanordnung konstruiert, die aus einer Lichtquelle, einer luftdichten Reaktionsbox ausgerüstet mit einem Temperatur- und Feuchtefühler, sowie Sensoren zur kontinuierlichen Messung der CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>- Konzentration und einer Einheit zur Kontrolle und Datenspeicherung besteht. Für die Steuerung und Datenablage des Gasaustausch-Messsystems wurde ein Programm mittels der Plattform Arduino erstellt (Abbildung 43).

Jede Messung begann mit dem Einschalten der Lichtquelle in der Box. Anschließend wurde über 30 Minuten die CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Konzentration in der Kammer überwacht. Die Analyse der Daten erfolgte mittels linearer Regression.

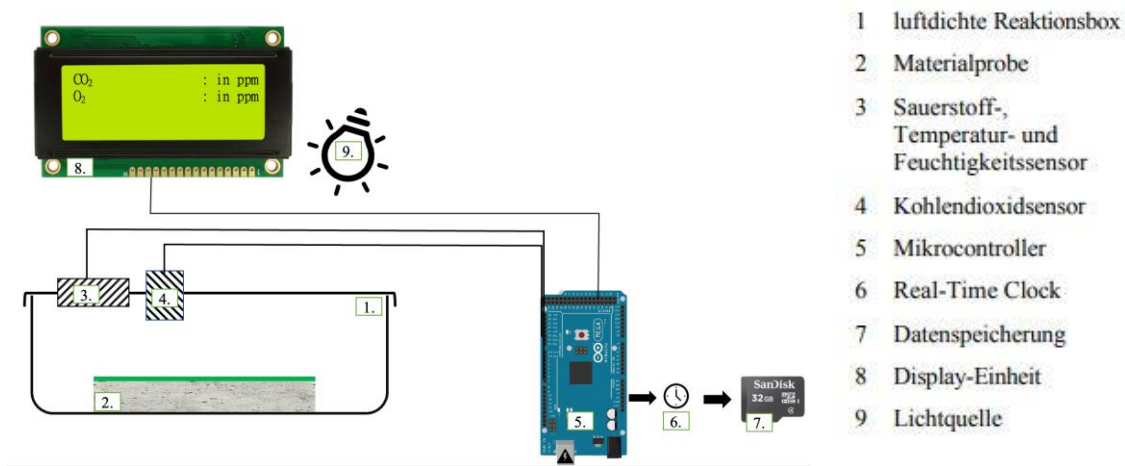


Abbildung 43. Aufbau der Gasaustauschmessung. Schematischer Überblick über das CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Gasaustauschmesssystem mit Arduino-Schnittstelle und Datenspeicherkonfiguration (Bild: Solga)

Für die Vitalitätsmessungen mit dem PAM wurde sichergestellt, dass jeweils dieselben 4 Messflächen auf den Substraten ausgewertet und für eine Mittelwertbildung herangezogen wurden. Da stets zwei Pallelproben analysiert wurden repräsentiert jeder Wert den Mittelwert aus 8 Messfeldern.

Der physiologische Zustand der Mikroalgen wurde durch die Messung von zwei Schlüsselparametern der Chlorophyllfluoreszenz bewertet: die minimale Fluoreszenz ( $F_0$ ) als Anhaltspunkt für die Quantität und der Yield als Parameter für die Vitalität ( $F_v/F_m$ ). Die beiden Werte wurden einmal nach Dunkeladaption und Befeuchtung durch eine Sprühflasche mittels deionisiertem Wasser gemessen und anschließend erneut nach einer Bestrahlung der Probe mit photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) bestimmt. Die minimale Fluoreszenz ( $F_0$ ) stellt die Basisfluoreszenzausbeute von Photosystem II (PSII) dar, wenn dessen Reaktionszentren geöffnet sind. Dieser Parameter wird gemessen, wenn sich die Pflanze an die Dunkelheit adaptiert und ihre photochemische Aktivität eingestellt hat (Herlory et al., 2013; Lichtenthaler et al., 2005; Murchie & Lawson, 2013).  $F_0$  bietet daher einen Einblick in den Anfangszustand von PSII und liefert eine Basislinie, von der aus Änderungen der Fluoreszenz gemessen werden können. Die lichtangepasste minimale Fluoreszenz ( $F_0'$ ) dagegen wird nach einer Bestrahlung der Probe mit photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) gemessen. Die Differenz zwischen  $F_0'$  und  $F_0$  deutet auf nicht-photochemischer Quenching-Mechanismen (NPQ) hin, mit denen sich die Organismen vor Lichtstress schützen, indem sie überschüssige Energie als Wärme abführen. (Herlory et al., 2013; Lichtenthaler et al., 2005).

Die fotografische Dokumentation der Prüfkörper (Abbildung 44 bis Abbildung 49) zeigt, dass es auf der Mehrzahl der Prüfkörper zu einer Abnahme des Grüntons und der besiedelten Fläche kommt. Nur auf den Prüfkörpern 9 und 10 (UHPC mit Baumrindenstruktur) sowie 11 und 12 (Kalziumsilikatplatte) nimmt die Dichte und Intensität der Grünfärbung nicht merklich ab. Nach dem visuellen Eindruck zu urteilen, sind die aufgetragenen Algen auf diesen Oberflächen nach wie vor lebendig und können sich auf dem Substrat halten.



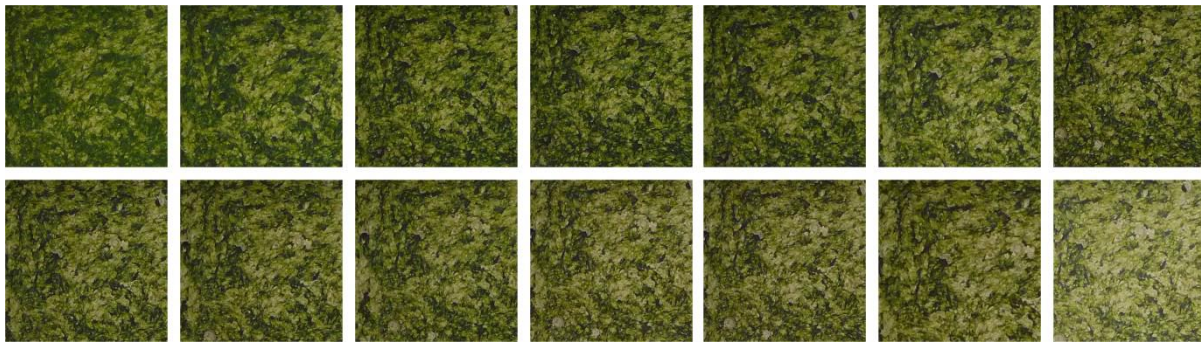


Abbildung 44. Fotodokumentation des Prüfkörpers 1: Standardmörtel (SM-2) sandgestrahlt über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga)

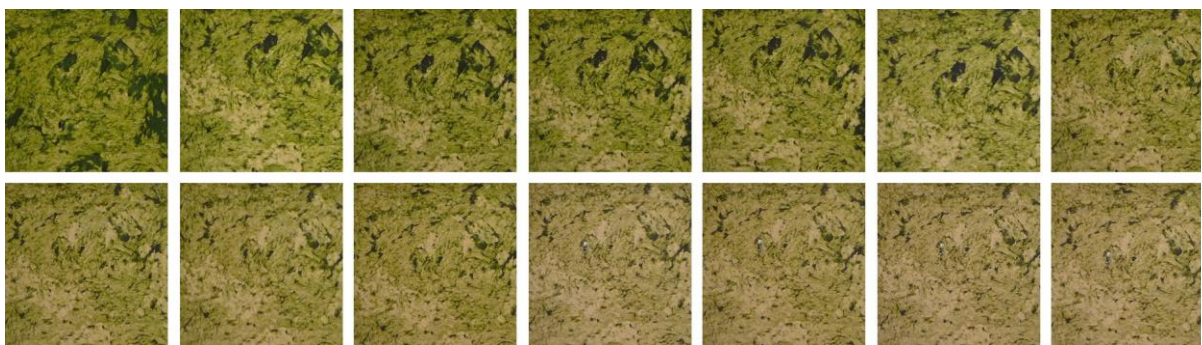


Abbildung 45. Fotodokumentation des Prüfkörpers 3: Wandfliese aus Terrakotta über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga)

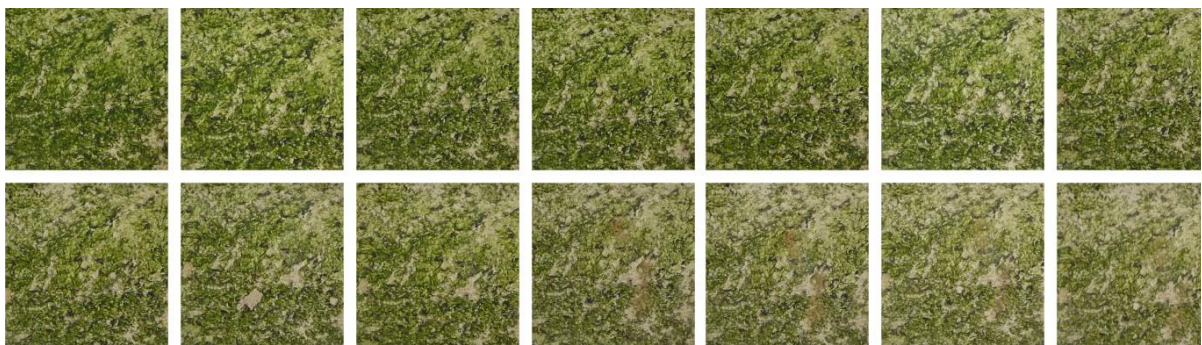


Abbildung 46. Fotodokumentation des Prüfkörpers 5: Fassadenputz über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga)

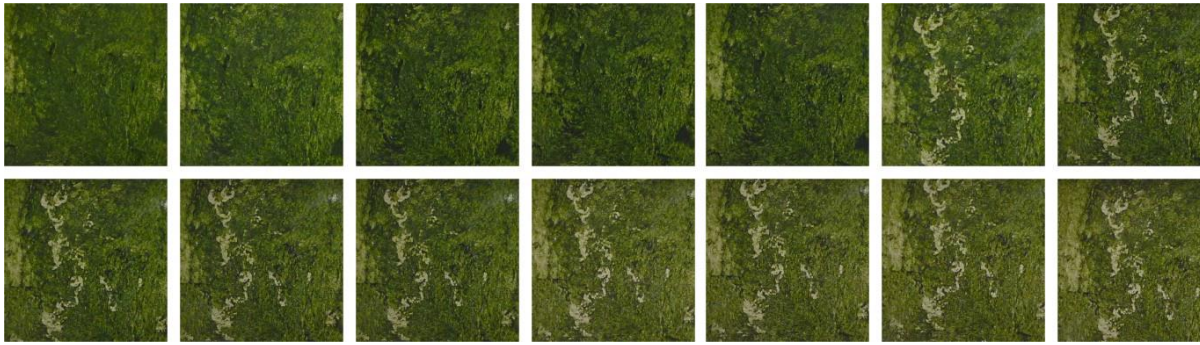


Abbildung 47. Fotodokumentation des Prüfkörpers 8: Standardmörtel (SM-2) säuregewaschen über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga)

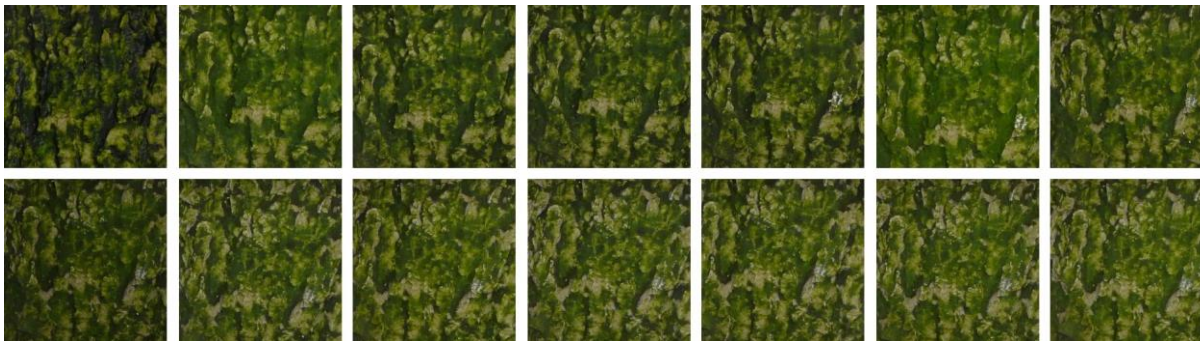


Abbildung 48. Fotodokumentation des Prüfkörpers 11: UHPC mit Baumrindenstruktur / Beschichtung Leonhard Kurz über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga)

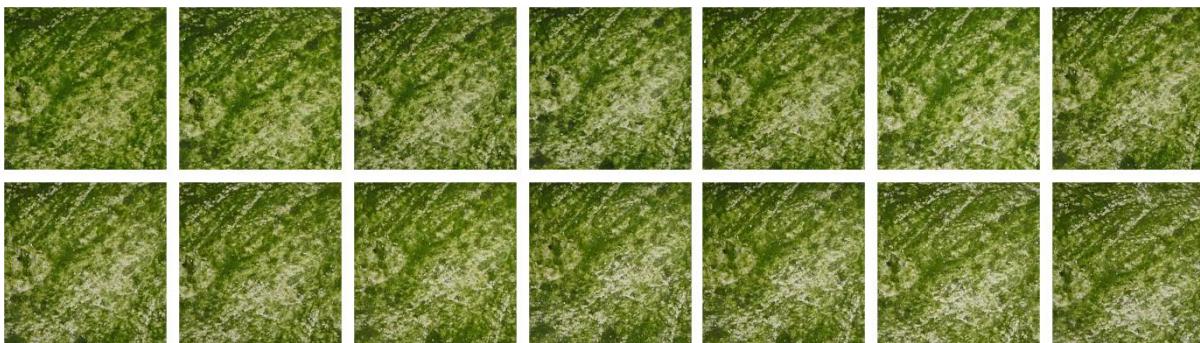


Abbildung 49. Fotodokumentation des Prüfkörpers 11: Kalziumsilikat über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga)

Die Auswertung der Gaswechselfmessungen zeigt, dass unabhängig vom Messtag nur eine Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration registriert werden kann, die korrespondierende Zunahme des Sauerstoffgehalts aber mit der gewählten Sensorik unabhängig vom Prüfkörper nicht erfasst werden kann.

Um die Effizienz des Gaswechsels zu quantifizieren, wurde die Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der luftdichten Reaktionsbox über einen Messzeitraum von 30 Minuten bestimmt und die lineare Regressionsgrade für den Mittelwert aus den jeweils 2 Parallelproben bestimmt (Abbildung 50). Die

Steigung der Regressionsgerade wurde anschließend für die Messtage 1, 7 und 14 in Abbildung 51 gegenübergestellt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich die Reduktion des CO<sub>2</sub> innerhalb des Messzeitraums bereits unmittelbar nach Applikation der Algen auf den verschiedenen Substraten stark unterscheidet. Ursächlich könnte sein, dass die Algen in Abhängigkeit der Oberflächenchemie der Substrate unterschiedlich stark gestresst sind. Terrakotta und der Fassadenputz sind im Gegensatz zu den Mörteln und dem UHPC nicht alkalisch und verlangen von den Algen weniger Adaption. Nicht ins Bild passt hier jedoch der sandgestrahlte Mörtel. Auf den Proben SM-2 sandgestrahlt und Terrakotta verstoffwechseln die Algen nur unmittelbar nach der Applikation signifikant CO<sub>2</sub> und nach 7 Tagen ist bereits kaum mehr eine Reduktion wahrnehmbar. Auf dem säuregewaschenen Mörtel tritt die deutliche Reduktion erst nach 14 Tagen ein. Beim Fassadenputz kommt es am Tag 7 sogar zu einer Erhöhung der Reduktionsrate, am Tag 14 jedoch zu einem Einbruch. All diese Ergebnisse korrespondieren mit der in der visuellen Auswertung erkennbaren Abnahme des Grüntons und des mit Algen bedeckten Bereichs. Auf den Substraten UHPC mit Baumrindenstruktur und Kalziumsilikat, bei denen die visuelle Auswertung keinen Rückgang in der Besiedlungsdichte erkennen lässt, nimmt die Stoffwechselrate zwischen den Tagen 1 und 7 zu und bleibt stabil bzw. fällt an Tag 14 nur leicht ab.

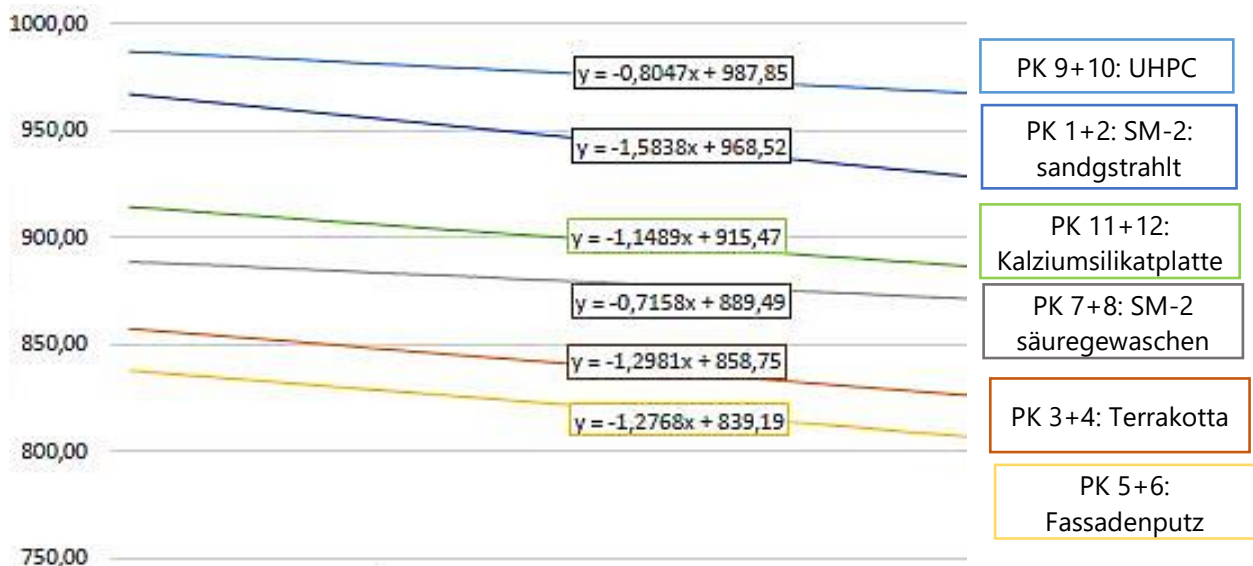


Abbildung 50. Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm über den Messzeitraum von 30 Minuten an Tag 1 (Bild: Solga)

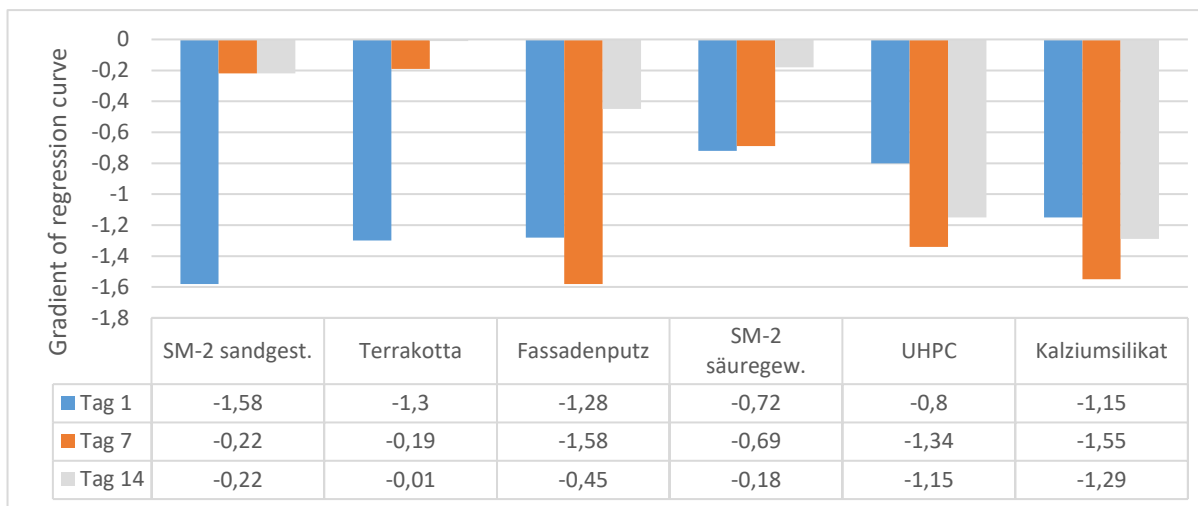


Abbildung 51. Abnahmegeschwindigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Versuchskammer an den Untersuchungstage 1, 7 und 14 (Bild: Solga)

Die Ergebnisse der an den Untersuchungstagen 7 und 14 durchgeführten PAM-Messungen sind in den Abbildung 52 und Abbildung 53 dargestellt.

Auch hier zeigt sich das bessere Abschneiden der Substrate UHPC und Kalziumsilikat im Vergleich mit den restlichen Proben. Die Grundfluoreszenz und der Yield liegen sowohl nach Dunkeladaptation als auch nach Bestrahlung mit PAR deutlich über den Werten, die für die anderen Substrate gemessen wurden. Teilweise steigen die Werte für die Grundfluoreszenz und den Yield sogar von der ersten Messung nach 7 Tagen Bewitterung bis zur 2. Messung nach 14 Tagen Bewitterung an.

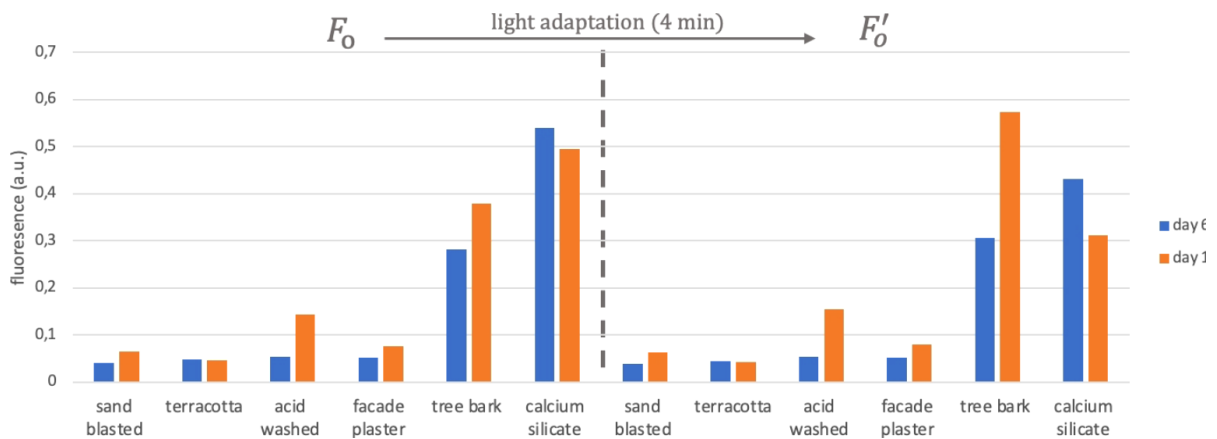


Abbildung 52. Grundfluoreszenz nach Dunkel- ( $F_0$ ) sowie Lichtadaptation ( $F'_0$ ) gemessen an den Untersuchungstagen 7 und 14 (Bild: Solga)

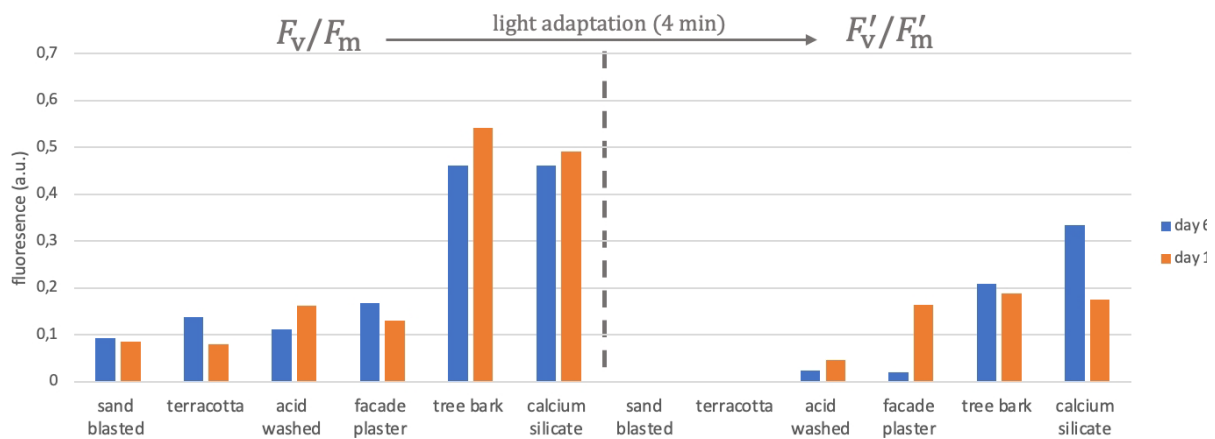


Abbildung 53. Vitalität der Algen nach Dunkel- ( $F_V/F_m$ ) sowie Lichtadaption ( $F'_V/F'_m$ ) gemessen an den Untersuchungstagen 7 und 14 (Bild: Solga)

## 6.5 Bestimmung der Ökosystemdienstleistungen

Ökosystemdienstleistungen sind die Vorteile, die Menschen von Ökosystemen beziehen (Alcamo, 2003). Da ein Ökosystem wiederum per Definition aus einer Lebensgemeinschaft von Organismen mehrerer Arten und ihrer unbelebten Umwelt besteht, sind Fassaden, die großflächig mit einem Biofilm bewachsen sind spezifische Ökosysteme. Das Forschungsvorhaben basiert auf der Annahme, dass mit Biofilmen begrünte Fassaden für den Menschen verschiedene Mehrwerte bieten, indem sie Schadstoffe binden und verstoffwechseln, in Kombination mit einer regelmäßigen Bewässerung die Verdunstungskühle erhöhen und zur Biodiversität im städtischen Raum beitragen. Da es bis zum Projektende nicht gelungen ist, die Biofilme auf den Betonsubstraten über einen längeren Zeitraum zu konservieren, erfolgte die Quantifizierung der Ökosystemdienstleistungen nur stichpunktartig und ist in zukünftiger Forschung weiter zu präzisieren.

### Messung der Schadstoffbindung (Solaga)

Die Analyse der Schadstoffbindung erfolgte an den bei Solaga freibewitterten Substraten an Tag 14 mit Hilfe eines selbst konzipierten Messaufbaus. Mittels eines optischen Partikelmessgeräts wurden die Konzentrationen von Feinstaubpartikeln der Größen PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>10</sub> gemessen, die durch ihre jeweiligen aerodynamischen Durchmesser von 1 µm, 2,5 µm und 10 µm definiert sind (Araújo & Costa, 2022). Der Feinstaub wird durch die kontrollierte Verbrennung eines Räucherstäbchens erzeugt und einem Luftstrom aus Umgebungsluft zugeleitet, der in einer Box das Substrat überströmt. Die Partikelkonzentration wird mit zwei quantitativen Infrarotsensoren vor und nach dem Durchströmen gemessen (Abbildung 54 und Abbildung 55). Für die Auswertung werden die Werte über 10 s -Intervalle gemittelt, und aus der Differenz die prozentuale Verringerung der Feinstaubkonzentration ( $C_{input} - C_{output}$ ) bezogen auf die Ausgangskonzentration  $C_{input}$  nach Gleichung 2 berechnet:

$$deviation [\%] = \frac{C_{input} - C_{output}}{C_{input}} \quad (2)$$

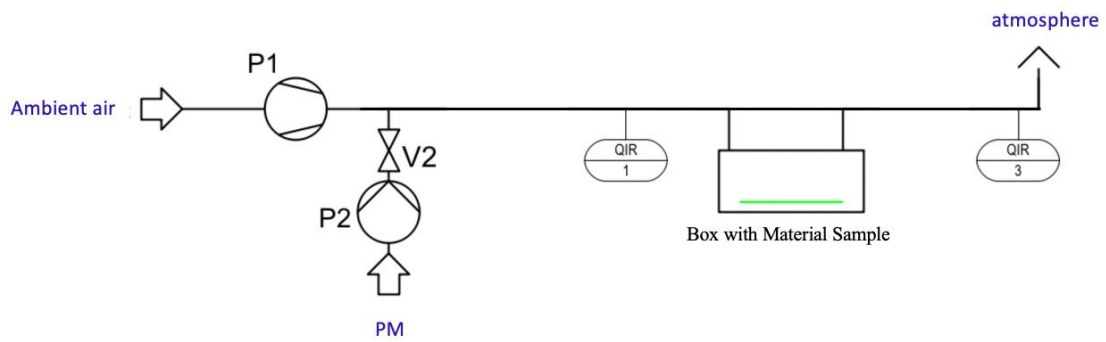


Abbildung 54. Schematische Darstellung der Bewertung der PM-Reduktion.) (Bild: Solga)

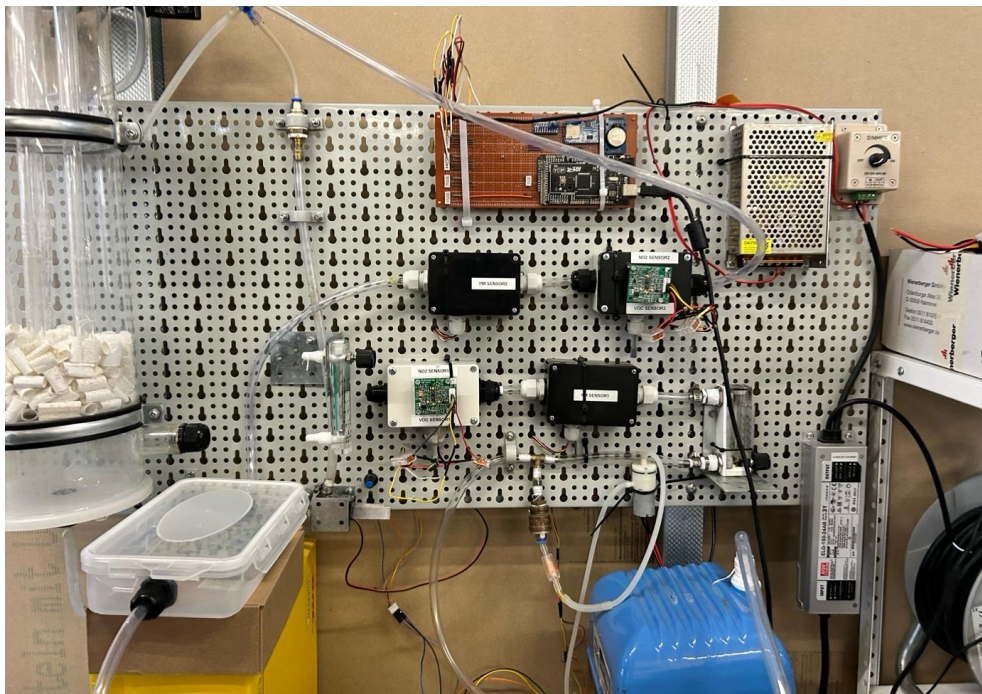


Abbildung 55. Fotografische Ansicht des Versuchsaufbaus. Die PM-Sensoren wurden aus Gründen der Stabilität und der einfachen Konfiguration auf einer Stecktafel montiert (Bild: Solga)

Die Auswertung der Schadstoffbindung über die Differenzbildung der Konzentration von Feinstaubpartikeln der Größen PM1, PM2,5 und PM10 zeigt ein sehr inhomogenes Bild und zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Parallelproben (Abbildung 56). Die getesteten Proben sind im Allgemeinen etwas effizienter bei der Reduzierung der Partikelgrößen PM1- und PM2,5, reduzieren aber auch die größeren PM10-Partikel. Die Tatsache, dass die bis zum Ende der Bewitterung stabilen Biofilme auf den Substraten UHPC und Calciumsilikat sich im Vergleich zu den anderen Proben nicht durch eine deutlich erhöhte Schadstoffbindung auszeichnen, ist nicht plausibel und könnte an der horizontalen Lagerung der Proben liegen, in der die Adhäsion an die hydrophile Oberfläche eventuell von untergeordneter Bedeutung ist. Hier sind weitere Prüfungen erforderlich.

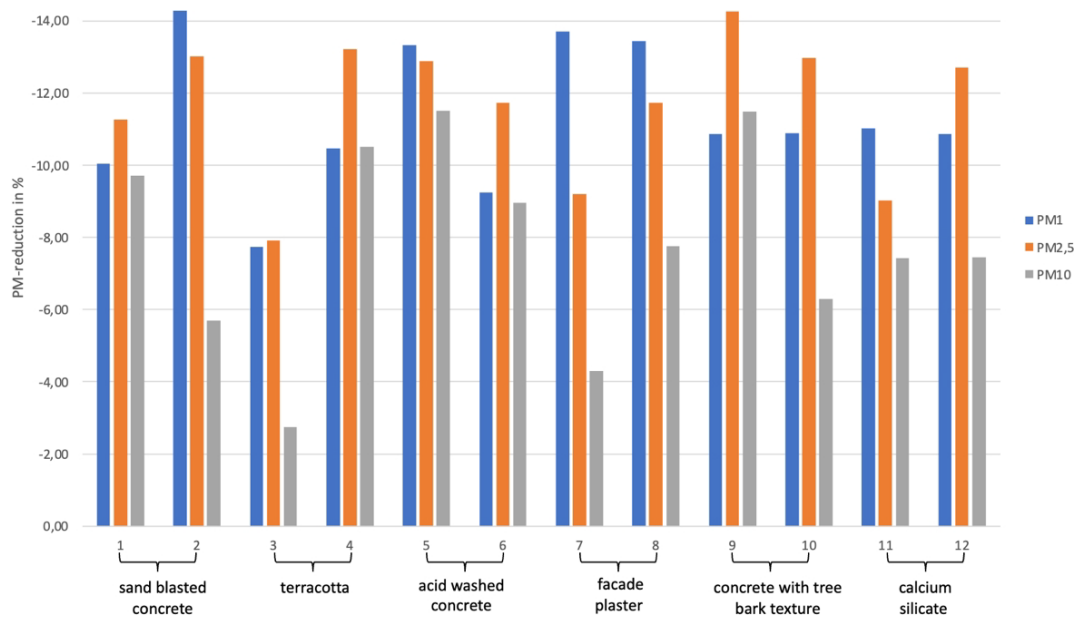


Abbildung 56. Reduktion der Feinstaubpartikel der Größen PM 1, PM 3 und PM 10 nach Passieren der Prüfkammer. Die Messung erfolgte nach Abschluss der Bewitterung im Freien. (Bild: Solga)

### Versuche und Simulationsrechnungen zur Quantifizierung der Verdunstungskühle wassergesättigter Substrate (BAM)

Analog zu Fassadenbegrünungen auf textilen Substraten (Abbildung 57) ist auch bei den Biofilmfassaden ein erheblicher Einfluss des Substrats auf das Wasserrückhaltevermögen und damit auf die Produktion von Verdunstungskühle zu erwarten. Da es bis zum Ende nicht gelungen ist, stabile Biofilme auf den Oberflächen zu etablieren, wurde in einem ersten Schritt daher zunächst der Einfluss verschiedener Betonsubstrate auf die Verdunstungskühle untersucht.

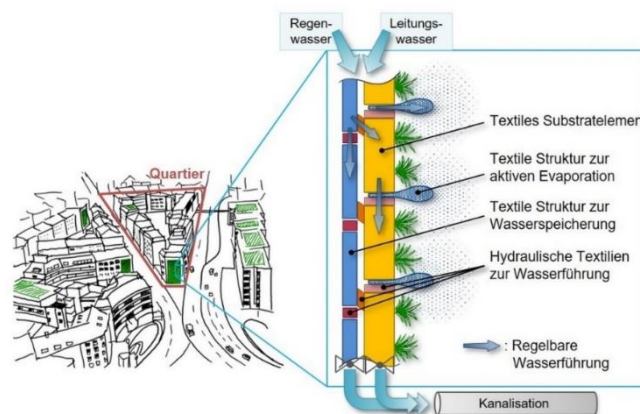


Abbildung 57. Presse-Info des Deutschen Instituts für Textil und Faserforschung vom 30.06.2023: Rain retaining wall verbindet Nachverdichtung mit Hochwasserschutz (Bild: Presse-Info DITF)

### Laborversuch

Die Abkühlung von zuvor wassergesättigten Betonsubstrate durch Verdunstung des im Bauteil gespeicherten Wasser wurde zunächst in einem klimatisierten Labor mit einer Solltemperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchte von 60 % mit Hilfe einer Thermografiekamera über einen Zeitraum von 72 Stunden in einem 5-minütigem Intervall erfasst. Gleichzeitig wurde der Masseverlust protokolliert (Abbildung 58). Um die Drift der Kamera herausrechnen zu können, wurde parallel zur Oberflächentemperatur der Betonplatte die Temperatur einer nicht saugfähigen Referenzplatte aus Kunststoff thermografisch aufgezeichnet. Für den Vergleich der Substrate untereinander wurde jeweils der Mittelwert über die analysierte Fläche herangezogen (Abbildung 59, Abbildung 60).



Abbildung 58. links: Überblick Messaufbau Thermografiekamera, rechts Betonsubstrat und Referenzfläche an Waage befestigt.

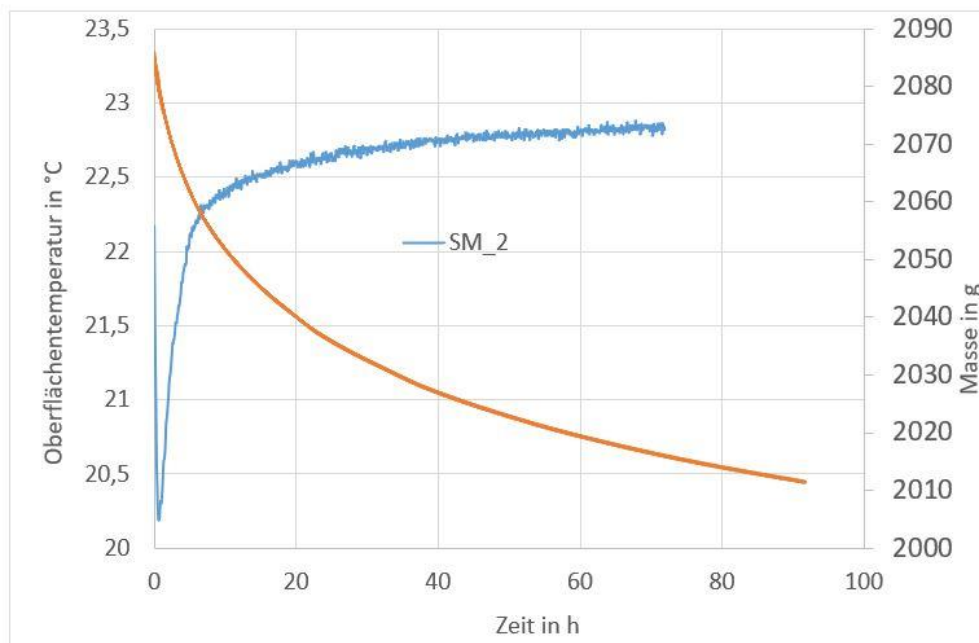
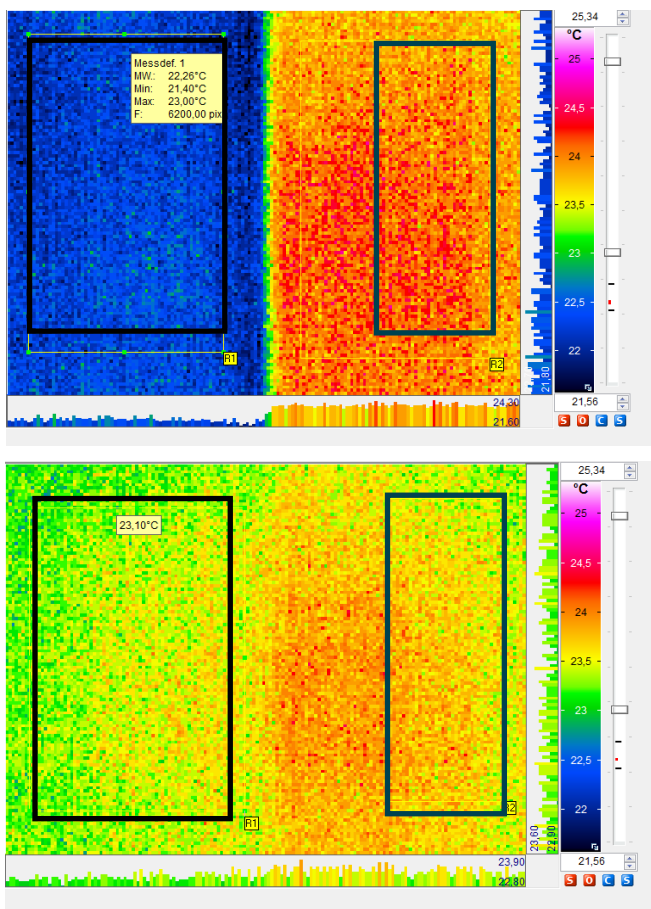


Abbildung 59. Verlauf der Oberflächentemperatur von SM 2 (Mittelwert der analysierten Fläche, Daten driftbereinigt) sowie des Masseverlusts über die Zeit (rote Kurve)





### Zeitpunkt t=0

Mittelwert  $T_{OF}$  Betonsubstrat: 22,26 °C

Mittelwert  $T_{OF}$  Referenz: 23,86 °C

### Zeitpunkt t=8,3 h

Mittelwert  $T_{OF}$  Betonsubstrat: 23,42 °C

Mittelwert  $T_{OF}$  Referenz: 23,67 °C

Abbildung 60. Thermografieaufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Messung (links Betonsubstrat SM 2, rechts Referenz aus Kunststoff)

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Oberflächentemperatur des Betonsubstrats innerhalb der 1 h der Messung um 2°C abfällt und dann innerhalb der darauffolgenden Stunden wieder schnell ansteigt. Nach circa 3-4 Stunden verlangsamt sich der Temperaturanstieg rapide und fällt im Verlauf der weiteren Messung noch weiter ab. Nach 72 Stunden liegen immer noch keine stationären Verhältnisse vor, sondern die Oberflächentemperatur steigt weiterhin sehr langsam an. Die Kurve für den Masseverlust über die Zeit setzt sich ebenfalls aus Abschnitten mit unterschiedlicher Steigung zusammen. Der Steilst Abfall ist hier in den 17 Stunden zu verzeichnen. Nach ca. 25 Stunden ist eine weitere Reduzierung des Tempos festzustellen.

Verglichen mit den Literaturwerten (Zhao et al., 2020; Janetti & Hansen, 2020) lässt sich kein Abschnitt erkennen, in dem die Oberflächentemperatur über einen längeren Zeitraum konstant auf dem Minimalwert verweilt und der mit dem ersten Trocknungsabschnitt (konstanter Kapillartransport zur Oberfläche) in Verbindung gebracht wird. Dies ist vielleicht mit der Trocknung über beide Oberflächen und der geringen Bauteildicke der Substrate zu erklären.

Der Masseverlust über die ersten 72h (Abbildung 61) nach der Sättigung zeigt für das im Vergleich etwas dickere Substrat aus ILB den größten Wert (111 kg/m<sup>2</sup>) und für die UHPC-Proben die geringsten Werte (18-29 kg/m<sup>2</sup>), wobei die Reihenfolge der UHPC-Proben plausibel ist. Im Vergleich zur ungestörten Oberfläche blanko haben die Oberfläche mit Blähtonpartikeln und die Oberfläche, die durch das Entfernen des Textils aufgeraut wurde, etwas mehr Wasser aufgenommen. Die Unterschiede zwischen den Standardmörteln SM 1 und SM 2 sind dagegen sehr gering. Während die schalungsraue Oberfläche des Substrats mit dem höheren w/z-Wert eine etwas größere Wassermenge aufnimmt, scheint die

Strukturierung der Oberfläche unter den Laborbedingungen ohne forcierte Luftbewegung die Verdunstung eher zu bremsen als zu befördern (Abbildung 61).

Eine Auswertung der Zeiträume, in denen die Oberflächentemperatur durch Verdunstung reduziert wird (Abbildung 62), bestätigt den Zusammenhang zwischen der Abgabe der kapillar aufgenommenen Wassermenge und der dabei entstehenden Verdunstungskühle. Die Unterschiede zwischen den Substraten, insbesondere zwischen den Standardmörtel S1 und S2, sind in dieser Auswertung jedoch noch deutlicher zu erkennen. Warum die texturierten Oberflächen des Substrats SM2 im Vergleich zur schalungsglatten Oberfläche deutlich geringere Zeiträume von Verdunstungskühle aufweisen, kann aktuell noch nicht zufriedenstellend geklärt werden.

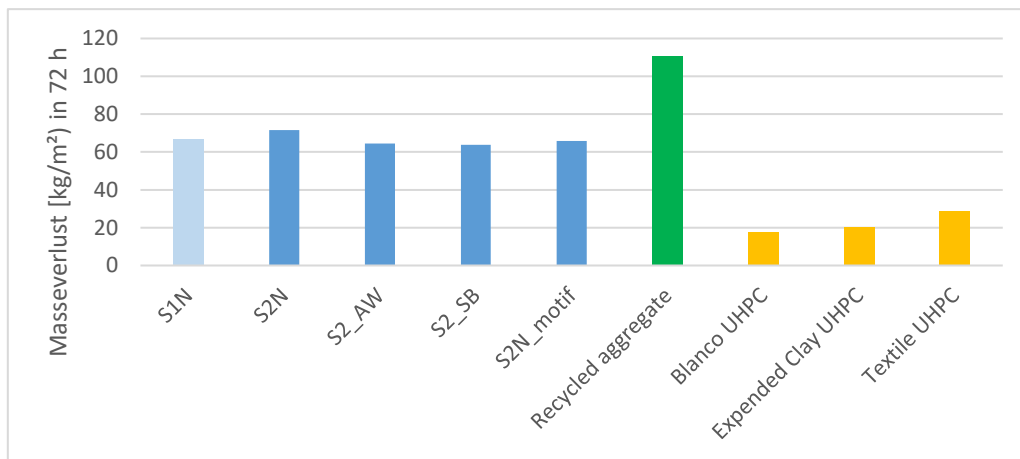


Abbildung 61. Masseverlust der Betonsubstrate über die ersten 72 h nach Sättigung

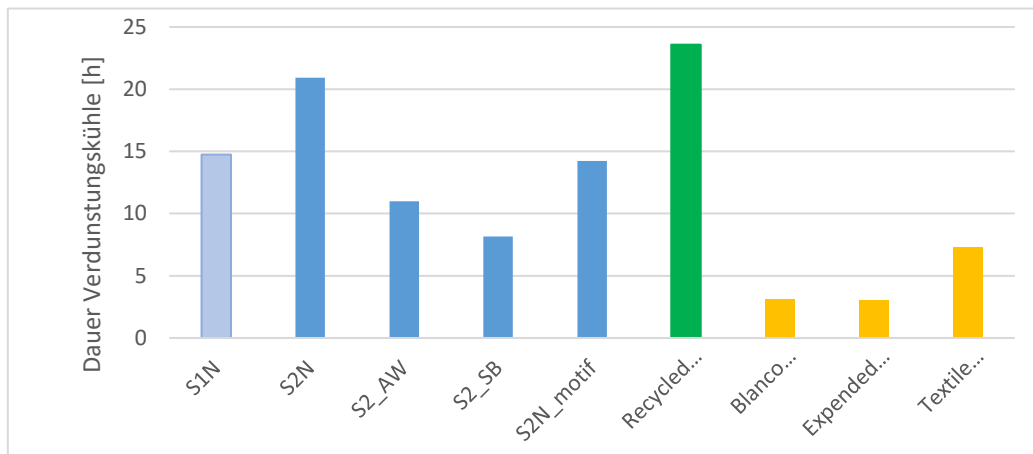


Abbildung 62. Zeiträume der einzelnen Betonsubstrate, in denen die Oberflächentemperatur nach Sättigung durch Verdunstung reduziert wird

### Simulationsrechnungen

Da im Labor nur die Abkühlung unter stationären Randbedingungen erfasst werden kann, wurden zusätzlich Berechnungen mit der Software zur Simulation des gekoppelten, instationären Wärme- und Feuchtetransports durch Bauteile WUFI® des Fraunhofer Instituts für Bauphysik angefertigt.

Dazu wurde ein Wandaufbau bestehend von außen nach innen aus den folgenden Komponenten der Materialdatenbank gewählt.

0,04 m	Beton-Fassadenplatte
0,001 m	wasserdichte Folie
0,12 m	Dämmschicht aus Expandiertem Polystyrol (EPS)
0,20 m	Tragfähiger Beton C35/45
0,005 m	Mineralischer Innenputz

Um eine kontinuierliche Bewässerung des Systems bis zur Sättigungsfeuchte der Betonfassadenplatte zu simulieren, wurde eine konstante, ausreichende Feuchtequelle von  $0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}$  angesetzt und der Quellwert auf die freie Wassersättigung der Bauteilschicht begrenzt (Abbildung 63).

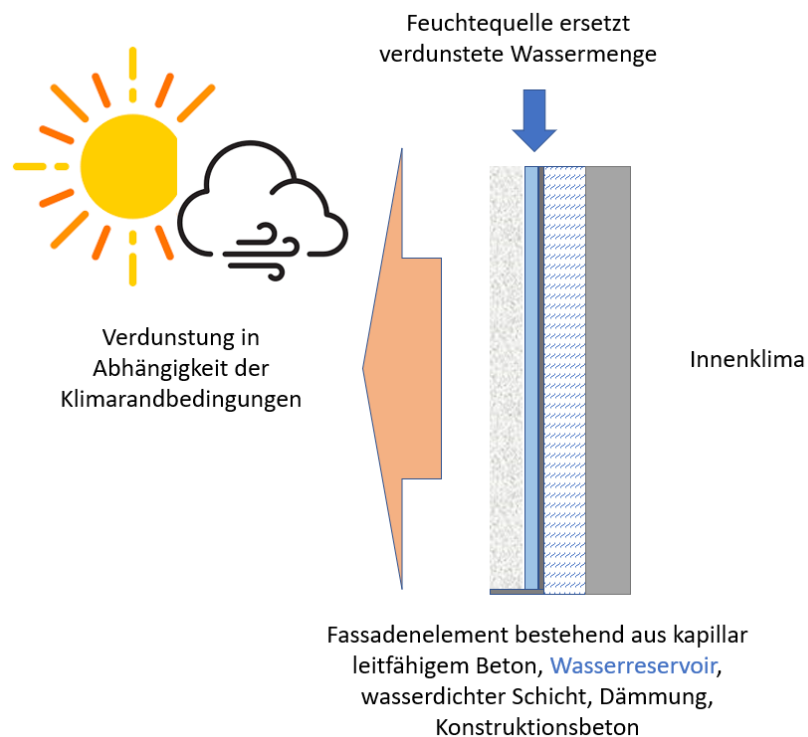


Abbildung 63. Systematik der mit WUFI® berechneten Konstruktion, Quelle BAM

Als Klimarandbedingungen wurden eine nördliche Ausrichtung und ein in der Software hinterlegter realer Datensatz aus Holzkirchen (Fraunhofer-IBP; Jahr 1991) gewählt. Die Klimarandbedingungen innen wurden aus den Wetterdaten nach EN 15026 abgeleitet, wobei der Fall "Mittlere Feuchtelast+5%" zu Grunde gelegt wurde.

Mit Hilfe des Programms kann die Feuchtestromdichte durch die Außenoberfläche berechnet und somit quantifiziert werden, wieviel Wasser pro  $m^2$  Fassadenfläche bei optimaler Beregnung und stets gesättigtem Substrat verdunstet werden kann. Weiterhin kann die Oberflächentemperatur der Außenoberfläche ausgewertet werden und für verschiedene Substrate quantifiziert werden, um wieviel Grad die Oberfläche im Vergleich zu einer nicht zusätzlich befeuchteten Referenzfläche abgesenkt werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass auf Basis des in der Datenbank hinterlegten Werts für einen Beton mit einem  $w/z$  -Wert von 0,5 in den Sommermonaten eine Abkühlung der Fassadenoberfläche von bis zu  $4\text{ }^\circ\text{C}$  durch die Befeuchtung erreicht wird (Abbildung 64).

Im Zeitraum vom 01.06 bis 30.09 beträgt der Feuchtestrom über die Außenoberfläche für das bewässerte Substrat aufsummiert circa  $130\text{ kg/m}^2$ , während für die Referenz so gut wie kein Feuchtestrom berechnet wird (Abbildung 65).

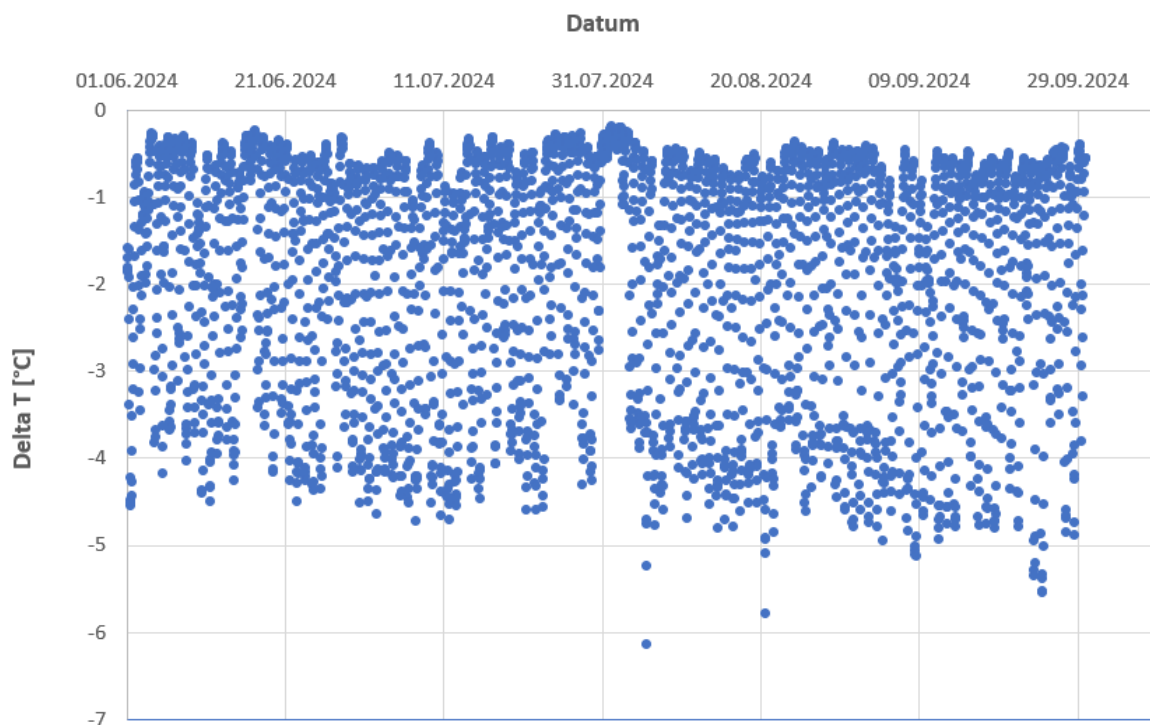


Abbildung 64. Differenz der Oberflächentemperatur zwischen Referenz und bewässertem Substrat über den Zeitraum 01.06. bis 30.09.23; Quelle: BAM

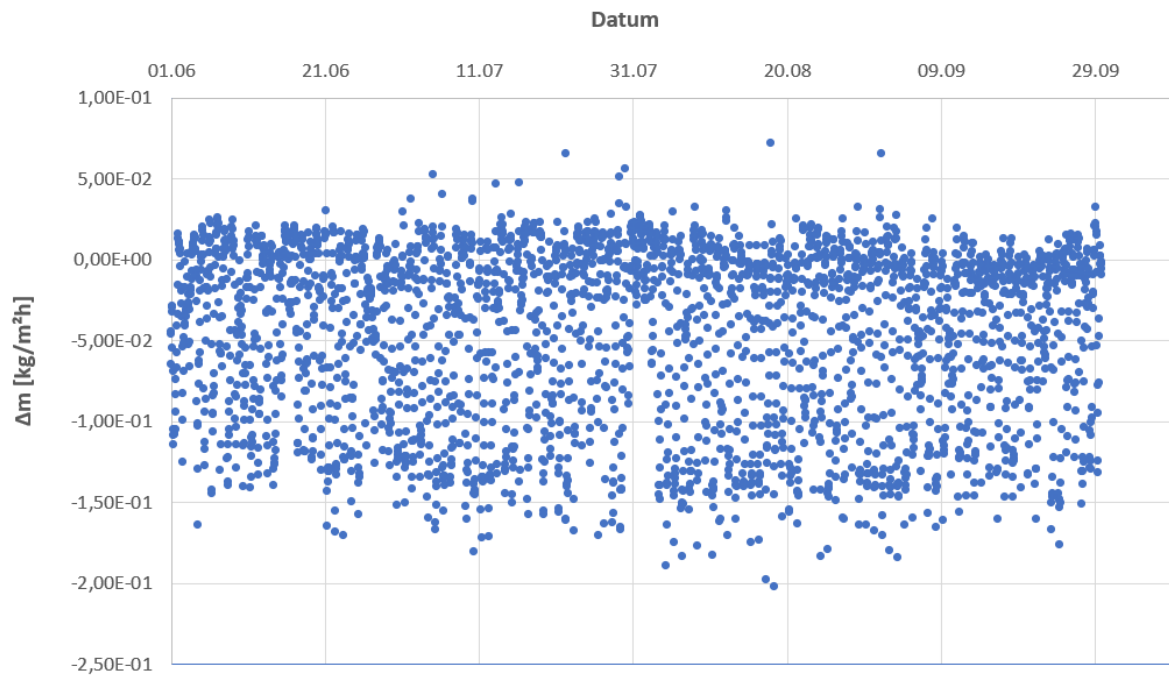


Abbildung 65. Differenz des Feuchtestroms über die Außenoberfläche zwischen Referenz und bewässertem Substrat über den Zeitraum 01.06. bis 30.09.23, Quelle: BAM

## Biodiversitätsanalyse

Mikroorganismen stellen 70 % der Biomasse auf unserem Planeten. Indem sie organisches Material abbauen und Nährstoffe freisetzen, sind sie von zentraler Bedeutung für den Kohlenstoff-, Stickstoff- und Schwefelkreislauf der Natur. Auch der Mensch macht sich die vielfältigen StoffwechsellLeistungen von Bakterien, Pilzen, Algen, Archaeen und Protozoen zunutze. Unter anderem finden sie Anwendung bei der Synthese von Aminosäuren, Vitaminen, Proteinen und Naturstoffen für die Produktion von Medikamenten und Lebensmitteln. Auch für die Wasserreinigung und Biogasproduktion werden sie genutzt. Im Rahmen des angestrebten Umstiegs auf nachwachsende Kohlenstoffquellen wird aktuell insbesondere das Potenzial von Mikroorganismen zur autotrophen CO<sub>2</sub>-Fixierung erforscht (Bott, 2020).

Ein Großteil der auf der Erde vorkommenden Mikroorganismen ist bislang nicht untersucht. Mit Hilfe von Data-Mining-Methoden und künstlicher Intelligenz (KI) versucht man die heute verfügbaren DNA- und RNA-Sequenzierungsdaten zu analysieren, und die Bedeutung der "mikrobiellen dunklen Materie" weiter zu entschlüsseln. Ein besseres Verständnis der Stoffwechsel-Fähigkeiten dieser Organismen und der räumlich-zeitlichen dynamischen Muster innerhalb der mikrobiellen Gemeinschaften, kann für neue biotechnologische Verfahren von entscheidender Bedeutung sein ([58]). Die Biodiversität ist durch die wachsende Urbanisierung und Landwirtschaft, die Umweltverschmutzung und den Klimawandel zunehmend bedroht. Auch in Bezug auf die nicht mit bloßem Auge sichtbaren Mikroorganismen ist sie von zentraler Bedeutung für das Überleben der Menschen.

Es ist mittlerweile bekannt, dass Gärten und Grünflächen insbesondere in Städten durch die Verwendung fremder Zierarten und die intensive Pflege im Vergleich zu natürlichen Flächen oft ökologisch sehr karg sind. Ein neues Bewusstsein über die Auswirkungen der anthropogenen Aktivitäten auf unseren Planeten und über die regulierenden Eigenschaften der Natur auf die Umwelt führt zu neuen Ansätzen in der Stadtgestaltung. Durch die gezielte Stärkung der Koexistenz und Zusammenarbeit zwischen den einheimischen Pflanzen und Wildtieren soll die Resilienz der Städte und die Diversifizierung und Evolution gefördert werden [59]. Die Stadt Singapur nimmt seit Jahrzehnten eine Vorreiterrolle in der Begrünung von Städten ein. Ihre Vision ist es, sich durch eine gezielte Erhöhung der Biodiversität von einer "Stadt in einem Garten" zu einer "Stadt in der Natur" zu entwickeln [60].

Unterschiedliche Mikroorganismen gedeihen unter verschiedenen klimatischen Randbedingungen und bevorzugen unterschiedliche Substrate. Für Biofilme in Abwasseraufbereitungsanlagen wurde nachgewiesen, dass sich dickere Biofilme durch ein größeres Artenspektrum auszeichnen und höhere Biotransformationsraten aufweisen [61]. Für Fassaden mit Wärmedämm-verbundsystemen ergab eine Untersuchung an 3 Wohngebäuden in Lissabon, dass die Diversität primär von der Lage der Objekte und der Ausrichtung der Fassaden und weniger von der Materialzusammensetzung abhängt [62]. Da die Resistenz von Mikroorganismen gegenüber Bioziden artspezifisch ist [63], sind Biofilme auf biozidhaltigen Oberflächen stark abhängig von der Zusammensetzung und Dosis der verwendeten Mittel.

Um zu analysieren, inwieweit Betonalter, Substrateigenschaften und die äußeren klimatischen Randbedingungen die Organismenzusammensetzung natürlicher Biofilme beeinflussen, wurden im Rahmen des Vorhabens erste genetische Analysen zur Biodiversität verschiedener Biofilme auf Betonoberflächen unterschiedlichen Alters in Abhängigkeit der Ausrichtung durchgeführt. Bei dem ältesten Objekt handelt es sich um das 1981 fertiggestellte Zentrale Tierlaboratorium der Freien Universität Berlin, das unter dem Begriff "Mäusebunker" bekannt ist und an der Ost-, West und Nordseite eine vorgehängte Fassade aus Betonfassadenelementen aufweist. Die geeigneten Flächen sind in unterschiedlicher Ausprägung mit einem Biofilm versehen (Abbildung 66). Auf dem Stammgelände der BAM in Berlin-Lichterfelde wurden weiterhin Proben aus verschiedenen Bereichen einer 2012 errichteten Betonrampe sowie dem Sockelbereich eines 2015 errichteten Witterungsstands (Abbildung 67) analysiert. Zuletzt wurden einzelne Oberflächen von einem zweiten Witterungsstand beprobt, die maximal erst 2 Jahre ausgelagert sind (Abbildung 68).

Um die Ergebnisse in einen größeren Zusammenhang stellen zu können, wurden auch Biofilmproben von anderen Substratoberflächen entnommen (Kunststoffoberfläche auf Witterungsstand I, WDVS-Oberfläche von Witterungsstand II (Tabelle 12). Zusätzlich wurden ausgewählte Proben mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht.

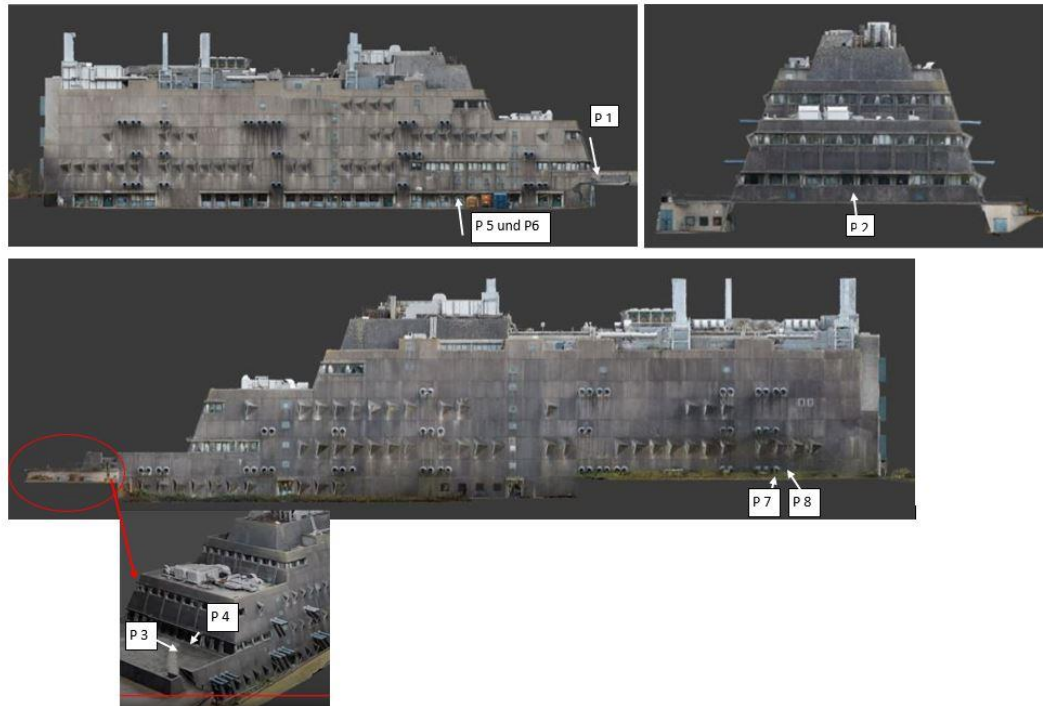


Abbildung 66. Probennahme P1-8 Mäusebunker (oben links: Ostfassade, oben rechts: Nordfassade, unten Westfassade); Quelle der Ansichten aus virtuellem Modell von Alexis Dworski, [https://www.alexisdworsky.de/3d-maeusebunker\\_dworsky.pdf](https://www.alexisdworsky.de/3d-maeusebunker_dworsky.pdf)



Abbildung 67. Probennahme auf dem Stammgelände, links Betonrampe (P9-12), rechts Witterungsstand I (P14-17)

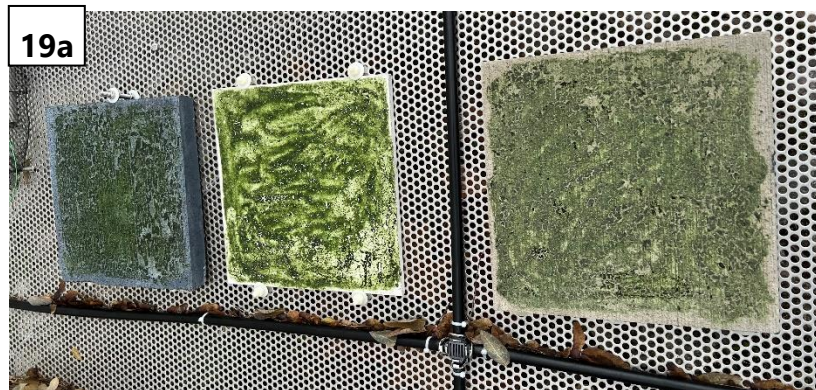
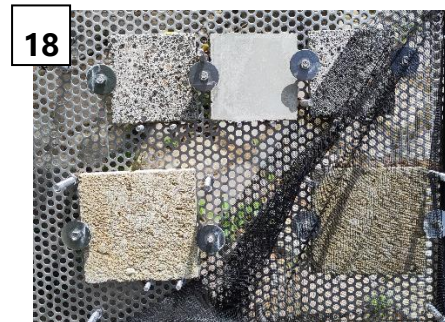
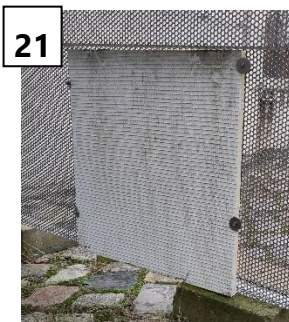
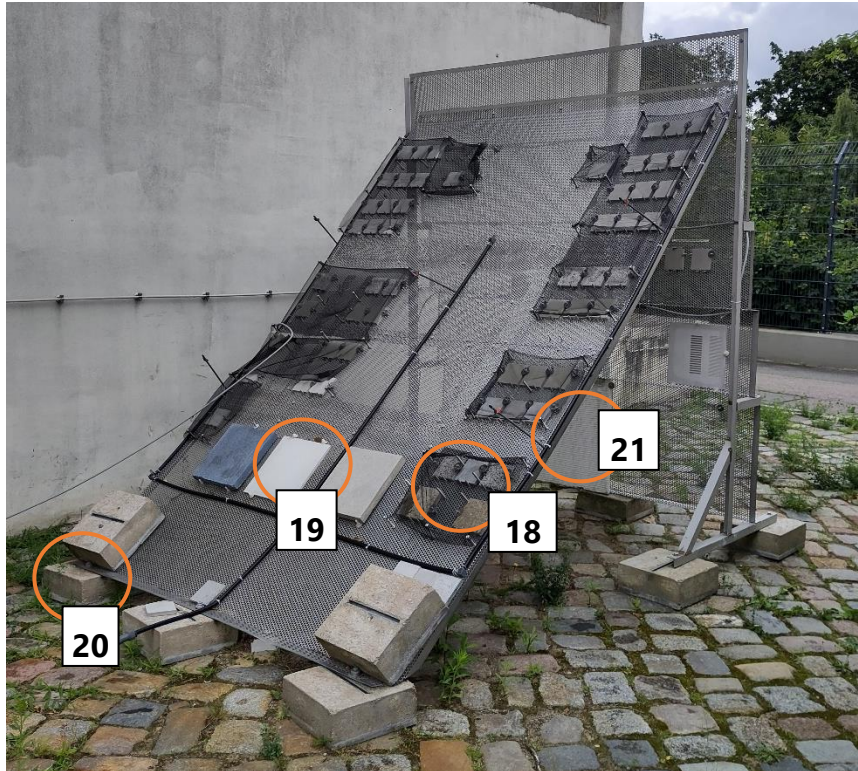


Abbildung 68. Witterungsstand II auf dem BAM Stammgelände mit Markierung der Probenahmen 18-21  
 Bild 19a: Zustand der von Solaga beimpften Prüfkörper am 14.12.24 (ca. 3 Wochen vor Probenahme)



### *Methodik*

Von den optisch verfärbten Bereichen der Betonoberflächen wurde mit einem sterilen Probenentnahme-Kit bestehend aus einem Wattestäbchen und einem Kunststoffröhrchen mit Pufferlösung etwas Material abgenommen (Abbildung 67, rechts). Aus jedem Bereich wurden 3 Parallelproben entnommen und nach der Probennahme direkt gekühlt. Im Labor wurde aus den Proben die DNA extrahiert und für Bakterien/Archaeen (16S rRNA), Pilze (ITS Region) und Eukaryoten (18S rRNA) spezifische DNA-Abschnitte vervielfältigt (Amplifikation). Zwischen den Zielgenen für die Pilze und Eukaryoten gibt es dabei naturgemäß Überschneidungen. Die amplifizierten DNA-Bereiche werden sequenziert, um die genetische Information zu entschlüsseln. Über die Reihenfolge der Nukleinbasen kann eine Zuordnung in die hierarchisch geordneten biologischen Kategorien erfolgen, wobei die verwendete Sequenzierungstiefe, die Anzahl der Analysen jedes Zielgens beschreibt und eine Bestimmung der Organismen bis auf den Rang der Gattung erlaubt.

Die Taxonomie der detektierten Organismen wird über Sankey-Diagramme visualisiert. Zusätzlich werden in den Bubbleplots getrennt nach Eukaryoten und Prokaryoten (Abbildung X) alle Familien dargestellt, die mindestens mit einer relativen Abundanz von 0,2 Prozent auftreten.

Die sequenzierten Daten wurden weiterhin bioinformatisch analysiert, um die genetische Diversität der Organismen im Biofilm mit Hilfe verschiedener Diversitätsindizes zu beschreiben. Die Diversität beschreibt die Zusammensetzung der Spezies in der Mischpopulation.

Klassischerweise wird die „Alpha Diversität“ als Maß für die Komplexität einer Probe benutzt. Dabei gibt es verschiedene Maße. „Observed“ bezieht sich auf die Anzahl der detektierten Arten, bzw. Sequenzen (Abundanz). „Chao“ bezieht neben der Anzahl der Arten auch die Zahl der Individuen der einzelnen Arten/Sequenzen (Abundanz) mit ein.

Um strukturelle Ähnlichkeiten oder Unterschiede zwischen den verschiedenen Zusammensetzungen der Biofilme besser zu verstehen, wurde weiterhin die Beta Diversitätsanalyse oder auch Principal Coordinates Analysis (PCoA) verwendet. Mit dieser statistischen Methode können komplexe biologische Daten in einem 2D-Diagramm dargestellt werden.

Tabelle 12.

Übersicht Probeentnahmestellen für Biodiversitätsanalyse  
Referenzproben sind kursive dargestellt

<b>MÄUSEBUNKER</b>		
<b>Probe Nr</b>	<b>Alter (Jahren)</b>	<b>Entnahmestelle</b>
1	ca. 45	<b>Ostfassade</b> / Ecke Nord auf Terrassenebene, in 1,50 m Höhe (schräg gemessen)
2	ca. 45	<b>Nordfassade</b> , auf Ebene Terrassenumgang, mittig, in 1,50 m Höhe (schräg gemessen)
3	ca. 45	<b>Westfassade</b> , Wandelement vor Treppenaufgang, in 1,50 m Höhe (schräg gemessen)
4	ca. 45	<b>Westfassade</b> Treppenaufgang (schräge Fläche)
5	ca. 45	<b>Ostfassade</b> , unter Rohr, Höhe: 1.50 m
6	ca. 45	<b>Ostfassade</b> , neben Rohr Höhe: 1.50 m
7	ca. 45	<b>Westfassade</b> , Nordende, 1.Rohr von Norden gezählt, unter dem Rohr
8	ca. 45	<b>Westfassade</b> , Nordende, 1.Rohr von Norden gezählt, neben dem Rohr, in 1,50 m Höhe
<b>STAMMGELÄNDE / BAM</b>		
9	ca. 12	<b>Rampe</b> Übergang Haus 1/Haus 20, Vorderseite (Ausrichtung <b>NO</b> ), oben
10	ca. 12	<b>Rampe</b> Übergang Haus 1/Haus 20, Vorderseite (Ausrichtung <b>NO</b> ), unten
11	ca. 12	<b>Rampe</b> Übergang Haus 1/Haus 20, Rückseite (Ausrichtung <b>SO</b> ), mittig
12	ca. 12	<b>Rampe</b> Übergang Haus 1/Haus 20, Seitenfläche (Ausrichtung <b>NW</b> ), mittig
13	ca. 9	<b>Witterungsstand 7.6, Kunststoff</b> , schräge Fläche, Ausrichtung <b>NW</b>
14	ca. 9	<b>Witterungsstand 7.6</b> , Ausrichtung <b>SW</b> , "Parallelproben": 1 oben, 2 Mitte, 3 unten
15	ca. 9	<b>Witterungsstand 7.6</b> , Ausrichtung <b>NO</b> , oben
16	ca. 9	<b>Witterungsstand 7.6</b> , Ausrichtung <b>NO</b> , unten
17	ca. 9	<b>Witterungsstand 7.6</b> , Ausrichtung <b>NO</b> , Mitte
18	ca. 1	Probe Altbeton aus Stand, links, Ausrichtung <b>NW, Mitte, 45 °</b>
19	ca 2 <b>Wochen</b>	<b>PK beimpft durch Solaga S2 (hell)</b> , <b>NW, Mitte, 45</b>
20	ca. 2	Probe Altbeton Betonblock, <b>NW, unten, vertikal</b>
21	ca. 4	<b>"WDVS"</b> aus Wismar, <b>NW, oben, vertikal</b>

## Ergebnisse

Die Taxonomie der auf den beprobten Oberflächen detektierten Organismen wird durch Sankey-Diagramme abgebildet und zeigt die Komplexität und die Artenvielfalt der untersuchten Biofilme. Von den drei existierenden Domänen Archaeobakterien, Bakterien und Eukaryoten sind nur die Archaeobakterien nicht vertreten. Archaea und Bakterien sind Prokaryoten ohne Zellkern; Eukaryoten dagegen Lebewesen, deren Zellen einen echten Kern und eine reiche Kompartimentierung haben. Nur diese Domäne umfasst mehrzellige Organismen.

Die Eukaryoten lassen sich wiederum in elf Reiche einteilen, wobei die zahlenmäßig größten Gruppen den Viridiplantae und den Pilzen zuzuordnen sind. Die Viridiplantae bestehen wiederum aus den Stämmen der Grünalgen (Chlorophyta) und den Armleuchteralgen und Landpflanzen (Streptophyta), die jeweils wieder nach Klasse, Ordnung, Familie und Gattung weiter unterteilt werden können (Abbildung 69). Die Tatsache, dass es bei den Eukaryoten mehr nicht klassifizierte Sequenzen/Arten gibt, spiegelt sich in der relativ großen Anzahl an Unklassifizierten in der Gruppe „Others“ in den Bubbleplots. Die Auswertung verdeutlicht, dass viele Pilzfamilien, wenn auch einzeln in recht niedriger Abundanz, detektiert wurden. Die Algen der Familien Stichococcaceae (mit *Stichococcus* und *Diplosphaera*), Klebsormidiaceae und Trebouxioophyceae sind teilweise sehr häufig, wobei die Algen der Familie Klebsormidium auf einigen Substraten sehr stark vertreten sind und auf anderen Oberflächen dagegen in deutlich geringerer Häufigkeit auftreten. Dies gilt sowohl für die Beprobung des Mäusebunkers als auch die auf dem Stammgelände der BAM beprobten Oberflächen.

Deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung des Biofilms ergeben sich für die von Solaga beimpfte Probe (P19) und das WDVS (P 21). Auch die erst seit kurzem bewitterten „Alt“betonproben (18,20) weisen einige Familien exklusiv auf ihren Oberflächen auf.

Beide Testorganismen, die für den Modell-Biofilm ausgewählt wurden, finden sich auch in den analysierten Biofilmen

- Jaaglichlorella, die zur Klasse der Trebouxia und zum Stamm der Grünalgen zählt sowie
- die Pilzgattung Knufia, die zur Klasse der Eurotiomycetes und zum Stamm der Ascomycota (Schlauchpilze) gehört.

Bei den Prokaryoten sind innerhalb des Gesamtdatensatzes die auf der Ebene der Gattung bestimmbaren Bakterien mit der größten Anzahl.

- Hymenobacter, eine unbewegliche Gattung aus der Familie der Hymenobacteraceae und der Ordnung der Cytophagales und
- Spirosoma, obligat aerobe, meist gekrümmte, unbewegliche Bakterien, die aus dem Boden und aus Süßwasser isoliert wurden. Sie gehören zur Familie der Flexibacteraceae und ebenfalls zur Ordnung der Cytophagales

Die Bakterien der Ordnung Cytophagales kommen in sehr verschiedenen Umgebungen vor und nehmen unterschiedliche ökologische Rolle wahr. In terrestrischen Systemen findet man sie in Böden mit neutralem oder nahezu neutralem pH-Wert, in Humus und in tierischen Ausscheidungen. Die Ordnung spielt eine Schlüsselrolle bei der Remineralisierung von organischen Stoffen in Mikronährstoffe.

Auch die Bubbleplots zu den Eukaryoten (18S-Daten; Abbildung 70) verdeutlichen, dass einige Bakterien nur auf bestimmten Oberflächen selektiv aufwachsen. Bei den Beprobungen am Mäusebunker sind die Proben 4 und 8 auffällig, wobei es sich bei der Entnahmestelle 4 im Gegensatz zu allen anderen Proben um einen Treppenaufgang handelt. Bei den auf dem Stammgelände beprobten Flächen fallen wie bereits bei den Eukaryoten die Referenzen Kunststoff (P 13) und WDVS (P21) sowie die von Solaga beimpfte Probe (P 21) durch eine andere Zusammensetzung in den Familien auf. Auch die erst vor kurzer Zeit exponierten Betonoberflächen weisen einige Familien in deutlich höherer Abundanz und andere auf den länger exponierten Substraten in großer Abundanz vertretenen Familien dafür gar nicht auf.

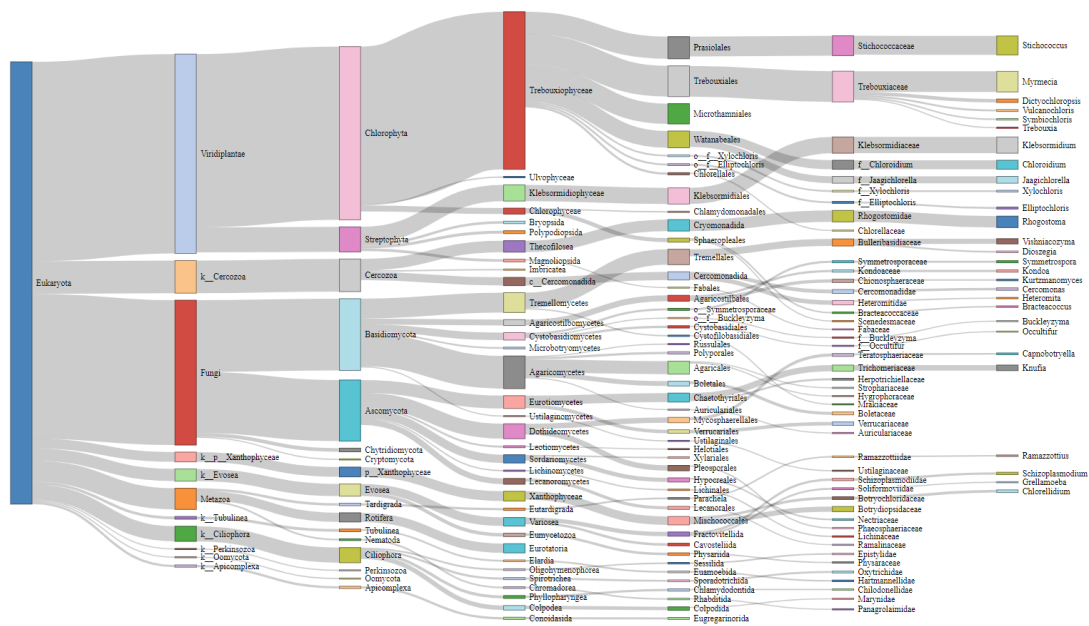


Abbildung 69. Unterteilung der Domäne der Eukaryoten von links nach rechts in Reich, Stamm (Abteilung), Klasse, Ordnung, Familie und Gattung

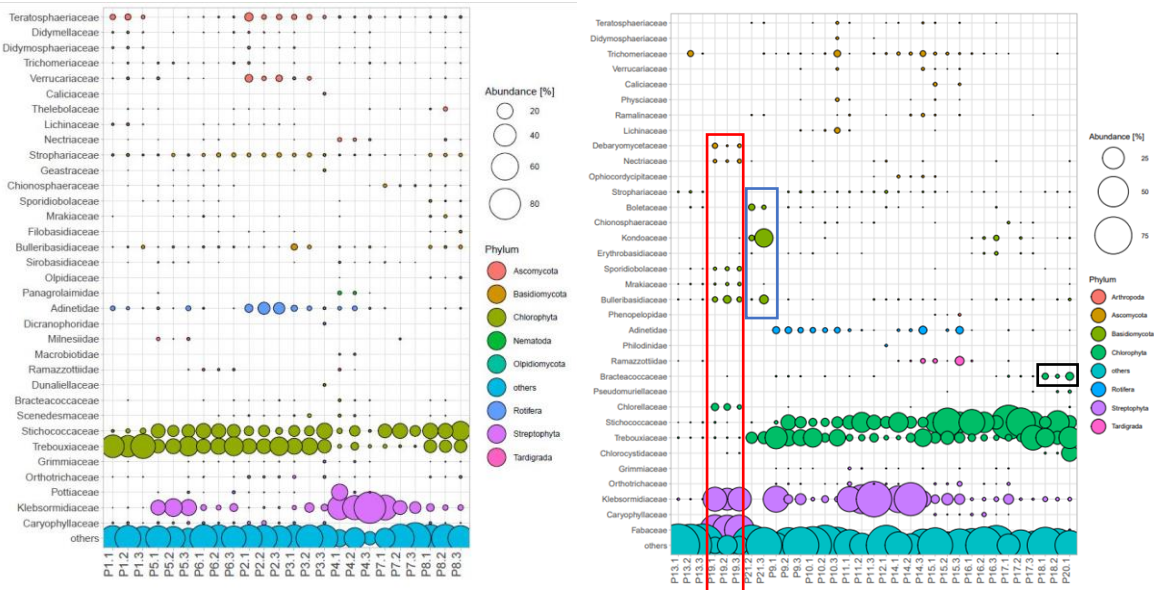


Abbildung 70. Bubbleplot der Eukaryoten (18 S-Daten) auf dem Level der Familien, gefärbt und sortiert nach Stämmen. Die Größe der Bubble zeigt die relative Häufigkeit innerhalb der Probe, links Proben Mäusebunker, rechts Proben BAM-Gelände (rotes Kästchen: Probe 19, beimpft mit Klebsormidium von Solaga, blaues Kästchen: Probe 21: WDVS)

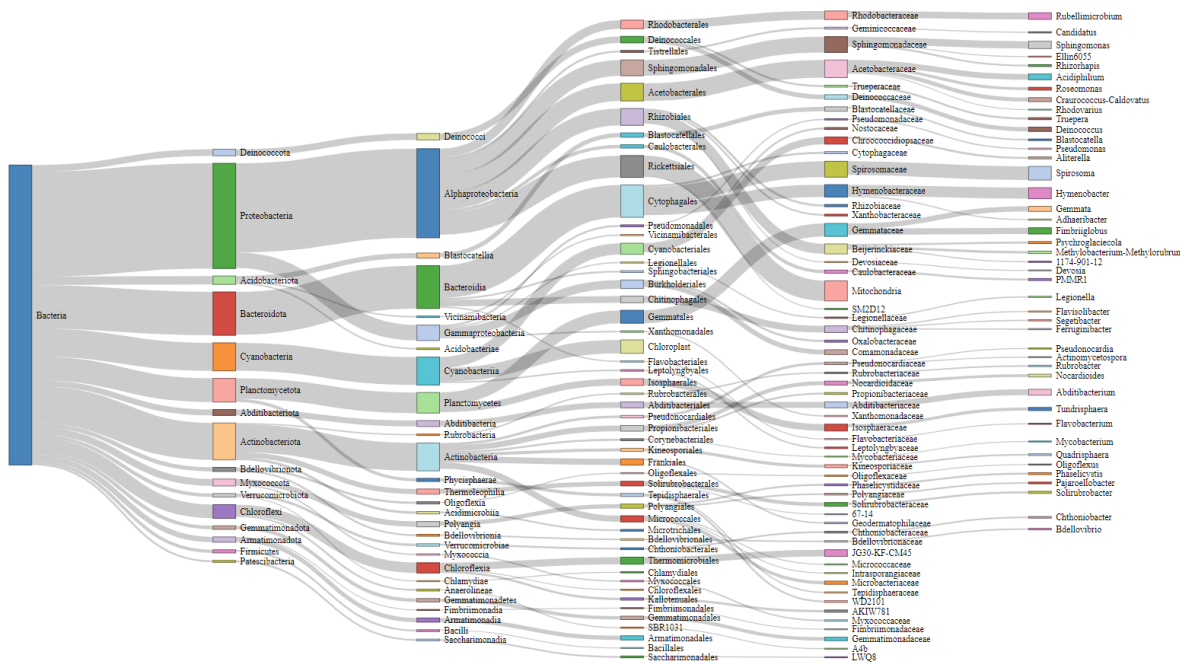


Abbildung 71. Unterteilung der Domäne der Prokaryoten von links nach rechts in Reich, Stamm (Abteilung), Klasse, Ordnung, Familie und Gattung

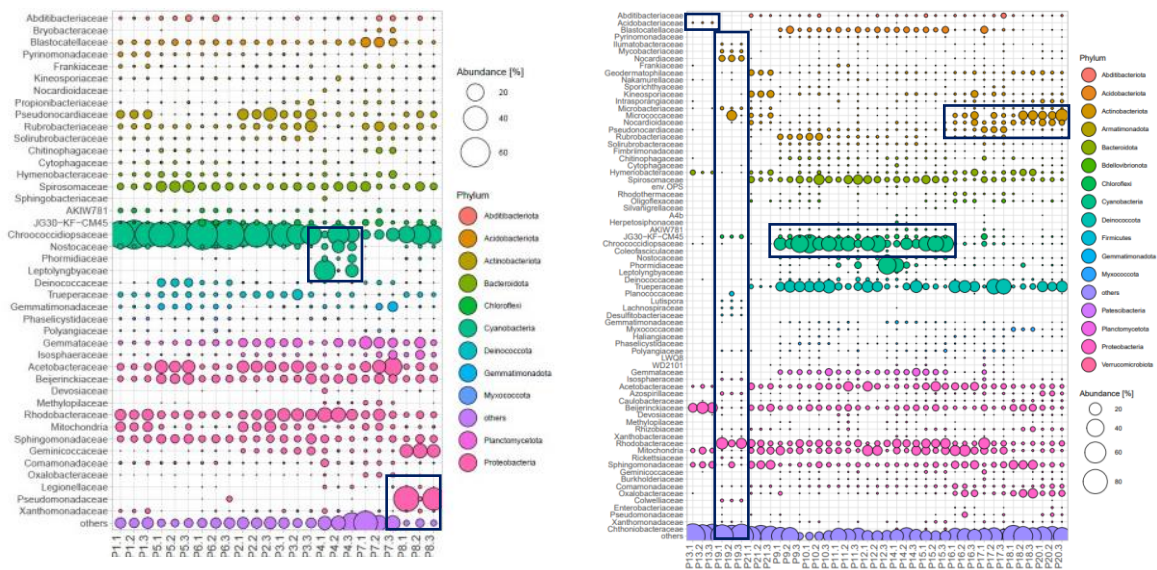


Abbildung 72. Bubbleplot der Prokaryoten (16 S-Daten) auf dem Level der Familien, gefärbt und sortiert nach Stämmen. Die Größe der Bubble zeigt die relative Häufigkeit innerhalb der Probe, links Proben Mäusebunker, rechts Proben BAM-Gelände, durch schwarze Kästchen hervorgehoben sind Familien, die selektiv auf ausgewählten Substraten vorkommen

Auch der Vergleich der auf den verschiedenen Oberflächen gefundenen Komplexität zeigt eine Differenzierung nach Standort bzw. Alter der Substrate. Die von den ca. 45 Jahre alten Betonoberflächen des Mäusebunkers entnommenen Proben weisen in der Mehrzahl eine höhere mikrobielle Diversität auf

als die auf dem Stammgelände analysierten Substrate, die größtenteils erst 9 (Rampe) bzw. 11 Jahre (Witterungsstand I) exponiert sind. Weiterhin wird insbesondere bei der Auswertung für die Eukaryoten (18S rRNA) deutlich, dass sich die Betonoberflächen im Vergleich zu den Referenzen aus Kunststoff und WDVS durch eine größere Artenvielfalt auszeichnen. Auch die Betonoberfläche, auf die vor dem Beginn der Exposition eine nicht sterile Klebsormidiumsuspension durch den Projektpartner Solaga mit einem Pinsel aufgetragen wurde (Probe 19), zeigt eine vergleichsweise geringe Komplexität. Ursächlich kann hier neben der Anfangsbeimpfung mit einer Klebsormidiumkultur, die zur Zeit der Probennahme circa 2 Monate her ist, auch der geringe Zeitraum der Exposition sein. Auch die Betonoberflächen, die am Bewitterungsstand II beprobt wurden, zeigen eine im Vergleich mit den übrigen Proben geringe Biodiversität. Ursächlich ist hier vermutlich die geringe Expositionsdauer von 2 (Probe 20) bzw. 1 (Probe 18) Jahr. Signifikante Unterschiede zwischen der 1 bzw. 2 Jahre bewitterten Probe sind allerdings nicht erkenntlich.

Auch in der Beta-Diversitätsanalyse (PCoA) für die Prokaryoten ist die oben beschriebene Differenzierung nach Standort, Material und Alter zu erkennen (Abbildung 74).

Betrachtet man nur die Datensätze für die am Mäusebunker entnommenen Biofilmproben (Abbildung 75) zeigt sich eine klare Differenzierung der Proben entsprechend der Ausrichtung der Fassadeausrichtung nach Osten, Norden (P2) und Westen. Durch das Clustern der Proben oberhalb (blau eingekreist) und unterhalb der X-Achse (grün eingekreist) wird deutlich, dass die mikrobiellen Gemeinschaften der Bakterien eine Trennung der Ost- (unten: P1, P5, P6) und Westausrichtung (oben, P3, P4, P7, P8) zeigen (Abbildung 75). Die Nordprobe (P2) ähnelt stark P3, was durch ähnlich Bedingungen und lokale Nähe begründet sein könnte. Der Unterschied der mikrobiellen Zusammensetzung zwischen Ost- und Westausrichtung ist mit  $P=0.003$  auch statistisch signifikant.

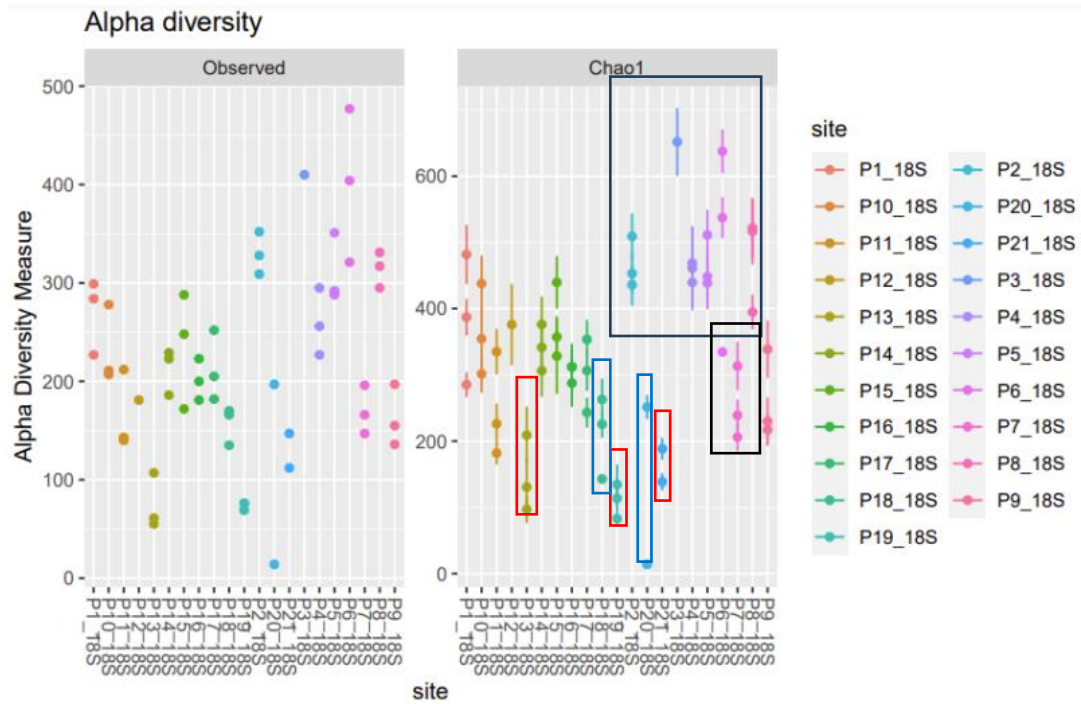


Abbildung 73. Diversität der Proben für die Eukaryoten dargestellt als Alpha Diversität, links "Observed", rechts "Chao" schwarz markiert sind die Proben vom Mäusebunker, rot markiert sind die Referenzen PK 13: Kunststoff, PK 19: Prüfkörper beimpft von Solaga und PK 21: WDVS, blau markiert sind die Betonproben, die erst seit 2 Jahren (PK 20) bzw. seit 1 Jahr (PK 18) exponiert sind



Abbildung 74. Diversität der Proben für die Prokaryoten (16S-Daten) dargestellt als Beta-Diversität (PCoA) rot markiert sind die Referenzen PK 13: Kunststoff, PK 19: Prüfkörper beimpft von Solaga und PK 21: WDVS, blau markiert sind die Betonproben, die erst seit 2 Jahren (PK 20) bzw. seit 1 Jahr (PK 18) exponiert sind.

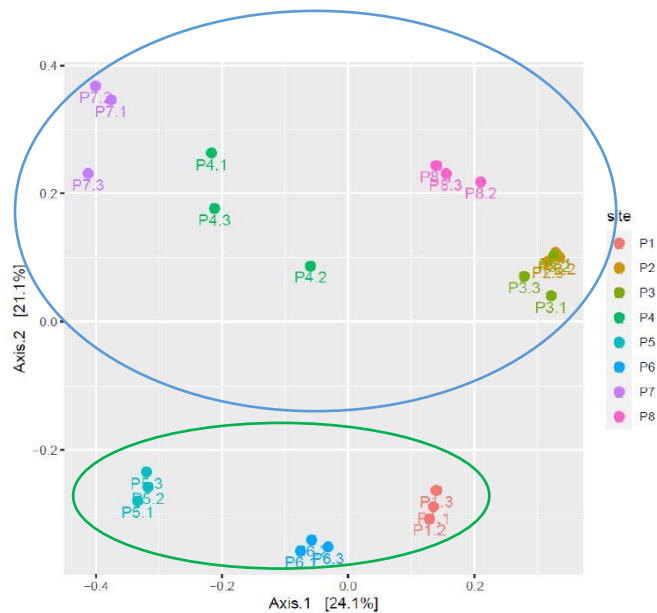


Abbildung 75. Auswertung Datensatz Mäusebunker: Beta-Diversitätsanalyse (PCoA) der mikrobiellen Gemeinschaften der Prokaryoten



### *Ausblick*

Die Ergebnisse zeigen, dass die Biofilme von einer sehr hohen Artenvielfalt gekennzeichnet sind und sich deutliche Unterschiede der Zusammensetzung in Abhängigkeit der Exposition der Oberflächen und der Ausrichtung der Flächen sowie der Substrate erkennen lassen. Einige Organismen wachsen selektiv auf bestimmten Oberflächen wie Kunststoff oder Putz. Viele Familien der Eukaryoten und Bakterien sind jedoch in hoher Anzahl an den beiden untersuchten Standorten und auf fast allen beprobten Substraten zu finden. Die Probe, die mit einer aufkonzentrierten im Labor gezüchteten Kultur von Klebsormidium vor der Exposition beimpft wurde, unterscheidet sich deutlich in ihrer Artenzusammensetzung von den anderen Proben.

Die Auswertung der Artenzusammensetzung nach der Expositionsdauer der Oberflächen bestätigt, dass sich die Biofilme über die Zeit verändern und das Betonalter den größten Effekt auf die Biodiversität hat. Die länger exponierten Flächen weisen eine höhere Komplexität auf als die Oberflächen mit einem geringeren Alter.

Die Analysen zur Diversität der Biofilme zeigen ebenfalls, dass die Komplexität der Organismenzusammensetzung weiterhin abhängig ist vom Standort, der Ausrichtung und dem Substratmaterial. Bei der Ausrichtung wurden die größten Unterschiede zwischen Nordost und Südost identifiziert. Eine Abhängigkeit der Biodiversität in Abhängigkeit der Höherwurde nur für die Eukaryoten festgestellt

Um ein tieferes Verständnis für die Primärbesiedlung sowie die Sukzession zu gewinnen, sollten zukünftig weitere Untersuchungen am selben Substrat über einen längeren Zeitraum erfolgen.

## Ästhetische Bewertung und Workshop zur Gestaltung mit Algenfassaden

Am 23. November 2023 wurde federführend durch die Professur für Sozial- und Gesundheitsbauten der TU Dresden (im Folgenden „SGB“) an der BAM ein Workshop mit dem Titel „ALGEN STATT ALGIZIDE“ durchgeführt an dem 14 Architekt\*innen und Architekturstudierende teilnahmen. Mittels einer Befragung wurde eruiert, dass die Teilnehmer zwischen 5 und 35 Jahren Berufserfahrung aufweisen beziehungsweise sich mindestens im vierten Jahr ihres Architekturstudiums befinden.

Die ganztägige Veranstaltung begann mit einer einleitenden Projektvorstellung seitens der BAM und einem Überblick zur Verwendung von Algen in der Architektur vorgetragen von der SGB. Anschließend wurden mittels Fragebogen erste ästhetische Beurteilungen vorgenommen sowie allgemeine Gestaltungsansätze für Algenbiofilm Fassaden entwickelt. Nachmittags wurden in Teil 2 konkrete Entwurfsideen entwickelt, welche die zukünftige praktische Ausführung verbessern.



Abbildung 76. Arbeit an den Entwurfsskizzen und gemeinsame Diskussion der Ideen (Quelle: TUD/SGB)

Die ästhetische Beurteilung erfolgte anhand von Fotos vier beispielhafter Fassaden (Abbildung 77), auf denen sich über die Zeit ungewollt ein Algenbiofilm etabliert. Die ungestörte Fassade bzw. verschiedene Farbwirkungen wurden mittels Bildbearbeitung erzeugt.

Die Teilnehmer beurteilten die Fotos nach den drei Aspekten:

1. „Diese Fassade ist faszinierend und meine Aufmerksamkeit ist auf viele interessante Dinge gerichtet.“,
2. „Diese Fassade ist ansprechend.“ und
3. „Diese Fassade ist komplex.“

jeweils auf eine Skala von 1: „gar nicht“ über 2: „ein wenig“, 3: „mäßig“, 4: „ziemlich“ bis 5: „sehr stark“.

Um die Wirkung zu vergleichen, wurde aus allen Antworten jeweils der Median bestimmt und die Werte für die beiden Varianten „ungestörte Fassade“ und „Biofilm-Fassade“ gegenübergestellt.

Im Ergebnis zeigte sich, dass es keine signifikanten Veränderungen in der Bewertung der Fassaden gab. Die Einschätzung der Ästhetik verbesserte oder verschlechterte sich maximal um 1 Bewertungspunkt. Die Faszination und das Interesse verbesserten sich in den meisten Fällen bei Gebäude 2, wobei die Farbe des Biofilms keine Rolle spielt. Die ansprechende Wirkung verschlechterte sich in fast allen Fällen. Die Komplexität veränderte sich gar nicht (Tabelle 13).



Abbildung 77. In den Fragebogen integrierte Fassaden zur Bewertung der ästhetischen Wirkung des Biofilms, von oben nach unten: Gebäude 1,2,3, und 4 (Quelle: TUD/SGB)

Tabelle 13. Ergebnis der Auswertung des Fragebogens zur Wahrnehmung von Fassaden, die ungewollt einen Biofilm aufweisen (Quelle: TUD/SGB)

Veränderungen Modalwert	faszinierend	ansprechend	komplex
verschlechtert -1	nie	3x bei Gebäuden 2,3 und 4	nie
verbessert +1	1x bei Gebäude 3	nie	nie
gleich +/-0	3x bei Gebäuden 1, 2 und 4	1x bei Gebäude 1	4x bei allen Gebäuden

Veränderungen Durchschnitt	faszinierend	ansprechend	komplex
verschlechtert -1	nie	4x bei allen Gebäuden	nie
verbessert +1	nie	nie	nie
gleich +/-0	4x bei allen Gebäuden	nie	4x bei allen Gebäuden

Im zweiten Teil des Fragebogens sollten die Teilnehmer bewerten, wie stark die ästhetische Wirkung der Fassade mit Algenbiofilmen durch die folgenden sechs Aspekte unterstützt wird:

- Farbe des Hintergrundmaterials
- Rauheit der Oberfläche
- Kombination mit anderen Materialien
- Besondere Muster auf der Oberfläche mit Algenbiofilmen
- Detaillierungsgrad der Oberfläche mit Algenbiofilmen
- Skulpturale Qualität der Oberfläche mit Algenbiofilmen

Die zu verwertende Skala zur Einschätzung reichte wieder von 1: „gar nicht“ über 2: „ein wenig“, 3: „mäßig“, 4: „ziemlich“ bis 5: „sehr stark“.

Die Auswertung ergab, dass den Teilnehmer\*innen allen abgefragten Aspekten mindestens eine ziemlich wichtige Bedeutung bei der ästhetischen Unterstützung der Algenbiofilme zuweisen. Als sehr stark wird der Einfluss von Mustern auf der Oberfläche beurteilt (Tabelle 14). Abhängig vom konkreten Objekt werden geschwungene/kurvige Linien, die organisch und wachsend aussehen, als vielversprechendes Gestaltungselement bewertet. Auch das Formen von Schriftzügen mit Biofilmen ist vorstellbar.

Zum Schluss konnten die Teilnehmer\*innen Gestaltungshinweise frei formulieren. Die Sammlung ergab folgende Hinweise zur Architektonik von Algenbiofilmfassaden:

- Verwendung spezifischer Bauarten je nach Material (z.B. Relief bei Beton, Mauerwerk)
- Einordnung in Gestaltungstypen, z.B. Brutalismus oder Fassade als Medium
- ein eigenes, Unikates Muster der Algen
- geregeltes Wachstum der Algen
- taktile Qualitäten der Oberfläche
- ein erkennbares urbanes Konzept
- eine klare Unterscheidung zum wilden unkontrollierten Bewuchs notwendig
- großflächige Biofilme wirken ungewollt → Modularität
- Spiele mit Licht und Schatten
- Natürliches sowie künstliches Licht für beleuchtete Fassaden
- Relief (Versprünge bei Materialwechsel, Fugen, Textur in Materialien)
- Proportionen, Anordnung der Bauteile/Elemente

- Farbe der Algen
- Struktur des Algen-Bewuchses

Tabelle 14. Ergebnis der Auswertung des Fragebogens zum Einfluss unterschiedlicher Gestaltungsparameter auf die ästhetische Qualität von Biofilmfassaden (Quelle: TUD/SGB)

Aspekt	Modalwert	Durchschnitt
1. Farbe des Hintergrundmaterials	4 ziemlich	4 ziemlich
2. Rauheit der Oberfläche	4 Ziemlich	4 Ziemlich
3. Kombination mit anderen Materialien	4 Ziemlich	4 Ziemlich
4. Besondere Muster auf der Oberfläche mit Algenbiofilmen	5 Sehr stark	4 Ziemlich
5. Detaillierungsgrad der Oberfläche mit Algenbiofilmen	4 Ziemlich	4 Ziemlich
6. Skulpturale Qualität der Oberfläche mit Algenbiofilmen	4 Ziemlich	4 ziemlich

Im zweiten Teil des Workshop-Tages wurde exemplarisch ein Gebäude mit einer Algenbiofilmfassade neugestaltet. Grundlage für die Gestaltung war ein Schulgebäude aus Dresden, das mit einem Wärmedämmverbundsystem versehen ist, und in einigen Fassadenbereichen eine massive, ungewollte Algenbesiedlung aufweist (Siehe Abbildung 77, Gebäude 1). Die Teilnehmenden haben zunächst in Gruppen von drei bis vier Personen gemeinsam Ideen diskutiert und anschließend auf Basis der Pläne (Abbildung 78) individuelle Gestaltungsideen skizziert. Anschließend gab es einen gemeinsamen Rundgang von Tisch zu Tisch, bei dem die Teilnehmenden ihre Entwürfe präsentiert und erläutert haben.

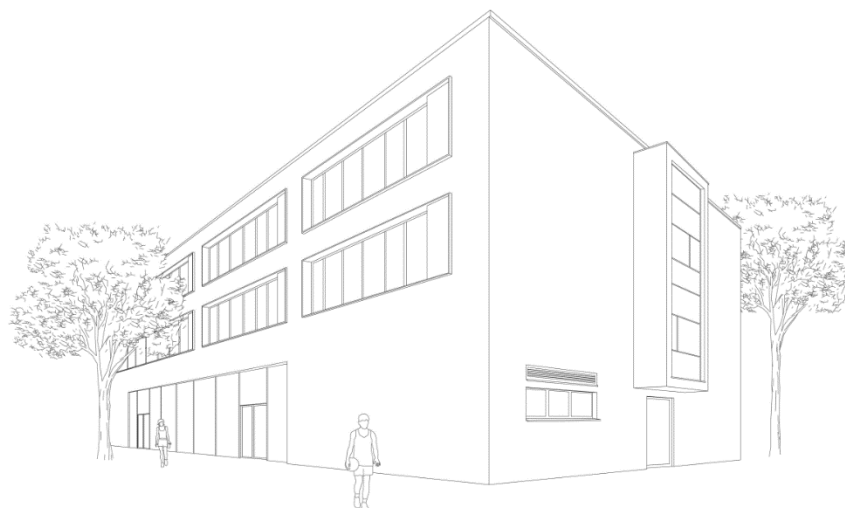


Abbildung 78. Perspektive des Schulgebäudes, das als Grundlage für die Entwurfsskizzen diente (Quelle: TUD/SGB)

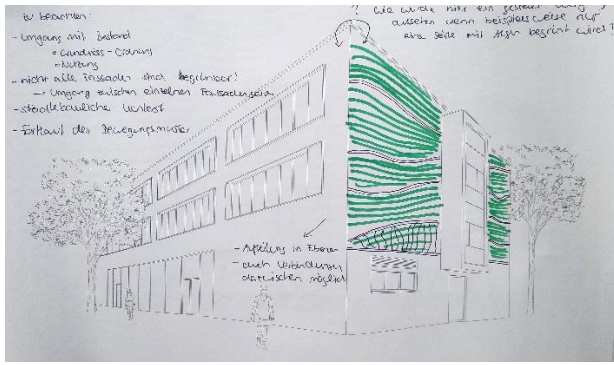
Innerhalb der Präsentationen tauchten verschiedene Gestaltungsideen mehrfach auf. An erster Stelle stand die Arbeit mit dreidimensionalen, reliefartigen Oberflächen wie Rillen, die beispielsweise mit 3D-Druck umsetzbar sind. Sehr häufig wurde auch eine Gliederung der Fassade mit linearen Elementen (sowohl horizontal als auch vertikal) vorgeschlagen. Im Kontrast dazu wurde mehrfach eine inhomogene Gestaltung mit natürlichen und frei gewachsenen Strukturen skizziert. Ebenfalls mehrfach wurde mit einer Texturierung des Substrats und dem Wechsel hydrophiler und hydrophober Oberflächen sowie dem Aufsprühen einer Nährlösung gearbeitet. Diskutiert wurden auch Skizzen, die dunkle Hintergrundfarben, Schattenwurf oder die Einarbeitung von Rohren für die Gestaltung nutzten. Ebenfalls skizziert wurde eine dichte und flächige Gestaltung der Fassade sowie die Nutzung von Paneelen (Abbildung 79, Tabelle 15).

Allgemein wurde mehrfach erwähnt, dass eine differenzierte Gestaltung in Abhängigkeit der Orientierung der Fassaden anzustreben ist und sich insbesondere Brandwände oder Giebelseiten für die Gestaltung anbieten.

Zusammenfassend hat der Workshop bestätigt, dass ungewollter Algenbewuchs die Komplexität und ansprechende Wirkung einer Fassade verschlechtert und deshalb Algenbiofilme als Gestaltungselement schon im Entwurf der Gebäude zu berücksichtigen sind. Essenziell für die Gestaltung ist ein lebendiger Algenbiofilm, der sich zwar in seiner Optik über die Jahreszeiten verändern darf, aber grundsätzlich dauerhaft ist.

Tabelle 15. Ergebnis der Auswertung des Fragebogens zum Einfluss unterschiedlicher Gestaltungsparameter auf die ästhetische Qualität von Biofilmfassaden (Quelle: TUD/SGB)

Priorität	Häufigkeit	Gestaltungsidee
1.	9	Rillen, Dreidimensionale Oberfläche, Relief
2.	7	Lineare Elemente, vertikal und horizontal
3.	6	Inhomogenität, natürlich und frei gewachsenes Bild
4.	4	Putz, unterschiedlichen Putz kombinieren, hygrophobe Beschichtung
5.	3	Dunkle Hintergrundfarben und -materialien
6.	2	Gestaltung mit Schatten
6.	2	Rohre für Regenwasserabtransport sowie Wasserversorgung der Algen
6.	2	Aufsprühen eines Fluids
6.	2	Nutzung von Brandwänden und Giebelseiten von Gebäuden
7.	1	Dichte und flächige Gestaltung
7.	1	Paneele
7.	1	Details und Ornamente
7.	1	Differenzierte Gestaltung Fassaden in unterschiedlichen Himmelsrichtungen



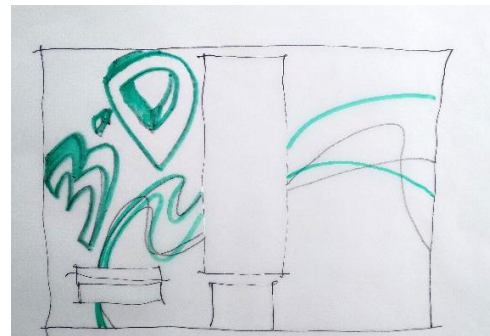
Luis Grün



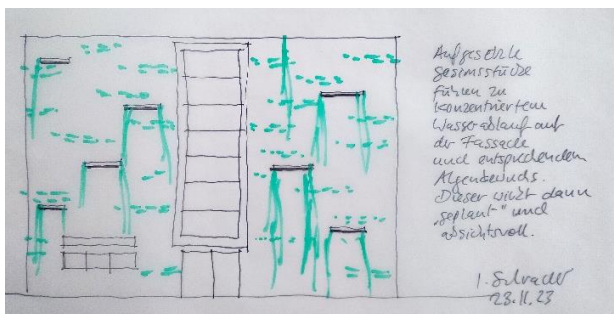
Matthias Drieschner



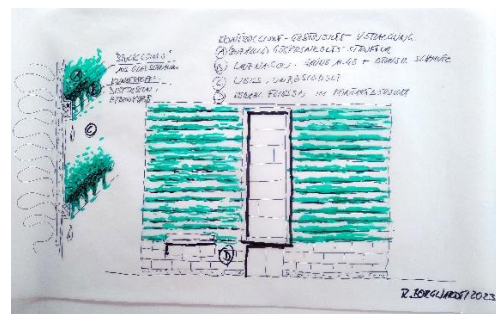
Hannah Johannsen



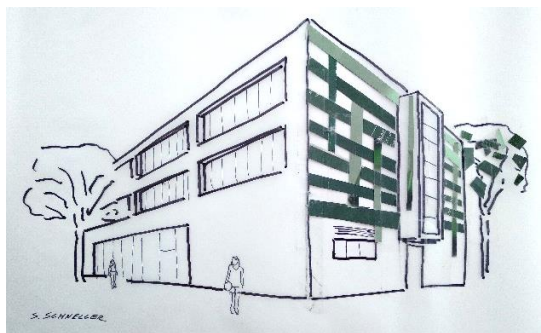
Astrid Bornheim



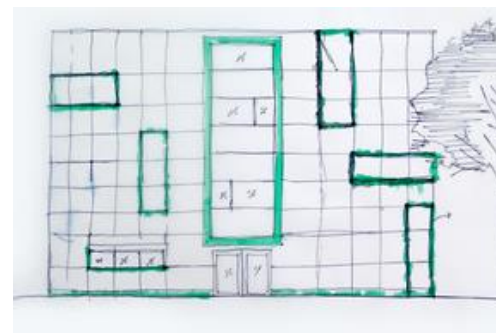
Ingo Schrader



Roland Borgwardt



Sabine Schneller



Rana Taher F. Abdelkader

Abbildung 79. Ausgewählte Entwurfsideen

## Veröffentlichungen der BAM

- 4.10.22: Projektsteckbrief auf der BAM-Webseite  
[BAM - Projekte - AbifFa - Algen-Biofilm-Fassaden für saubere Luft und besseres Stadtklima](#)
- 5.6.2023: Pressemitteilung der BAM zum Projektfortschritt  
[BAM - Aktuelles - Nachhaltiges Bauen: Fassaden mit Algenbiofilm sollen für besseres Klima in Innenstädten sorgen](#)
- 24.04.24: BAM Report 2023/2024, Seite 31: Besseres Stadtklima durch Algenbiofilme  
[BAM - Aktuelles - BAM Report 2023/24: Sicherheit braucht Vielfalt](#)

## Berichte in Zeitschriften / Ausstellung

- Ausstellung „wechsel STOFF wechsel“ in der BDA Galerie Berlin, 25.4.23-6.6.23  
6.12.203, 19:00 Uhr: Vorstellung der Forschungsarbeit im Rahmen des Curator Talks  
[Bund Deutscher Architektinnen und Architekten BDA » wechsel STOFF wechsel Gespräch#3 Strukturen \(bda-berlin.de\)](#)

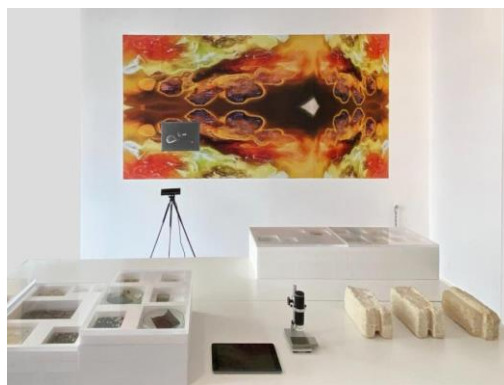


Abbildung 80. Ausstellung „wechsel Stoff wechsel“ in der BDA Galerie Berlin, links Substrate mit Algenbiofilmen

- Deutsche Bauzeitschrift (dbz) 09/23; ISSN: 0011-4782, Seite 11  
[Alge auf Fassade? Aber ja!](#)
- [Umriss] Zeitschrift für Baukultur, ISSN 1437-2533, Heft 4/2023, Seite 6-8  
Forschungsprojekte zu Energiewende und Klimawandel- Fassaden als Wärmepumpee oder zur Schadstoffbindung und Stadtkühlung
- Klimajournal, ISSN 2752-1133, April 2024, Seite 82-83  
Vom Ärgernis zum Mehrwert: Gebäudebegrünung mit Algen-Biofilmfassaden
- Diskurs, Das Magazin der Weberbank, Ausgabe 1/2024, Seite 29-30  
Das grüne Wunder



## 7 Fazit und Ausblick

### 7.1 Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis

Zielstellung des Projektes war es, biorezeptive Betonfassadenelemente zu entwickeln, die bereits vor Montage mit einem Algenbiofilm begrünt sind.

Bezüglich der für eine industrielle Anwendung geeigneten Arten wurde vom Projektpartner Solaga ein Screening vorgenommen und die Algenart *Klebsormidium flaccidum* als vielversprechend identifiziert. Diese Algenart wurde anschließend in Bioreaktoren gezüchtet.

Um die Biorezeptivität der Betonsubstrate reproduzierbar testen und im besten Fall quantifizieren zu können, wurde an der BAM eine Methodik zur optimalen Zusammensetzung eines Testbiofilms erarbeitet. Dazu wurde die Konzentration der beiden Organismen *Jaagichlorella* und *Knufia Petricola* systematisch variiert und ihr Wachstum unter variablem Nährstoffangebot analysiert. Es zeigte sich, dass *Jaagichlorella* auch bei Kombination der beiden Stressfaktoren Nährstoffmangel und hoher pH-Wert auf Agarplatten wächst und kein Unterschied zwischen saurem/neutralem und alkalischem pH-Wert in den Trends (pH-Wert 6-8) beobachtet werden kann. Ein nährstoffarmes Medium wie eine Betonoberfläche begünstigt dabei das fadenförmige Wachstum des Pilzes und fördert eine Interaktion der Organismen.

Für eine systematische Untersuchung des Einflusses der Oberflächenstruktur sowie der chemischen und hygrothermischen Kennwerte der Betonsubstrate auf die Biorezeptivität wurden vom Praxispartner BNB Prüfkörper hergestellt. Insgesamt wurden 5 verschiedene Mörtel bzw. Betone untersucht, die sich in ihren Rezepturen bezüglich der Parameter Wasser-Bindemittelwert sowie Art des Bindemittels und der Gesteinskörnung signifikant unterscheiden. Aus der Bandbreite der Rezepturen resultieren sehr unterschiedliche Gefügeeigenschaften, die wiederum die Porosität und Festigkeit sowie die Alkalität der Oberfläche bei Wasserkontakt bestimmen. Die Textur der Oberfläche wurde über Strukturmatrizen sowie unterschiedliche mechanische Nachbehandlungsarten wie säurewaschen, sandstrahlen und fräsen variiert. Für die Rezeptur mit der geringsten Rohdichte (Infralichtbeton) wurde die Frost-Tausalzbeständigkeit nachgewiesen. Ausgewählte Prüfkörper wurden weiterhin einer künstlichen Karbonatisierung unterzogen, um den pH-Wert der Oberfläche abzusenken.

Die Biorezeptivität der Betonsubstrate wurde in verschiedenen Laborversuchsreihen analysiert. Bei Solaga wurden die Prüfkörper mit den ausgewählten und im Litermaßstab in Bioreaktoren gezüchteten Algenarten beimpft. Eine Kontamination der Algen mit anderen Organismen ist dabei unvermeidlich. Die Substrate wurden anschließend über mehrere Wochen in transparenten Kunststoffboxen gelagert und definiert befeuchtet. Die Auswertung der Biorezeptivität erfolgte mittels fotografischer Dokumentation anhand der Parameter Grünfärbung und Ab- bzw. Zunahme der begrüntem Fläche. An der BAM fanden die Versuche unter sterilen Bedingungen im Wachstumsschrank statt wobei die Proben mit unterschiedlichen genau definierten Modellbiofilmen zusammengesetzt aus axenischen Kulturen beimpft wurden. Im Rahmen der Versuchsreihen wurde hier mittels Fluoreszenzmessungen sowohl die Entwicklung der Vitalität der Algen auch der Zuwachs bzw. die Abnahme der Biomasse analysiert.

Sowohl bei Solaga als auch an der BAM konnte der Biofilm auf ausgewählten Substraten über mehrere Wochen konserviert werden. Während bei Solaga keine Abnahme der Grünfärbung und /oder eine signifikante Reduktion der begrüntem Fläche zu erkennen war, konnte mittels der Fluoreszenzmessungen an der BAM sogar eine Zunahme der Biomasse über die Zeit festgestellt werden. In den Laborversuchen mit Bewässerung zeigte sich, dass die Dauerhaftigkeit der Biofilme auf den texturierten Oberflächen größer ist als auf den schalungsglatten Oberflächen und die Befeuchtung mittels Sprühnebel den Abtrag von Biomasse reduziert. Während in den Versuchen von Solaga ein Einfluss des pH-Werts sowie der hygrischen Kennwerte nicht erkennbar war, erwies sich der pH-Wert in den Versuchsreihen der BAM als zentraler Faktor für die Entwicklung der Vitalität und der Biomasse. Interessanterweise zeigten jedoch

Biofilme mit einer geringeren Vitalität eine bessere Anheftung auf der Oberfläche. Auch eine Interaktion der Testorganismen Alge und Pilz war nur auf Substraten mit höheren pH-Werten festzustellen. Dies deutet daraufhin, dass ein bestimmtes Stresslevel der Organismen deren Widerstandsfähigkeit gegen hydrodynamischen Stress erhöht und die Organismen nur unter Stress gezwungen sind zu interagieren. Diese Erkenntnis korrespondiert mit den Untersuchungsergebnissen zur Auswahl und Zusammensetzung der Testorganismen, die gezeigt haben, dass *Knufia Petricola* nur auf einem nährstoffarmen Medium ein fadenförmiges Wachstum zeigt und sich die Algen um die Pilzhyphen anlagern. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass ein Gleichgewicht zwischen photosynthetischer Effizienz, Wachstum und Biofilmadhäsion erreicht werden muss, um ein effektives und dauerhaftes Algen-Biofilm-Fassadensystem zu schaffen. Damit Laborversuchsreihen zur Bestimmung der Biorezeptivität repräsentativ sind, müssen sie den für die Interaktion und Anheftung der Organismen erforderlichen Stress zu simulieren.

Auch Versuche zur Bewitterung von Prüfkörpern unter realen Klimarandbedingungen fanden sowohl bei Solaga als auch an der BAM statt. An der BAM erwies sich der von Solaga auf den Substraten applizierte, durch eine Zentrifugierung aufkonzentrierte Biofilme aus *Chlorella* als nicht dauerhaft und wurde nach wenigen Tagen durch die Witterung abgetragen. Bei Solaga wurden mit einem aufkonzentrierten Biofilm aus *Klebsormidium* auf einzelnen Oberflächen etwas bessere Ergebnisse erzielt. Neben der visuellen Auswertung wurden hier auch Gaswechsellmessungen und in Kooperation mit der BAM Fluoreszenzmessungen durchgeführt. Auf dem Substrat aus ultrahochfestem Beton mit Baumrindenstruktur und einer Referenz aus Kalziumsilikat konnte über 14 Tage ein recht stabiler Biofilm konserviert werden. Die visuelle Auswertung ließ auf beiden Substraten keinen Rückgang in der Besiedlungsdichte erkennen und korrespondierte mit den Ergebnissen der zusätzlich durchgeführten Gaswechsel- und Fluoreszenzmessungen. Auf allen anderen Betonsubstraten und Referenzmaterialien wurden die applizierten Biofilme schnell durch Witterung abgetragen. Ursächlich für die bessere Dauerhaftigkeit der Biofilme könnte neben der geänderten Zusammensetzung die geschütztere Exposition der Prüfkörper am Standort von Solaga sein.

Erste Messungen zur Schadstoffbindung der auf den Betonsubstraten applizierten Biofilme wurden von Solaga auf den unter realen Klimarandbedingungen bewitterten Prüfkörpern durchgeführt. Die Substrate wurden dazu nach Abschluss der Bewitterung in einem selbst konzipierten Versuchsaufbau mit definiertem Feinstaub unterschiedlicher Partikelgrößen überströmt und die Schadstoffbindung auf den Oberflächen mittels Infrarotsensoren über die Differenz in der Partikelkonzentration vor und nach dem Durchströmen des Versuchsraums quantifiziert. Die getesteten Proben sind im Allgemeinen etwas effizienter bei der Reduzierung der Partikelgrößen PM1- und PM2,5, reduzieren aber auch die größeren PM10-Partikel. Die Tatsache, dass die bis zum Ende der Bewitterung stabilen Biofilme auf den Substraten UHPC und Calciumsilikat sich im Vergleich zu den anderen Proben nicht durch eine deutlich erhöhte Schadstoffbindung auszeichnen, ist nicht plausibel und könnte an der horizontalen Lagerung der Proben liegen, in der die Adhäsion an die hydrophile Oberfläche eventuell von untergeordneter Bedeutung ist. Hier sind weitere Prüfungen erforderlich.

Messungen und Berechnungen zur Produktion von Verdunstungskühle erfolgten nur für die Betonsubstrate ohne Biofilm. Hier lag die Überlegung zu Grunde, dass auch bei den auf dem Markt etablierten Vertical Gardens für die Verdunstungsleistung insbesondere das Textil von Bedeutung ist. Um die Verdunstungsleistung von Betonsubstraten und die daraus resultierende Abkühlung der Oberflächen im Vergleich zu einer Referenz zu charakterisieren, wurden Berechnungen mit der Software WUFI zum instationären gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport durch die Fassade in durchgeführt. Unter der Voraussetzung, dass in den Sommermonaten über eine sensorgesteuerte Bewässerung eine kontinuierliche Feuchtesättigung des Betonsubstrats realisierbar ist, wird eine Abkühlung der Fassadenoberfläche von bis zu 4 °C durch die Befeuchtung erreicht und über den Zeitraum vom 01.06 bis 30.09 ein Feuchtestrom über die Außenoberfläche von circa 130 l/m<sup>2</sup> berechnet. Diese Menge

entspricht in etwa der Hälfte des durchschnittlichen Niederschlags in diesem Zeitraum und kann durch eine Optimierung des Substrats optimiert werden.

Zur Analyse der Biodiversität wurde eine Reihe von mit Biofilmen bewachsenen Betonoberflächen beprobt, die sich in ihrer Expositionsdauer (wenige Monate bis fast 50 Jahre), ihrer Ausrichtung und ihrer Rezeptur unterscheiden. Die Auswertung der Artenzusammensetzung nach der Expositionsdauer der Oberflächen bestätigt, dass sich die Biofilme über die Zeit verändern und das Betonalter den größten Effekt auf die Biodiversität hat. Die länger exponierten Flächen weisen eine höhere Komplexität auf als die Oberflächen mit einem geringeren Alter. Auf den Betonoberflächen ist dabei eine höhere Biodiversität zu verzeichnen als auf gleich alten Oberflächen aus Kunststoff.

In einem eintägigen Workshop wurden zusammen mit Architekt\*innen zunächst unplanmäßig besiedelte Fassaden beurteilt und darauf aufbauend Ideen für die bewusste Gestaltung von Algenbiofilmfassaden erarbeitet. Die Auswertung zeigt, dass unplanmäßiger Bewuchs die Komplexität und ansprechende Wirkung einer Fassade verschlechtert und deshalb Algenbiofilme als Gestaltungselement schon im Entwurf der Gebäude zu berücksichtigen sind. Essenziell für die Gestaltung ist ein lebendiger Algenbiofilm, der sich zwar in seiner Optik über die Jahreszeiten verändern darf, aber grundsätzlich dauerhaft ist. Innerhalb der Präsentationen tauchten verschiedene Gestaltungsideen mehrfach auf. An erster Stelle stand die Arbeit mit dreidimensionalen, reliefartigen Oberflächen wie Rillen, die beispielsweise mit 3DDruck umsetzbar sind. Sehr häufig wurde auch eine Gliederung der Fassade mit linearen Elementen (sowohl horizontal als auch vertikal) vorgeschlagen. Im Kontrast dazu wurde mehrfach eine inhomogene Gestaltung mit natürlichen und frei gewachsenen Strukturen skizziert. Ebenfalls mehrfach wurde mit einer Texturierung des Substrats und dem Wechsel hydrophiler und hydrophober Oberflächen sowie dem Aufsprühen einer Nährlösung gearbeitet. Diskutiert wurden auch Skizzen, die dunkle Hintergrundfarben, Schattenwurf oder die Einarbeitung von Rohren für die Gestaltung nutzten. Ebenfalls skizziert wurde eine dichte und flächige Gestaltung der Fassade sowie die Nutzung von Paneelen

## 7.2 Bewertung/Diskussion/Zielerreichung

Im Rahmen der Projektlaufzeit ist es nicht gelungen, ein dauerhaftes mit einem Algenbiofilm vorbegrüntes Fassadenelement bis zur Marktreife zu entwickeln. Durch die Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen wurden aber sehr wichtige Ergebnisse erzielt, auf denen Folgeforschung aufbauen kann. Zentral für die weitere Entwicklung von Algenbiofilmfassaden sowie die Anpassung von Versuchsaufbauten zur Prüfung der Biorezeptivität von Baustoffen ist die Erkenntnis, dass die Organismen ein gewisses Stresslevel benötigen, um sich an der Oberfläche anzuheften. Liegen die äußeren Randbedingungen kontinuierlich im optimalen Bereich, sind die Organismen nicht gezwungen zu interagieren und entsprechende Funktionen zur verbesserten Adhäsion auszubilden.

Vielversprechende Ergebnisse wurden bei der Entwicklung eines Testbiofilms bestehend aus einer Alge und einem Pilz erzielt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Organismen auch auf sehr nährstoffarmen Substraten wachsen und bei Vorliegen von Stress wie Nährstoffmangel oder suboptimaler pH-Wert interagieren. Die mit dem Testbiofilm durchgeführten Untersuchungsreihen sind plausibel und reproduzierbar.

Die Laborversuche bestätigen, dass die Oberflächenstruktur sowie der pH-Wert der Oberfläche eine übergeordnete Bedeutung für die Biorezeptivität haben. Damit die Ergebnisse der Laborversuche jedoch auf das Feld übertragbar sind, muss eine Balance zwischen Wachstum bei optimalen Bedingungen und Adhäsion bei erreicht und in zukünftigen Versuchsaufbauten berücksichtigt werden.

Eine Inokulation der Betonoberflächen mit einem aufkonzentrierten Algenbiofilm hat sich unter realen Wetterrandbedingungen als nicht dauerhaft erwiesen. Eine Montage von vorbegrünten Betonfassadenelementen analog den bepflanzten Modulen von vertikalen Fassaden ist deshalb zum

jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Erst wenn weitere Erkenntnisse zur Etablierung natürlicher Biofilme vorliegen, kann abgeschätzt werden, ob die im Rahmen der Sukzession der Organismen erforderlichen Prozesse beschleunigt werden können.

Die am Workshop beteiligten Architekt\*innen zeigten sich sehr interessiert an den Ergebnissen und entwickelten interessante Ideen für die Gestaltung von Algenbiofilmfassaden. Als einfach umsetzbar wurde mehrfach mit der Idee gearbeitet, (gesammeltes) Regenwasser gezielt über die Fassadenoberfläche abzuleiten und dadurch Muster zu generieren.

Insgesamt fand das Forschungsthema großes Interesse bei den Medien. Während der Projektlaufzeit wurden von Fachkolleg\*innen neue Ergebnisse zur Biorezeptivität von Baustoffen veröffentlicht. Die veröffentlichten Befunde stehen jedoch nicht im Widerspruch zu den im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnissen und erfordern somit keine Neubewertung der eigenen Ergebnisse. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens gewonnenen Ergebnisse erklären warum so viele Forscher\*innen scheitern, wenn sie unter idealen Bedingungen gewonnene Laborergebnisse versuchen, ins Freiland zu übertragen

### 7.3 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Da im Rahmen des Vorhabens neue Erkenntnisse gewonnen wurden, ergeben sich verschiedene neue Fragen, die eine wissenschaftliche Anschlussfähigkeit gewährleisten.

Insbesondere ist zu erforschen, welches Verhältnis von Stress und vorteilhaften Wachstumsbedingungen erforderlich ist, um ein dauerhaftes Anheften von Testorganismen auf Baustoffsubstraten zu gewährleisten. In diesem Kontext ist auch zu analysieren, ob es wie vermutet eine Hierarchie von Stressfaktoren wie Feuchtigkeitsangebot, ungünstiger pH-Wert und Nährstoffmangel gibt und wie sensitiv die Testorganismen auf Schwankungen in den Stressfaktoren reagieren.

Erkenntnisse bezüglich eines optimalen Gleichgewichts zwischen photosynthetischer Effizienz, Wachstum und Biofilmadhäsion sind für die Verbesserung von Labortests zur Quantifizierung der Biorezeptivität erforderlich. Sie sind aber auch von Bedeutung für Folgeforschung zur selektiven Verbesserung der Wachstumsbedingungen an bestehenden Fassaden im Sinne einer bewussten Gestaltung.

Nachdem der von Solaga entwickelte Versuchsaufbau zur Messung der Schadstoffaufnahme keine plausiblen Ergebnisse geliefert hat, besteht auch in dieser Frage weiterer Forschungsbedarf. Ein geeignetes Konzept zur Quantifizierung der Schadstoffbindung berücksichtigt im Idealfall auch die potenzielle stoffliche Umsetzung ausgewählter Substanzen durch Algen mit spezifischem Metabolismus sowie den Einfluss der äußeren Randbedingungen auf die Anheftung und Verstoffwechslung von Partikeln.

Weiterer Forschungsbedarf besteht auch in der gezielten Optimierung des Wasserrückhaltevermögens und der Verdunstungsleistung von Betonfassaden bei gleichzeitiger Gewährleistung ihrer Frostbeständigkeit. Für die technische Umsetzung ist ein geeignetes System zur sensorgesteuerten Befüllung der Fassaden mit zwischengespeichertem Regenwasser zu entwickeln bzw. aus einem anderen Kontext zu adaptieren.

### 7.4 Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung von Algenbiofilmfassaden gewonnen, die integriert in ein Konzept zur Schwammstadt geeignet sind, einen Beitrag zur Verminderung des Hitzeinseleffekts zu leisten und die Biodiversität zu erhöhen. Das Potenzial zur Bindung und Umsetzung von Luftschadstoffen ist in weiteren Untersuchungen zu klären. Um eine Akzeptanz des neuen Fassadenbegrünungskonzepts zu erreichen, ist es erforderlich Architekt\*innen

aber auch Bauherren und Nutzer frühzeitig einzubinden. Gelingt es nachzuweisen, dass sich die in der Natur bei ausreichendem Feuchtigkeitsangebot von selbst einstellenden Biofilmen ähnlich dem menschlichen Mikrobiom für die Gesundheit vorteilhaft sind, könnte dies einen Paradigmenwechsel beschleunigen und zu einer höheren Zustimmung führen.

## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Mitwirkende

#### Autorinnen und Autoren

Cook, Jake, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin  
Gardei, André, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin  
Gorbushina, Anna, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin  
Tonon, Chiara, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin  
von Werder, Julia, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

#### Weitere Mitwirkende

Amirbeiki Tafti, Fatemeh, TU Dresden  
Bartholomäus, Alexander, Greengate Genomics  
Gabriel, Lukas, Solaga UG  
Herzog, Benjamin, Solaga UG  
Martin, Falk, BNB Potsdam  
Marquardt, Gesine, TU Dresden  
Rathjen, Charlotte, TU Dresden  
Stohl Leonie, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

sowie Mitwirkung der Teilnehmer\*innen des Workshops ALGEN STATT ALGIZIDE am 23. November 2023 an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin

#### Projektpartner

Beton und Naturstein Babelsberg  
Solaga UG, Berlin  
Technische Universität Dresden, Professur für Sozial- und Gesundheitsbauten

#### Fachliche Betreuung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3  
Verena Kluth

## 8.2 Kurzbiografien

### **Ph. D. Julia von Werder**



Julia von Werder studierte bis 2000 Bauingenieurwesen an der Fachhochschule in Potsdam sowie als Fulbright-Stipendiatin am Stevens Institute of Technology, Hoboken, New York. Nach kurzer Tätigkeit in einem Bausachverständigenbüro war sie von 2003-2017 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Hochschule Wismar. Seit 2017 ist sie an der Bundesanstalt für Materialforschung- und -prüfung für den Arbeitsbereich „Gefüge und Transporteigenschaften“ zuständig. Neben der Biorezeptivität von Beton forscht sie aktuell zu Lehmbaustoffen.



### **M. Sc. Jake Cook**

Jake Cook studierte Werkstofftechnik an der Universität Leeds und anschließend Nanowissenschaften an der Universität Kopenhagen. Nach seinem Abschluss arbeitete er als Produktingenieur im Bereich Wasseraufbereitung, bevor er 2023 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) kam.



### **Dipl.-Geol. André Gardei**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abschluss in Geologie an der Technischen Universität Berlin im Jahr 1997. Von 1997 bis 2001 arbeitete er am Deutschen GeoForschungsZentrum in Potsdam als wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Bereichen Geothermie und 3D-Petrophysik. Von 2001 bis 2005 war er an der BAM für die Automatisierung und Validierung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen zuständig. Seit 2005 ist er Mitglied des Arbeitsbereichs „Gefüge und Transporteigenschaften“. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf der Erhaltung des Kulturerbes und Schutzmaßnahmen für historische Baumaterialien.

**Prof. Dr. rer. nat. habil. Anna A. Gorbushina**

Anna A. Gorbushina ist Professorin an der Freien Universität Berlin und Leiterin der Abteilung 4 „Materialien und Umwelt“ an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin.



Ausgehend von einer Ausbildung in Biophysik und Mykologie arbeitete sie in Oldenburg und St. Petersburg (Russland) in den Bereichen Geomikrobiologie und Kulturgutschutz und habilitierte sich 2006 in Geomikrobiologie an der Carl von Ossietzky Universität in Oldenburg, Deutschland.

Unterstützt durch die Forschungsstipendien der Schweizerischen Forschungsgemeinschaft und der Alexander von Humboldt-Stiftung entwickelte sie an der Universität Genf ein Labormodell zur Nachahmung von Langzeitinteraktionen zwischen Mikroorganismen und Materialien.

Ihre Forschung in Berlin konzentriert sich auf das Verständnis der geochemischen und molekularen Mechanismen, durch die es Mikroorganismen, insbesondere Pilzen, gelingt, Materialoberflächen, die der Luft ausgesetzt sind, zu besiedeln und zu verändern.

**Ph. D. Chiara Tonon**



Chiara Tonon studierte Materialwissenschaften für die Denkmalpflege und spezialisierte sich im Rahmen des Promotionsprogramms „Biowissenschaften und angewandte Biotechnologien“ an der Universität Turin (Italien) auf biologische Beläge, die für die Biodegradation von Gesteinen verantwortlich sind. Seit 2021 ist sie als Postdoc-Forscherin in der Gruppe „Modell-Biofilme und Geomikologie“ an der BAM (Berlin) tätig.

### 8.3 Literatur

- [1] A. A. Gorbushina, „Life on the rocks“, *Environmental Microbiology*, Bd. 9, Nr. 7, Art. Nr. 7, Juli 2007, doi: 10.1111/j.1462-2920.2007.01301.x.
- [2] E. Cziesielski, Hrsg., *Bauphysik-Kalender: 2004*. Berlin: Ernst, 2004.
- [3] L. Kots, N. Lesnych, C. Messal, H. Stopp, P. Strangfeld, und J. Von Werder, „Bautechnische Grundlagen zur Algenbesiedlung nachträglich wärmegeämmter Fassaden“, in *Bauphysik-Kalender: 2004*, E. Cziesielski, Hrsg., Berlin: Ernst und Söhne Verlag, 2004, S. 585–644.
- [4] M. Krus, K. Sedlbauer, und K. Lenz, „Einfluß unterschiedlicher Maßnahmen auf die Taupunkttemperaturunterschreitungen an Außenoberflächen“, in *Algen an Fassadenbaustoffen II*, in Schriftenreihe Altbauinstandsetzung; 5/6. Wissmar, Germany, Europe, Jan. 2003. [Online]. Verfügbar unter: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbas&AN=edsbas.F3640E38&lang=de&site=eds-live>
- [5] S. Manso, M. Á. Calvo-Torras, N. De Belie, I. Segura, und A. Aguado, „Evaluation of natural colonisation of cementitious materials: Effect of bioreceptivity and environmental conditions“, *Science of The Total Environment*, Bd. 512–513, S. 444–453, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.086.
- [6] Y. Huang u. a., „Enhancing microalgae biofilm formation and growth by fabricating microgrooves onto the substrate surface“, *Bioresource Technology*, Bd. 261, S. 36–43, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.03.139.
- [7] J. Von Werder, H. Venzmer, und R. Černý, „Application of fluorometric and numerical analysis for assessing the algal resistance of external thermal insulation composite systems“, *Journal of Building Physics*, Bd. 38, Nr. 4, Art. Nr. 4, Jan. 2015, doi: 10.1177/1744259113506073.
- [8] U. Lüttge, „Cyanobacterial Tintenstrich Communities and their Ecology“, *Naturwissenschaften*, Bd. 84, Nr. 12, S. 526–534, Dez. 1997, doi: 10.1007/s001140050439.
- [9] J. Robinson u. a., „Microbiome-Inspired Green Infrastructure (MIGI): A Bioscience Roadmap for Urban Ecosystem Health“, 21. April 2021. doi: 10.20944/preprints202104.0560.v1.
- [10] P. Sicard, E. Agathokleous, S. C. Anenberg, A. De Marco, E. Paoletti, und V. Calatayud, „Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective“, *Science of The Total Environment*, Bd. 858, S. 160064, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160064.
- [11] A. Prinz und D. J. Richter, „Feinstaubbelastung und Lebenserwartung in Deutschland“, *AStA Wirtsch Sozialstat Arch*, Bd. 15, Nr. 3–4, S. 237–272, Dez. 2021, doi: 10.1007/s11943-021-00292-1.
- [12] P. Berry, *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities': (full version)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
- [13] N. Kabisch, M. Van Den Bosch, und R. Laforteza, „The health benefits of nature-based solutions to urbanization challenges for children and the elderly – A systematic review“, *Environmental Research*, Bd. 159, S. 362–373, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.envres.2017.08.004.
- [14] G. N. Bratman u. a., „Nature and mental health: An ecosystem service perspective“, *Sci. Adv.*, Bd. 5, Nr. 7, Art. Nr. 7, Juli 2019, doi: 10.1126/sciadv.aax0903.



- [15] R. J. Craggs, S. Heubeck, T. J. Lundquist, und J. R. Benemann, „Algal biofuels from wastewater treatment high rate algal ponds“, *Water Science and Technology*, Bd. 63, Nr. 4, Art. Nr. 4, Feb. 2011, doi: 10.2166/wst.2011.100.
- [16] S. Orandi, D. M. Lewis, und N. R. Moheimani, „Biofilm establishment and heavy metal removal capacity of an indigenous mining algal-microbial consortium in a photo-rotating biological contactor“, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Bd. 39, Nr. 9, S. 1321–1331, Sep. 2012, doi: 10.1007/s10295-012-1142-9.
- [17] L. Stohl, T. Manninger, J. Von Werder, F. Dehn, A. Gorbushina, und B. Meng, „Bioreceptivity of concrete: A review“, *Journal of Building Engineering*, Bd. 76, S. 107201, Okt. 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.107201.
- [18] R. Jakubovskis, J. Malaiškienė, und V. Gribniak, „Bio-colonization layered concrete panel for greening vertical surfaces: A field study“, *Case Studies in Construction Materials*, Bd. 19, S. e02394, Dez. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02394.
- [19] R. Mahrous, E. Giancola, A. Osman, T. Asawa, und H. Mahmoud, „Review of key factors that affect the implementation of bio-receptive façades in a hot arid climate: Case study north Egypt“, *Building and Environment*, Bd. 214, S. 108920, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108920.
- [20] K. F. Mustafa, A. Prieto, und M. Ottele, „The Role of Geometry on a Self-Sustaining Bio-Receptive Concrete Panel for Facade Application“, *Sustainability*, Bd. 13, Nr. 13, S. 7453, Juli 2021, doi: 10.3390/su13137453.
- [21] M. Veeger, A. Prieto, und M. Ottelė, „Exploring the Possibility of Using Bioreceptive Concrete in Building Façades“, *Journal of Facade Design and Engineering*, S. 73-86 Pages, Apr. 2021, doi: 10.7480/JFDE.2021.1.5527.
- [22] K. Perini, P. Castellari, A. Giachetta, C. Turcato, und E. Roccotiello, „Experiencing innovative biomaterials for buildings: Potentialities of mosses“, *Building and Environment*, Bd. 172, S. 106708, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106708.
- [23] M. Cruz, „Poikilohydric Living Walls“, 2022.
- [24] N. A. Cutler, H. A. Viles, S. Ahmad, S. McCabe, und B. J. Smith, „Algal ‘greening’ and the conservation of stone heritage structures“, *Science of The Total Environment*, Bd. 442, S. 152–164, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.050.
- [25] H. Barberousse, B. Ruot, C. Yéprémian, und G. Boulon, „An assessment of façade coatings against colonisation by aerial algae and cyanobacteria“, *Building and Environment*, Bd. 42, Nr. 7, S. 2555–2561, Juli 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.07.031.
- [26] F. Gladis und R. Schumann, „Influence of material properties and photocatalysis on phototrophic growth in multi-year roof weathering“, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Bd. 65, Nr. 1, S. 36–44, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.ibiod.2010.05.014.
- [27] W. D. Muynck, „Evaluation of anti-fouling strategies for cementitious materials“, 2008, [Online]. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/1854/LU-689588>
- [28] A. Del Mondo, G. Zuccaro, M. Petrarretti, A. Pollio, und A. De Natale, „Water absorption coefficient drives *Nostoc* sp. colonization on mineral substrates“, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Bd. 164, S. 105291, Okt. 2021, doi: 10.1016/j.ibiod.2021.105291.
- [29] P. Reboah, C. B. Bolou-Bi, S. Nowak, und A. Verney-Carron, „Influence of climatic factors on cyanobacteria and green algae development on building surface“, *PLoS ONE*, Bd. 18, Nr. 3, S. e0282140, März 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0282140.

- [30] S. Popović u. a., „Seasonal Dynamics of Cyanobacteria and Algae in Biofilm from the Entrance of Two Caves“, *Geomicrobiology Journal*, Bd. 37, Nr. 4, S. 315–326, Apr. 2020, doi: 10.1080/01490451.2019.1700322.
- [31] B. Blocken und J. Carmeliet, „On the accuracy of wind-driven rain measurements on buildings“, *Building and Environment*, Bd. 41, Nr. 12, S. 1798–1810, Dez. 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.022.
- [32] M. Hayek, M. Salgues, J.-C. Souche, K. De Weerd, und S. Pioch, „How to Improve the Bioreceptivity of Concrete Infrastructure Used in Marine Ecosystems? Literature Review for Mechanisms, Key Factors, and Colonization Effects“, *Journal of Coastal Research*, Bd. 39, Nr. 3, März 2023, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-21-00158.1.
- [33] T. R. Garrett, M. Bhakoo, und Z. Zhang, „Bacterial adhesion and biofilms on surfaces“, *Progress in Natural Science*, Bd. 18, Nr. 9, S. 1049–1056, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.pnsc.2008.04.001.
- [34] M. Veeger, A. Prieto, und M. Ottel , „Exploring the Possibility of Using Bioreceptive Concrete in Building Façades“, *Journal of Facade Design and Engineering*, S. 73-86 Pages, Apr. 2021, doi: 10.7480/JFDE.2021.1.5527.
- [35] S. Manso, M. Á. Calvo-Torras, N. De Belie, I. Segura, und A. Aguado, „Evaluation of natural colonisation of cementitious materials: Effect of bioreceptivity and environmental conditions“, *Science of The Total Environment*, Bd. 512–513, S. 444–453, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.086.
- [36] B. Riley, F. De Larrard, V. Malécot, I. Dubois-Brugger, H. Lequay, und G. Lecomte, „Living concrete: Democratizing living walls“, *Science of The Total Environment*, Bd. 673, S. 281–295, Juli 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.065.
- [37] R. Jakubovskis, J. Malaiškienė, und V. Gribniak, „Bio-colonization layered concrete panel for greening vertical surfaces: A field study“, *Case Studies in Construction Materials*, Bd. 19, S. e02394, Dez. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02394.
- [38] E. Fuentes, D. Vázquez-Nion, und B. Prieto, „Laboratory development of subaerial biofilms commonly found on buildings. A methodological review“, *Building and Environment*, Bd. 223, S. 109451, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109451.
- [39] E. Fuentes und B. Prieto, „A laboratory approach on the combined effects of granite bioreceptivity and parameters modified by climate change on the development of subaerial biofilms on cultural heritage“, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Bd. 164, S. 105295, Okt. 2021, doi: 10.1016/j.ibiod.2021.105295.
- [40] L. Stohl, T. Manninger, J. Von Werder, F. Dehn, A. Gorbushina, und B. Meng, „Bioreceptivity of concrete: A review“, *Journal of Building Engineering*, Bd. 76, S. 107201, Okt. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.107201.
- [41] G. Haese, „MOSSCUBE II – DIE VOLLSTÄNDIGE UMMANTELUNG EINES GEBÄUDES MIT MOOSWÄNDEN“, MOSS CUBE II. Zugegriffen: 17. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://moosmaschine.de/mosscube-ii-die-vollstaendige-ummantelung-eines-gebaeudes-mit-mooswaenden/>
- [42] J. Hahn, „Bio-ID Lab designs DIY algae-infused tiles that can extract toxic dyes from water“, DeZeen. Zugegriffen: 17. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dezeen.com/2019/09/21/bio-id-lab-indus-algae-tiles-water/>
- [43] G. Motzke, „Algen und Pilzbefall - Ein rechtlichen Zuordnungsproblem unter Berücksichtigung des neuen Sachmangelbegriffs bei Schuldrechtsmodernisierung“, in *Algen, Pilze, Fassaden: Mängel*

vermeiden, rechtlich absichern; Fachwissen und Tipps für den Handwerker, 1. Aufl., P. Dolt, Hrsg., in Praxis kompakt, no. 1. , Geislingen (Steige): Maurer, 2004.

- [44] M. Burkhardt u. a., „Leaching of additives from construction materials to urban storm water runoff“, *Water Science and Technology*, Bd. 63, Nr. 9, Art. Nr. 9, Mai 2011, doi: 10.2166/wst.2011.128.
- [45] M. Burkhardt u. a., „Leaching of Biocides from Façades under Natural Weather Conditions“, *Environ. Sci. Technol.*, Bd. 46, Nr. 10, Art. Nr. 10, Mai 2012, doi: 10.1021/es2040009.
- [46] F. Villa, P. S. Stewart, I. Klapper, J. M. Jacob, und F. Cappitelli, „Subaerial Biofilms on Outdoor Stone Monuments: Changing the Perspective Toward an Ecological Framework“, *BioScience*, Bd. 66, Nr. 4, Art. Nr. 4, Apr. 2016, doi: 10.1093/biosci/biw006.
- [47] F. Villa und F. Cappitelli, „The Ecology of Subaerial Biofilms in Dry and Inhospitable Terrestrial Environments“, *Microorganisms*, Bd. 7, Nr. 10, Art. Nr. 10, Sep. 2019, doi: 10.3390/microorganisms7100380.
- [48] A. Akers, J. Barton, R. Cossey, P. Gainsford, M. Griffin, und D. Micklewright, „Visual Color Perception in Green Exercise: Positive Effects on Mood and Perceived Exertion“, *Environ. Sci. Technol.*, Bd. 46, Nr. 16, S. 8661–8666, Aug. 2012, doi: 10.1021/es301685g.
- [49] A. A. Gorbushina und W. J. Broughton, „Microbiology of the Atmosphere-Rock Interface: How Biological Interactions and Physical Stresses Modulate a Sophisticated Microbial Ecosystem“, *ANNUAL REVIEW OF MICROBIOLOGY*, Bd. 63, S. 431–450, Jan. 2009, [Online]. Verfügbar unter: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbl&AN=RN260202611&lang=de&site=eds-live>
- [50] A. A. Gorbushina und W. E. Krumbein, „Role of Microorganisms in Wear Down of Rocks and Minerals“, in *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*, Bd. 3, A. Varma und F. Buscot, Hrsg., in Soil Biology, vol. 3. , Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, S. 59–84. doi: 10.1007/3-540-26609-7\_3.
- [51] F. Villa u. a., „A desiccated dual-species subaerial biofilm reprograms its metabolism and affects water dynamics in limestone“, *Science of The Total Environment*, Bd. 868, S. 161666, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161666.
- [52] J. Schumacher und A. A. Gorbushina, „Schwarze Pilze — Wüstenbesiedler finden neue Lebensräume“, *Biospektrum*, Bd. 27, Nr. 6, S. 665–666, Okt. 2021, doi: 10.1007/s12268-021-1646-9.
- [53] O. Voigt, N. Knabe, S. Nitsche, E. A. Erdmann, J. Schumacher, und A. A. Gorbushina, „An advanced genetic toolkit for exploring the biology of the rock-inhabiting black fungus *Knufia petricola*“, *Sci Rep*, Bd. 10, Nr. 1, S. 22021, Dez. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-79120-5.
- [54] R. Qiu, S. Gao, P. A. Lopez, und K. L. Ogden, „Effects of pH on cell growth, lipid production and CO<sub>2</sub> addition of microalgae *Chlorella sorokiniana*“, *Algal Research*, Bd. 28, S. 192–199, Dez. 2017, doi: 10.1016/j.algal.2017.11.004.
- [55] T. Darienko und T. Pröschold, „The genus *Jaagichlorella* Reising (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) and its close relatives: an evolutionary puzzle“, *Phytotaxa*, Bd. 388, Nr. 1, Art. Nr. 1, Jan. 2019, doi: 10.11646/phytotaxa.388.1.2.
- [56] O. Perez-Garcia, F. M. E. Escalante, L. E. de-Bashan, und Y. Bashan, „Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products“, *Water Research*, Bd. 45, Nr. 1, Art. Nr. 1, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.watres.2010.08.037.
- [57] Y. T. Cheah und D. J. C. Chan, „Physiology of microalgal biofilm: a review on prediction of adhesion on substrates“, *Bioengineered*, Bd. 12, Nr. 1, S. 7577–7599, Jan. 2021, doi: 10.1080/21655979.2021.1980671.

- [58] Y. Zha, H. Chong, P. Yang, und K. Ning, „Microbial Dark Matter: From Discovery to Applications“, *Genomics, Proteomics & Bioinformatics*, Bd. 20, Nr. 5, Art. Nr. 5, Okt. 2022, doi: 10.1016/j.gpb.2022.02.007.
- [59] C. Farinea, „Design for Companion Species: Developing Collaborative Multispecies Urban Environments“, 2020, doi: 10.15488/10118.
- [60] K. Er und C. C. Leong, „Singapore’s City in Nature: More than 50 Years of Greening“, 2024, S. 77–89. doi: 10.1142/9789811281075\_0007.
- [61] E. Torresi *u. a.*, „Biofilm Thickness Influences Biodiversity in Nitrifying MBBRs—Implications on Micropollutant Removal“, *Environ. Sci. Technol.*, Bd. 50, Nr. 17, Art. Nr. 17, Sep. 2016, doi: 10.1021/acs.est.6b02007.
- [62] C. A. Viegas *u. a.*, „Diversity and distribution of microbial communities on the surface of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) facades in residential buildings“, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Bd. 184, S. 105658, Okt. 2023, doi: 10.1016/j.ibiod.2023.105658.
- [63] W. K. Hofbauer und G. Gärtner, *Mikrobielles Leben auf Fassaden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023. doi: 10.1007/978-3-662-67094-1.

## 8.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.	Wärmedämmverbundsystem mit Algenbiofilm .....	7
Abbildung 2.	Vision einer Biofilmfassade.....	9
Abbildung 3.	Stand der Forschung oben links: [34].: Biorezeptiver Beton – Entwicklung des Bewuchses unter optimalen Bedingungen oben rechts: [23] Poikolohydric Living Wall, Bartlett School of Architecture, unten links: Moosmaschine der Wohnungsgenossenschaft Gartenheim, Hannover [41], unten rechts: Algae infused tiles des Bio-ID Lab der Bartlett School of Architecture [42] .....	12
Abbildung 4.	Nicht steriler Laborversuchsaufbau zur künstlichen Bewitterung von Baustoffproben (Bild BAM).....	15
Abbildung 5.	Skaliertes Medium des Algenstammes Klebsormidium flaccidum, links: Fotografie der Kultur, rechts: Wachstumsrate .....	21
Abbildung 6.	Versuchsschema zur Multispezies-Biofilmentwicklung.....	22
Abbildung 7.	Biofilmentwicklung auf verschiedenen Nährmedien.....	23
Abbildung 8.	Biofilmentwicklung auf den Nährmedien MEA (Links), BBM (Mitte), und Wasser-Agar (rechts) .....	23
Abbildung 9.	Mikroskopische Aufnahme der Modellbiofilme auf dem Wasser-Agar links: hohe Konzentration an Organismen, rechts niedrige Konzentration an Organismen .....	24
Abbildung 10.	Wachstum von Jaagichlorella sp. (3 unterschiedliche Zelldichten) auf Agar-Water (links), BBM (Mitte und MEA (rechts) bei pH = 8, Vergleich Ausgangszustand (oben) und Zustand nach 24 Tagen (unten), Scans mit einer Auflösung von 2400 dpi. (A) 0 h, (B) 288 , (C)576 h.....	26
Abbildung 11.	Schema zur Entwicklung der Betonsubstrate.....	28
Abbildung 12.	Texturierte Betonoberflächen aus UHPC aus dem Forschungsprojekt Funktionsbeton links Scans der originalen 10 x 10 cm Betonplatten, rechts Beschreibung der Textur.....	29
Abbildung 13.	Probenherstellung Stufe 2: AbiFA; Links: mit dem Frischbeton befüllte Schalungen, rechts: nach 28-tägiger Lagerung in Kalkwasser ausgehärtete Prüfkörper.....	30
Abbildung 14.	Prüfkörper S2-UG ( U-grooved) mit zwei verschiedenen Texturen unterschiedlicher Größenordnung, die durch Fräsen hergestellt wurden, oben: Skizze mit den geometrischen Angaben, unten: Fotografie .....	31
Abbildung 15.	Fotografien der beschleunigt karbonatisierten Proben (Bild links) im Vergleich zu den natürlich karbonatisierten Proben (Bild Mitte und rechts) nach dem Besprühen mit 1 %iger Phenolphthaleinlösung. Die lila gefärbten Bereiche kennzeichnen einen pH > 9. ....	32
Abbildung 16.	Probenpräparation für die pH-Wert-Messung .....	35
Abbildung 17.	Entwicklung des ph-Werts von ILB, Vergleich der Proben 1 (natürliche Karbonatisierung 28 Tage) und 2 (natürliche Karbonatisierung 56 Tage) mit Probe 3 (beschleunigte Karbonatisierung für 91 Tage) jeweils als festes Substrat und im aufgemahlenen Zustand .....	36

Abbildung 18.	Gesamtporosität der untersuchten Betonsubstrate .....	37
Abbildung 19.	Aufteilung der Poren in unterschiedliche Porenklassen .....	38
Abbildung 20.	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Wasseraufnahme .....	39
Abbildung 21.	Wasseraufnahme aufgetragen über die Wurzel der Zeit .....	40
Abbildung 22.	Sorptionskoeffizienten bestimmt für den linearen Anstieg der flächenbezogenen Wasseraufnahme nach 5, 10 und 30 Minuten .....	40
Abbildung 23.	Massezunahme über die Zeit für die beiden Prüfkörperserien Referenz und ILB (Mittelwert aus 3 Prüfkörpern) .....	43
Abbildung 24.	Abgewitterte Masse über die Zeit für die beiden Prüfkörperserien Referenz und ILB (Mittelwert aus 3 Prüfkörpern).....	44
Abbildung 25.	Masseentwicklung der Prüfkörperserien Referenz und ILB mit zunehmender Anzahl der Frost-Tauwechsel.....	44
Abbildung 26.	photografische Dokumentation der Prüfkörper vor und nach dem Test der Frost-Tausalzbeständigkeit.....	45
Abbildung 27.	Wachstum von Klebsormidium flaccidum auf UHPC Vorhangstruktur von 30.06.2022 bis 05.08.2022 (oben) von Chlorella vulgaris auf UHPC Vinidur von 30.05.2022 bis 23.07.2022 (Mitte) und von Neochloris vigensis auf UHPC Vinidur von 30.05.2022 bis 23.07.2022 (unten) .....	46
Abbildung 28.	Proben in Petrischalen im Wachstumsschrank .....	49
Abbildung 29.	Durchführung einer PAM-Messung im Labor (links) sowie im Freien (rechts). Das schwarze Textil dient der Dunkeladaption des Messbereichs .....	50
Abbildung 30.	lokal starke Veränderung der Grundfluoreszenz nach Dunkeladaption über die Zeit und Lokalisierung der betroffenen Flächen über das Livebild .....	50
Abbildung 31.	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Adhäsion des Biofilms an der Substratoberfläche.....	51
Abbildung 32.	links: Entwicklung der Biomasse über die Zeit und rechts: Entwicklung des Yieldwerts über die Zeit im Experiment 1 (Einfluss von pH-Wert und Biofilm) .....	52
Abbildung 33.	links: Entwicklung der Biomasse über die Zeit und rechts: Entwicklung des Yieldwerts über die Zeit im Experiment 2 (Einfluss von pH-Wert und Biofilm) .....	53
Abbildung 34.	Entwicklung des Yieldwerts über die Zeit für die künstlich carbonatisierten Proben im Experiment 2 (Einfluss des Biofilms und der Nährstoffe) .....	54
Abbildung 35.	Vergleich zwischen der Vitalität der Algen im Biofilm ( $F_v/F_m$ ) unmittelbar vor der Sprühbelastung und der Abnahme des Biofilms durch die Belastung ( $\Delta F_0$ ) .....	55
Abbildung 36.	Vergleich zwischen der Vitalität der Algen im Biofilm ( $F_v/F_m$ ) unmittelbar vor der Sprühbelastung und der Algenbiomasse nach der Sprühbelastung quantifiziert über den Parameter $F_0$ .....	56
Abbildung 37.	Durchschnittlicher pH-Wert (nach 2 Stunden) aufgetragen gegen die zu Versuchsende gemessene Vitalität ( $F_v/F_m$ -Wert) nach 41 Tagen in beiden Versuchen .....	57

Abbildung 38.	Betonsubstrate im oberen Drittel bestrichen mit einer Suspension aus aufkonzentrierten Algen ( <i>Chlorella Vulgaris</i> ), links Substrat S2AW (säuregewaschen), rechts S2SB (sandgestrahlt) .....	58
Abbildung 39.	Bewitterungsstand auf dem Stammgelände der BAM in Berlin Steglitz .....	59
Abbildung 40.	fotografische Dokumentation einer mit <i>Chlorella</i> -Suspension beimpften Proben .....	59
Abbildung 41.	Übersicht der freibewitterten Proben zur Messung von Gasaustausch und Schadstoffbindung (Bilder: Solga) .....	61
Abbildung 42.	Verlauf der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte gemessen mit einem Thermo-Hygrometer während der Freibewitterung. Die rote Linie stellt das Temperaturprofil dar, die blaue Linie die relative Luftfeuchtigkeit (Bild: Solga) .....	62
Abbildung 43.	Aufbau der Gasaustauschmessung. Schematischer Überblick über das CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> -Gasaustauschmesssystem mit Arduino-Schnittstelle und Datenspeicherkonfiguration (Bild: Solga) .....	63
Abbildung 44.	Fotodokumentation des Prüfkörpers 1: Standardmörtel (SM-2) sandgestrahlt über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga) .....	64
Abbildung 45.	Fotodokumentation des Prüfkörpers 3: Wandfliese aus Terrakotta über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga) .....	64
Abbildung 46.	Fotodokumentation des Prüfkörpers 5: Fassadenputz über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga) .....	64
Abbildung 47.	Fotodokumentation des Prüfkörpers 8: Standardmörtel (SM-2) säuregewaschen über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga) .....	65
Abbildung 48.	Fotodokumentation des Prüfkörpers 11: UHPC mit Baumrindenstruktur / Beschichtung Leonhard Kurz über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga) .....	65
Abbildung 49.	Fotodokumentation des Prüfkörpers 11: Kalziumsilikat über die 14-tägige Bewitterung (oben links Tag 1 bis unten rechts Tag 14) (Bilder: Solga) .....	65
Abbildung 50.	Abnahme der CO <sub>2</sub> -Konzentration in ppm über den Messzeitraum von 30 Minuten an Tag 1 (Bild: Solga) .....	66
Abbildung 51.	Abnahmegeschwindigkeit der CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Versuchskammer an den Untersuchungstage 1, 7 und 14 (Bild: Solga) .....	67
Abbildung 52.	Grundfluoreszenz nach Dunkel- (F <sub>0</sub> ) sowie Lichtadaption (F <sub>0</sub> ) gemessen an den Untersuchungstagen 7 und 14 (Bild: Solga) .....	67
Abbildung 53.	Vitalität der Algen nach Dunkel- (FV/Fm) sowie Lichtadaption (FV'/Fm') gemessen an den Untersuchungstagen 7 und 14 (Bild: Solga) .....	68
Abbildung 54.	Schematische Darstellung der Bewertung der PM-Reduktion.) (Bild: Solga) .....	69
Abbildung 55.	Fotografische Ansicht des Versuchsaufbaus. Die PM-Sensoren wurden aus Gründen der Stabilität und der einfachen Konfiguration auf einer Stecktafel montiert (Bild: Solga) .....	69

Abbildung 56.	Reduktion der Feinstaubpartikel der Größen PM 1, PM 3 und PM 10 nach Passieren der Prüfkammer. Die Messung erfolgte nach Abschluss der Bewitterung im Freien. (Bild: Solga).....	70
Abbildung 57.	Presse-Info des Deutschen Instituts für Textil und Faserforschung vom 30.06.2023: Rain retaining wall verbindet Nachverdichtung mit Hochwasserschutz (Bild: Presse-Info DITF).....	70
Abbildung 58.	links: Überblick Messaufbau Thermografiekamera, rechts Betonsubstrat und Referenzfläche an Waage befestigt. ....	71
Abbildung 59.	Verlauf der Oberflächentemperatur von SM 2 (Mittelwert der analysierten Fläche, Daten driftbereinigt) sowie des Masseverlusts über die Zeit (rote Kurve) .....	71
Abbildung 60.	Thermografieaufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Messung (links Betonsubstrat SM 2, rechts Referenz aus Kunststoff) .....	72
Abbildung 61.	Masseverlust der Betonsubstrate über die ersten 72 h nach Sättigung.....	73
Abbildung 62.	Zeiträume der einzelnen Betonsubstrate, in denen die Oberflächentemperatur nach Sättigung durch Verdunstung reduziert wird .....	73
Abbildung 63.	Systemskizze der mit WUFI® berechneten Konstruktion, Quelle BAM .....	74
Abbildung 64.	Differenz der Oberflächentemperatur zwischen Referenz und bewässertem Substrat über den Zeitraum 01.06. bis 30.09.23; Quelle: BAM .....	75
Abbildung 65.	Differenz des Feuchtestroms über die Außenoberfläche zwischen Referenz und bewässertem Substrat über den Zeitraum 01.06. bis 30.09.23, Quelle: BAM .....	76
Abbildung 66.	Probennahme P1-8 Mäusebunker (oben links: Ostfassade, oben rechts: Nordfassade, unten Westfassade); Quelle der Ansichten aus virtuellem Modell von Alexis Dworski, <a href="https://www.alexisdworsky.de/3d-maeusebunker_dworsky.pdf">https://www.alexisdworsky.de/3d-maeusebunker_dworsky.pdf</a> .....	78
Abbildung 67.	Probennahme auf dem Stammgelände, links Betonrampe (P9-12), rechts Witterungsstand I (P14-17) .....	78
Abbildung 68.	Witterungsstand II auf dem BAM Stammgelände mit Markierung der Probennahmen 18-21 Bild 19a: Zustand der von Solaga beimpften Prüfkörper am 14.12.24 (ca. 3 Wochen vor Probenahme) .....	79
Abbildung 69.	Unterteilung der Domäne der Eukaryoten von links nach rechts in Reich, Stamm (Abteilung), Klasse, Ordnung, Familie und Gattung .....	83
Abbildung 70.	Bubbleplot der Eukaryoten (18 S-Daten) auf dem Level der Familien, gefärbt und sortiert nach Stämmen. Die Größe der Bubble zeigt die relative Häufigkeit innerhalb der Probe, links Proben Mäusebunker, rechts Proben BAM-Gelände (rotes Kästchen: Probe 19, bimpft mit Klebsormidium von Solaga, blaues Kästchen: Probe 21: WDVS).....	83
Abbildung 71.	Unterteilung der Domäne der Prokaryoten von links nach rechts in Reich, Stamm (Abteilung), Klasse, Ordnung, Familie und Gattung .....	84
Abbildung 72.	Bubbleplot der Prokaryoten (16 S-Daten) auf dem Level der Familien, gefärbt und sortiert nach Stämmen. Die Größe der Bubble zeigt die relative Häufigkeit innerhalb der Probe, links Proben Mäusebunker, rechts Proben BAM-Gelände, durch schwarze Kästchen hervorgehoben sind Familien, die selektiv auf ausgewählten Substraten vorkommen .....	84



Abbildung 73.	Diversität der Proben für die Eukaryoten dargestellt als Alpha Diversität, links "Observed", rechts "Chao" schwarz markiert sind die Proben vom Mäusebunker, rot markiert sind die Referenzen PK 13: Kunststoff, PK 19: Prüfkörper beimpft von Solaga und PK 21: WDVS, blau markiert sind die Betonproben, die erst seit 2 Jahren (PK 20) bzw. seit 1 Jahr (PK 18) exponiert sind.....	86
Abbildung 74.	Diversität der Proben für die Prokaryoten (16S-Daten) dargestellt als Beta-Diversität (PCoA) rot markiert sind die Referenzen PK 13: Kunststoff, PK 19: Prüfkörper beimpft von Solaga und PK 21: WDVS, blau markiert sind die Betonproben, die erst seit 2 Jahren (PK 20) bzw. seit 1 Jahr (PK 18) exponiert sind.....	87
Abbildung 75.	Auswertung Datensatz Mäusebunker: Beta-Diversitätsanalyse (PCoA) der mikrobiellen Gemeinschaften der Prokaryoten.....	87
Abbildung 76.	Arbeit an den Entwurfsskizzen und gemeinsame Diskussion der Ideen (Quelle: TUD/SGB).....	89
Abbildung 77.	In den Fragebogen integrierte Fassaden zur Bewertung der ästhetischen Wirkung des Biofilms, von oben nach unten: Gebäude 1,2,3, und 4 (Quelle: TUD/SGB).....	90
Abbildung 78.	Perspektive des Schulgebäudes, das als Grundlage für die Entwurfsskizzen diente (Quelle: TUD/SGB).....	92
Abbildung 79.	Ausgewählte Entwurfsideen.....	94
Abbildung 80.	Ausstellung „wechsel Stoff wechsel“ in der BDA Galerie Berlin, links Substrate mit Algenbiofilmen.....	95

## 8.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.	Vergleich der Laborversuchsreihen von Solaga / BAM in Abhängigkeit der wichtigsten Parameter zur Bewertung der Biorezeptivität .....	16
Tabelle 2.	Übersicht ausgewählter potenziell geeigneter Algen .....	20
Tabelle 3.	Prüfkörpermatrix der Stufe 2: AbifFA Phase 1 .....	30
Tabelle 4.	Prüfkörpermatrix für alle 3 Stufen (weiß hinterlegt: Stufe 1 / Projekt Funktionsbeton, gelb hinterlegt: Stufe 2 / AbifFa Phase 1, grün hinterlegt Stufe 3 / AbifFa Phase 2) .....	33
Tabelle 5.	Auf den Betonsubstraten gemessene pH-Werte nach 2 Stunden Wasserkontakt .....	35
Tabelle 6.	Anteil der Kapillarporen in % sowie in mL/g .....	38
Tabelle 7.	Anforderungen an Betone, die durch Frostangriff mit oder ohne Taumittel belastet werden (Expositionsklasse XF) .....	42
Tabelle 8.	Übersicht der faktoriellen Versuchsplanung, links: Experiment 1, rechts: Experiment 2.....	48
Tabelle 9.	Auswertung der Varianzanalyse mit der Software ANOVA für den Versuch 1, links: Parameter Biomasse ( $F_0$ ), rechts Parameter Vitalität / Yield ( $F_v/F_m$ ) .....	53
Tabelle 10.	Auswertung der Varianzanalyse mit der Software ANOVA für den Versuch 2, links: Parameter Biomasse ( $F_0$ ), rechts Parameter Vitalität / Yield ( $F_v/F_m$ ) .....	54
Tabelle 11.	Auswertung der Varianzanalyse mit der Software ANOVA ausschließlich für die carbonatisierten Proben des Versuchs 2, Parameter Vitalität / Yield ( $F_v/F_m$ ).....	55
Tabelle 12.	Übersicht Probeentnahmestellen für Biodiversitätsanalyse Referenzproben sind kursiv dargestellt .....	81
Tabelle 13.	Ergebnis der Auswertung des Fragebogens zur Wahrnehmung von Fassaden, die ungewollt einen Biofilm aufweisen (Quelle: TUD/SGB).....	91
Tabelle 14.	Ergebnis der Auswertung des Fragebogens zum Einfluss unterschiedlicher Gestaltungsparameter auf die ästhetische Qualität von Biofilmfassaden (Quelle: TUD/SGB) .....	92
Tabelle 15.	Ergebnis der Auswertung des Fragebogens zum Einfluss unterschiedlicher Gestaltungsparameter auf die ästhetische Qualität von Biofilmfassaden (Quelle: TUD/SGB) .....	93