

**Zeitschrift:** Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft  
**Herausgeber:** St. Gallische Naturwissenschaftliche Gesellschaft  
**Band:** 89 (2000)  
  
**Artikel:** Biofilme und sichtbarer Bewuchs bei Bauwerken  
**Autor:** Raschle, Paul  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-832587>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Biofilme und sichtbarer Bewuchs bei Bauwerken

Paul Raschle

### Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	267
1. Einleitung .....	268
2. Bewuchs durch Mikroorganismen und «Makrobionten» .....	269
3. Patina, Bewuchs und Stoffumsetzung .....	271
4. Voraussetzungen für Pilzwachstum, ein Fall von Biomonitoring .....	272
5. Algen-, Pilz- und Flechten- wachstum an einer Fassade .....	273
6. Mikrobiell verursachte Korrosion in Wasserkreisläufen .....	275
7. Bewuchs an Mörtel im Trinkwasser- bereich oder Schwimmbad .....	276
Literaturverzeichnis .....	278

### Zusammenfassung

Die Mikrobiologie befasst sich mit mikroskopisch kleinen Lebewesen, die aber durch Massenvermehrung oder Biofilmbildung sichtbar werden können. Die Mikrobiologie im Bauwesen untersucht Fragen des Zusammenstehens von Mikroorganismen – Algen, Bakterien, Flechten, Pilze – mit den entsprechenden Baustoffen und Systemen. Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC) von Metall, von mineralischen Baustoffen, aber auch von organischen Materialien ist eine bekannte, doch oft vernachlässigte Schadensursache. Dies beruht auf der Tatsache, dass es sehr schwierig ist, mikrobiellen Bewuchs und Korrosion einander klar zuzuordnen. Korrosion ist ein umfassender Begriff. Mikrobiell verursachte Korrosion unterscheidet sich von anderen Korrosionstypen nicht im Ergebnis, jedoch in der Ursache.

Zwei Projekte befassen sich mit diesen Fragen, nämlich ein Projekt zur Untersuchung von Pilzen und Algen an Fassaden und entsprechenden Schutzmassnahmen sowie das COST-Projekt zur Analyse von sich an Fassaden entwickelnden Biofilmen.

Materialalterung durch mikrobiellen oder andern Bewuchs ist immer gegenwärtig. Durch Kenntnisse einerseits der Organismen und ihrer Lebensansprüche und anderseits der Materialien ist es möglich, die Be-

deutung mikrobiell verursachter, also indirekt auch <umweltverursachter> Alterung zu beschreiben und bekanntzumachen. Dies soll dazu beitragen, vorzeitige Schäden zu verhindern und möglichst auszuschliessen.

Mikrobenwachstum und mikrobielle Materialprobleme sind immer eine Konsequenz von zuviel Feuchtigkeit am falschen Ort. Dies ist im Holzschutz längst bekannt. Je stärker weitere organische Stoffe im Bauwesen Verbreitung finden, umso wichtiger ist dieses Wissen und die Kenntnis der möglichen Organismen und ihrer Lebensansprüche.

## 1. Einleitung

Bewuchs durch Algen, Bakterien, Pilze, Flechten, Moose und Samenpflanzen an Bauwerken kann unter ganz verschiedenen

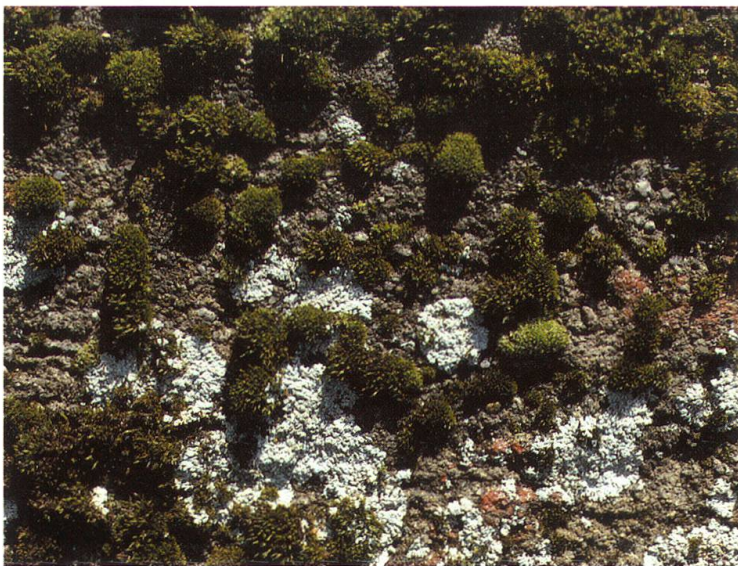


Abbildung 1:  
Bewuchs einer Beton-Stützmauer.

Aspekten betrachtet werden. Eine Stützmauer aus Beton gewinnt in den Augen der meisten Betrachter durch Moos- und Mikroorganismenbewuchs an Ästhetik (Abb. 1). Algenwachstum an einer neu renovierten Fassade wird dagegen eher als störend empfunden. Bewuchs im Wasserkreislauf einer Zentralheizung muss unerwünscht sein, weil dieser neben Verstopfen auch zu Korrosion führt. Bewuchs am Mörtel im Schwimmbad oder Trinkwasserspeicher wird sowohl unter dem gesundheitlichen, ästhetischen wie auch materialorientierten Aspekt zu beurteilen sein.

Gegenwärtig findet eine Begriffsneubildung statt. Bewuchs wird auch als Biofilm verstanden, der sich aus Organismen und verschiedenen Beimengungen zusammensetzt. Diese Beimengungen, sogenannte extrazelluläre polymere Stoffe (oder EPS) sorgen dafür, dass sich ein Biofilm, beginnend aus Einzelzellen und Einzelorganismen, bildet. Sowohl prokaryontische Organismen (wie Bakterien und Archaeobakterien) als auch Eukaryonten (wie Grünalgen und Pilze) bilden solche EPS (FLEMMING ET AL. 1999). Prokaryonten sind Mikroorganismen ohne eigentlichen Zellkern, Eukaryonten besitzen einen Kern. Während frühere Auffassungen EPS hauptsächlich als polysaccharide Stoffe (polymere Zucker) betrachteten, wird der Begriff heute breiter gefasst. EPS-Bildung ist eine generelle Eigenschaft dieser Mikroorganismen in natürlicher Umgebung und umfasst im Sinne von Flemming auch Eiweisse, Nukleinsäuren, Lipide, Huminstoffe. Unerwünschte Biofilme werden auch als Biofouling zusammengefasst und sind von solcher Bedeutung, dass ein eigenes COST-Programm 520 mit dem Titel <Biofouling and Materials> gegenwärtig die europäische Forschung zusammen- und dadurch weiterbringt. COST ist der Begriff für die Europäische Zusammenarbeit im Bereich der wissenschaftlichen und technologischen Forschung.

Eine Arbeitsgruppe im COST-Programm 520 befasst sich mit materialorientierten

Problemen solcher Biofilme oder eben mit «Biofouling». Während mikrobiell verursachte Korrosion bei Metallwerkstoffen seit einigen Jahren auch in der Materialwissenschaft anerkannt und bekannt ist, haben im Rahmen dieses Projekts neu auch Beton, Mörtel, Mauerwerk usw. im Bereich Biofilme und Biofouling Platz gefunden. Dies betrifft ein Arbeitsgebiet der Abteilung Biologie der EMPA St.Gallen, den Arbeitsschwerpunkt «Mikrobiologie im Bauwesen».

Mikrobielle Biofilme können völlig unsichtbar sein. Der Beginn ihrer Entstehung ist fürs unbewehrte Auge nie zu sehen. Oft aber entwickelt sich aus solch unsichtbarem Initialbewuchs später ein sichtbarer Bewuchs.

Abbildung 2:  
Bewuchs einer Fassade/  
begrünte Fassade.

Der folgende Artikel befasst sich mit diesen Fragen, einigen Beispielen von Bewuchs und deren Hintergründen.

## 2. Bewuchs durch Mikroorganismen und «Makrobionten»

Alle bewuchsbildenden Organismen können in Mikroorganismen und Makrobionten (makroskopisch sichtbare Lebewesen) unterteilt werden. Makrobionten als Bewuchsbildner werden auch bewusst gepflanzt. Spalierpflanzen an einer Fassade, aber auch Efeu oder sich mit Haftorganen festsetzende Reben sind solche Beispiele (Abb. 2). Makrobionten werden sehr unterschiedlich beurteilt. Oft wird solcher Bewuchs sogar in Bezug auf das gleiche Kriterium verschieden gewertet oder gewichtet. Im Botanischen



Garten St.Gallen demonstrierte vor wenigen Jahren eine Ausstellung, wie eine Efeu- oder andere Fassadenbegrünung die Fassade vor Regeneinwirkung schützen kann. Doch es gilt ebenso, dass dadurch die Besonnung verhindert wird und sich so ein oft feuchteres Mikroklima an der Fassade einstellen kann.

Auch eine Verbindung zwischen mikrobiellem und makrobiontischem Bewuchs ist möglich. In einem Fall war eine Fassade aus Jura-Kalkstein jahrelang von wilden Reben bewachsen. In einer folgenden Renovierung der Fassade wurde diese vom Bewuchs gereinigt. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass solche Haftorgane kaum vollständig entfernt werden können. Wenige Jahre nach der ers-

ten Restaurierung war wieder eine partielle Instandsetzung nötig. Dabei erwiesen sich aus Distanz sichtbare dunkle punktartige Flecken an der Fassade als Pilzkolonien. Diese hatten ihren Ausgangspunkt in Rückständen von Reben-Haftorganen. Organisches Material ist mikrobiell (<biologisch>) abbaubar und wird durch diese Mineralisierung wieder zu Nahrung für andere Lebewesen. Sukzessionen von Mikroorganismen sind also Ursache und Folge solchen Abbaus organischer Substanz. Die einen Mikroorganismen sind Mineralisierer, andere leben von diesen Abbauprodukten.

Wachstum und Zellvermehrung ist immer an das Vorhandensein von Nahrung im System gebunden. Wenn Nahrung und die als Träger für Bewuchs in Frage kommende Oberfläche vorhanden sind, dann muss im weiteren noch ein günstiges Wachstums-

Tabelle 1:  
Lebensansprüche einiger physiologischer Gruppen von Bewuchsbildnern an Bauwerken.

	Kohlenstoffquelle	Energiequelle
Algen und Blaualgen	Alle aerophytischen oder Luftalgen sind wie die grünen Pflanzen Verwerter von CO <sub>2</sub> .	Mit Hilfe von Lichtenergie betreiben sie Photosynthese und produzieren so wieder organische Materie.
Bakterien	Bakterien sind in Bezug auf ihren Stoffwechsel sehr unterschiedlich. Organotrophe Lebewesen verwerten organisch gebundenen Kohlenstoff, lithotrophe Bakterien benötigen wie Algen auch CO <sub>2</sub> als Haupt-C-Quelle.	Nicht photosynthetisierende Bakterien gewinnen die lebensnotwendige Energie aus Redox-Reaktionen, der biochemischen Umsetzung energiehaltiger Verbindungen. Als Regel gilt, dass der aerobe Abbau energiemässig günstiger anzusehen ist.
Pilze	Pilze sind chemo-organotroph, benötigen also Kohlenstoff in Form organischer Stoffe.	Abbau energiereicher organischer Materie.
Flechten	Entstehen aus der Symbiose einer Alge und eines Pilzes. Der Pilz lebt von Syntheseprodukten der Alge und die Alge lebt im <Biotop> des Pilzes.	Von aussen muss Lichtenergie zufließen, um der Alge ihre Ansprüche zu erfüllen.
Moose und Makrophyten	Als <grüne Pflanzen> verwerten sie das CO <sub>2</sub> der Luft.	Photosynthese braucht Sonnenlicht als Energiequelle.

Bakterien, Algen und Pilze (Mikroorganismen) benötigen eine hohe Material- oder Luftfeuchtigkeit, um diese Stoffwechselleistung vollbringen zu können. Auch Moose und Makrophyten brauchen Wasser, das hier aber über Wurzeln oder diese entsprechenden Organe aufgenommen wird. Das im Substrat vorhandene *verfügbare Wasser* entscheidet über Bewuchs oder Bewuchsfreiheit einer Fassade oder eines Baustoffes.

klima vorhanden sein und es müssen die für Bewuchs möglichen Organismen vorkommen, damit sich diese festsetzen und vermehren können

Es ist möglich, dass die Unterlage gleichzeitig auch Nahrung ist. Doch auch auf völlig inerten Oberflächen kann sich ein Bewuchs bilden, wie das oben genannte Beispiel von Jura-Kalkstein zeigt. Auch Staub enthält organisches Material und wird so Nahrung für Destruenten (Abbauer organischer Materie). Bewuchs benötigt in jedem Fall eine Kohlenstoff- und eine Energiequelle. Diese können identisch oder verschieden sein. Das heisst: es finden sich immer Mikroorganismen, denen die gebotenen Nahrungsverhältnisse zusagen, vorausgesetzt, es kommt eine ausreichende Feuchtigkeit vor (Tabelle 1).

Dieses Wissen um die Lebensansprüche von Mikroorganismen hat im traditionellen Holzbau zu Normen und Feuchtigkeitsgrenzwerten geführt, die eingehalten sein müssen, bevor Holz im Innenausbau verbaut wird. Schlagfrisches Holz hat noch zu viel Feuchtigkeit, erst durch Trocknen wird es zum wertvollen Baustoff.

### 3. Patina, Bewuchs und Stoffumsetzung

KRUMBEIN (1968) war einer der Pioniere, der sich mit der mikrobiellen Gesteinsverwitterung befasste und später auch die Begriffe Patina und Mikrobenmatte für mikrobielle Oberflächenphänomene an Kulturgut beschrieben hat. Er hat festgestellt, dass die als Patina beschriebene Ansicht z. B. am Kulturgut der Säulen der Akropolis biogenen Ursprungs ist. Rötliche, aber auch diverse andere Farbveränderungen wurden in einen Zusammenhang mit mikrobiellem Bewuchs und Stoffwechsel gestellt.

Auch STERFLINGER (1995) hat sich mit diesem Phänomen, insbesondere dem dunklen Belag dieser Bauwerke befasst und neue mikrobiologische Methoden der Bauwerkuntersuchung eingeführt, zum Beispiel den molekularbiologischen In-situ-Nachweis und

gleichzeitige Bestimmung von Pilzen am Bauwerk. Viele dieser dunkel gefärbten Pilzkolonien auf Stein und mineralischen Baustoffen sind mit einem sehr geringen Nährstoffangebot zufrieden.

Auch liebgewordene Ansichten können sich als mikrobieller Bewuchs entpuppen, wie etwa die Untersuchung der Deckengemälde im Kloster Einsiedeln vor ihrer Gesamtrestaurierung gezeigt hat (RASCHLE 1983). In diesem Fall wurde festgestellt, dass spätere Übermalungen der originalen Freskomalerei zusammen mit benutzerbedingter Feuchtigkeit zu einer «Patina» der Decke geführt haben, welche entfernt werden musste, um nicht die originale Malerei zu gefährden. Laborexperimente mit den von der bemalten Decke isolierten Pilzen haben gezeigt, dass diese insbesondere bei reichem Nährstoffangebot wachsen und gedeihen können (Abb. 3).

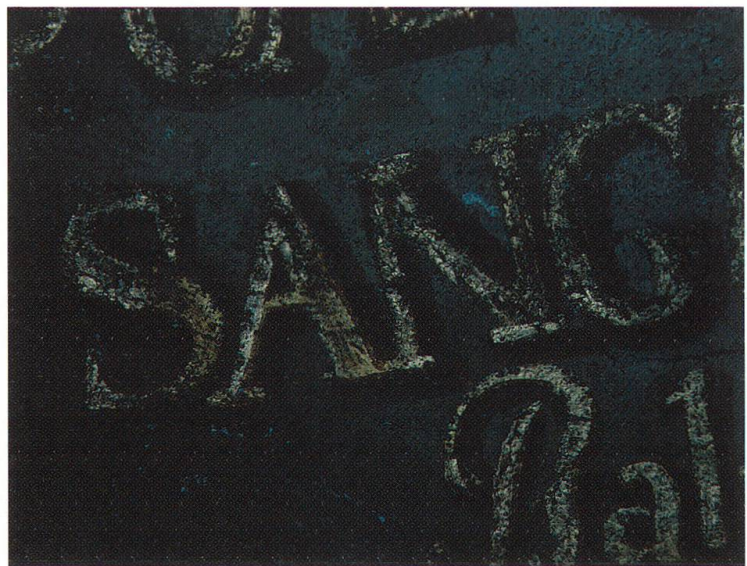
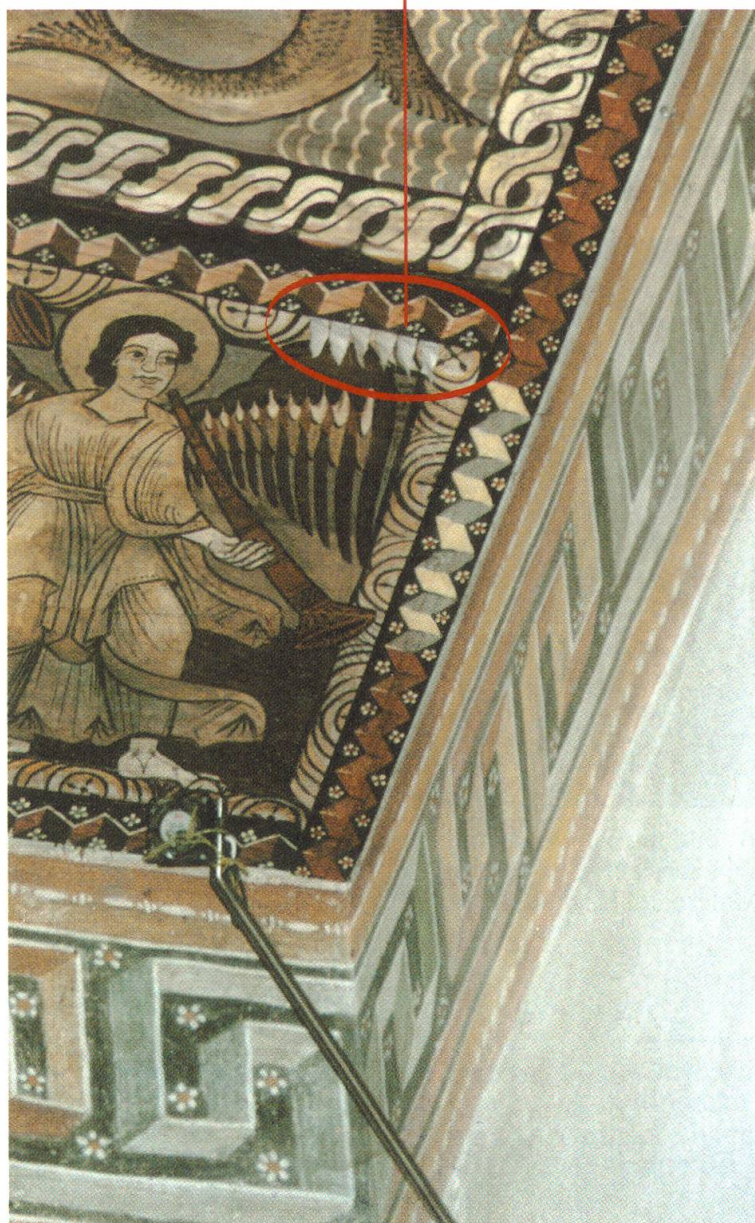


Abbildung 3:  
Bewuchs auf nährstoffreicher  
Malerei an Deckenmalerei.

In diesem Arbeitsfeld der Mikrobiologie stellen sich oft die gleichen zwei Fragen: 1. Woraus besteht der Bewuchs? 2. Was bedeutet dies für das Bauwerk oder Kulturgut? Dies sind auch Teilaspekte der biologischen Untersuchungen im COST-Projekt 520. Zur Bedeutung des Bewuchses kann aus diesem Projekt noch nichts gesagt werden. Dazu müssen vorläufig noch die bestehenden Literaturauswertungen genügen.

Abbildung 4:  
Baumwollstreifen als Bio-  
monitore zur Erfassung von  
pilzförderlichem Klima.

Hängende Monitore.



#### 4. Voraussetzung für Pilzwachstum, ein Fall von Biomonitoring

Im Labor verwendet die Mikrobiologie sogenannte Feuchtkammertestverfahren, um die Anfälligkeit von Werkstoffen gegenüber Pilzwachstum zu analysieren. Dabei wird auch immer ein Kontrollversuch durchgeführt, der sicherzustellen hat, dass in der verwendeten Feuchtkammer Bewuchs möglich ist, das heisst, dass die klimatischen Voraussetzungen Bewuchs erlauben.

Aus solch normierten Verfahren (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 1988) stammen mit Chemikalien imprägnierte Streifen aus Baumwolle oder Filterpapier als Monitore zur Erfassung des geeigneten Klimas, welches Pilzen Wachstum erlaubt. Der einfachste, gegenüber der internationalen Norm IEC 68-2-10 bereits leicht weiterentwickelte Monitorstreifen besteht aus Baumwollgewebe, behandelt mit einer wässrigen Lösung von 10 % Glycerin und 0,5–1 % Malzextrakt. Je nach den zu suchenden Pilzen können diese Streifen weiter angepasst, das heisst variiert werden. Im Labor kann dabei unter definierten Klimaverhältnissen bestimmt werden, welcher Bewuchs nach festgelegter Zeit zu erwarten ist.

Dieses Kontrollsystem kann auch verwendet werden, um mit Hilfe solcher Monitore in Gebäuden zu bestimmen, ob Pilzwachstum möglich ist, respektive, wann – vielleicht jahreszeitlich bedingt – mit Pilzproblemen zu rechnen ist (Abb. 4). Biologisches Wissen lassen dieses Monitorsystem beliebig modifizieren, bis hin zu im Materialaufbau dem Original entsprechenden Monitoren. Dadurch wird es möglich, an Monitorplatten oder -proben zu bestimmen, welche Auswirkungen Pilzwachstum nach sich zieht. Dieses Monitor-System einerseits mit Baumwollstreifen sowie andererseits mit bemalten Holztafeln wird zurzeit an der Kirchendecke in Zillis GR angewandt, um die Kenntnisse über kritische Klimaperioden zu mehrern und in der Folge solche Gefahren auszuschliessen

(RASCHLE 2000). Die Integrität des Originals verbietet es, am Kulturgut selbst diese materialzerstörenden Experimente durchzuführen. An ihre Stelle treten dann Monitore.

### **5. Algen-, Pilz- und Flechtenwachstum an einer Fassade**

Es ist eine spannende Arbeit, Bewuchs auf ihre auslösenden Faktoren zu analysieren. Algen, Pilze und Flechten gehören zu unterschiedlichen physiologischen Gruppen der «Mikroorganismen». In Freilandbewitterungsversuchen durch BAGDA ET AL. (1999) wurde festgehalten, dass sich an definierten Anstrichen und Putzen Sukzessionen einstellen. Es dauerte einige Zeit bis zum Erscheinen von dunklen Pilzkolonien und nochmals weitere Zeit bis sich grün gefärbte Algenkolonien zeigten. Aus der Praxis wissen wir zudem, dass sich dann, wenn Algen und Pilze vorhanden sind, möglicherweise auch Flechten entwickeln. Eigene Beobachtungen deuten an, dass beide Wege vorkommen, dass sich Algen in bestehenden Pilzrasen etablieren und dann die Flechtenbildung beginnt, oder dass sich in grünen Algenfilmen Pilzsporen festsetzen, keimen und in Symbiose mit den Algen treten. Im Rahmen der eigenen laufenden COST-Untersuchungen sollten hier weitere Kenntnisse anfallen (NAY ET AL. [1999]; RASCHLE ET AL. [1999]). Dabei interessieren insbesondere die Sukzession von Biofilmorganismen, der erste Beginn eines Biofilms und seine späteren Entwicklungspotentiale. Aus einem früheren nationalen Forschungsprojekt (WEIRICH 1988; WEIRICH 1989; RASCHLE ET AL. 1989) sind die über die Luft an die Fassaden transportierten Bakterien- und Pilzarten bekannt, doch fehlt das Wissen, wie aus der unsichtbar vorhandenen «Flora» schliesslich sichtbarer Bewuchs verschiedener Zusammensetzung entsteht.

Es gilt immer, dass Feuchtigkeit der auslösende Faktor für Biofouling an der Fassade ist. Die Analyse von gegebenen Situationen

zeigt denn auch, dass zum Beispiel Bewuchs und die konstruktive Situation einer Fassade zusammenhängen. Bei Schlagregen fehlt Bewuchs unter jedem Dachvorsprung, aber auch unter jedem Fenstersims. Ein Bild vom Regierungsgebäude im Klosterbezirk St.Gallen illustriert dies (Abb.5): Teile des Mauersockels, welche Schlagregen erhalten, zeigen auffallenden Flechtenbewuchs, die vor Regen geschützten Teile dieser ost-exponierten Fassade (Mauersockel) sind frei von sichtbarem Bewuchs.

Auch der Bewuchs an vorstehenden Teilen von Betonpfeilern einer Turnhalle im Riet-



Abbildung 5:  
Bewuchs an Mauersockel.



Abbildung 6:  
Turnhallenansicht bei Regen.

Abbildung 7:  
Bewuchs der gleichen Turnhalle 12 Jahre später.



hüsli (St.Gallen) lässt sich mit Regeneinwirkung erklären. Dies fällt besonders auf, wenn dieselbe Fassade im Abstand von etwa 12 Jahren betrachtet wird. Bei Regen zeigt sich, wo die stark benetzten Partien zu finden sind. Daran hat sich Bewuchs festgesetzt (Abb. 6, Abb. 7).

Neue Erklärungen sind notwendig, um den Grund für Bewuchs an einer verputzten Aussenwärmedämmung (AWD) oder einer hinterlüfteten Faserzement-Schieferfassade zu finden. Eine der Ursachen ist die Folge der Wärmedämmung. Die Isolierschicht dient bestimmungsgemäss dazu, dass die Wärme nicht über die Fassade abstrahlt, die Fassade also kälter ist als vor der Sanierung durch eine AWD.

BLAICH (1999) hat nachgewiesen, dass eine Fassade sich desto stärker abkühlt, je mehr sie nachts dem unbewölkten Nachthimmel entgegenstrahlt. Bauphysikalische Berechnungen unter Einbezug der heutigen und künftigen k-Werte zur Wärmedämmung haben ergeben, dass die jahreszeitliche Dauer dieser nächtlichen Unterkühlung zunimmt, je stärker und effektiver die Isolierschicht gewählt wird. BÜCHLI (1999) hat durch Messungen an frei exponierten Musterplatten (ohne rückseitiges Bauwerk) sowohl in Dübendorf als auch in St.Gallen diese bauphysikalisch bedingte Unterkühlung als unabhängig von der Isolierdicke bestätigt, wenn die Rückseite dem Aussenklima entspricht und die abstrahlende Seite zum Nachthimmel zeigt.

Die Folge dieser nächtlichen Unterkühlung ist Taubildung, wie sie sich in jeder klaren Nacht auch auf dem Dach im Freien parkierter Autos zeigt. Diese physikalische Gegebenheit lässt sich auch bei jedem Velo-stand feststellen. Von einem noch so kleinen Dach überdeckte Velos bleiben trocken. Ein Velo, das sich nur einen Meter entfernt unter freiem Himmel befindet, wird am Morgen einen von Tauwasser bedeckten Sattel aufweisen. Damit schliesst sich der Kreis: Durch Taubildung kann sich eine erhöhte Materialfeuchtigkeit einstellen und

im Falle einer Fassade Bewuchs bewirken (Abb. 8).

Für Algen-, Pilz- und Flechtenwachstum ergeben sich daraus Konsequenzen. Fassadensysteme, die früher bewuchsfrei blieben, können plötzlich Bewuchsprobleme bekommen, wenn die k-Wert-Anforderungen aus Energiespargründen zunehmen. Auch die Exposition einer Fassade ist entscheidend, wenn Gründe für Bewuchs gesucht werden. Falls die nachts anfallende Feuchtigkeit tagsüber durch Besonnung rasch wieder verschwindet, ist die Bewuchsanfälligkeit klein. Wenn jedoch diese Fassade nach Norden oder Nordost orientiert ist, dann fehlt die Möglichkeit der raschen Austrocknung. Aus der Tatsache, dass die Materialzusammensetzung als mögliche Nahrungsquelle gemeinsam mit dem herrschenden Klima, vor allem



Abbildung 8:  
Bewuchs an verputzter  
Aussenwärmedämmung.

der Feuchtigkeit, entscheiden, ob Bewuchs zu erwarten ist, muss der Entwicklung und Verbesserung resistenter Putze und Anstriche ein grosses Gewicht gegeben werden. Denn bei den heutigen aus Energiespargründen nötigen Isolierstärken wird die Fassadenunterkühlung und daraus resultierenden der Bewuchs gefördert.

## 6. Mikrobiell verursachte Korrosion in Wasserkreisläufen

Mikrobiell verursachte Korrosion (MIC) unterscheidet sich nicht von chemischer Korrosion. Der Unterschied liegt in der Korrosionsursache. Korrosion bei Metallen ist ein elektrochemischer Vorgang. Die Ursache solcher elektrochemischer Zellenbildung, nämlich die Entstehung von Potenzialunterschieden beruht jedoch bei MIC in Biofouling.

Rost ist in metallischen Systemen bekannt. Rost ist die Oxidation von Eisen, also ein aerober Vorgang unter Beteiligung von Luftsauerstoff. Wenn im Wasserkreislauf Rost festgestellt wird, dann ist klar, dass Eisen beteiligt und zerstört wird. Im Falle der Zentralheizung wurde darum auf luftdichte Materialien geachtet, um sauerstofffreie Systeme zu garantieren. Doch was bedeutet die Feststellung eines schwarzen Pulvers im Wasserkreislauf? Es gibt dafür zwei mögliche Erklärungen. Entweder handelt es sich um Resten von Bewuchs, also abgelöste Partien eines Biofilms, dessen Komponenten dunkel gefärbt sind, oder es handelt sich um Korrosionsprodukte als Folge von MIC. Ein einfacher Test zeigt, ob Mikroorganismen die Ursache sind. Metallsulfide, zum Beispiel Eisensulfid ist ein schwarzes Pulver. Durch Ansäuern zersetzt es sich in leicht mit der Nase feststellbaren Schwefelwasserstoff.

Woher stammt das Eisensulfid im Wasser. Anaerobe Organismen, im Speziellen sulfatreduzierende Bakterien (SRB), können Schwefelwasserstoff produzieren. Im feuchten Milieu findet unter Bildung von  $H_2$  eine

Polarisierung von Eisen statt. Wenn dabei SRB und  $H_2$  oder andere Wasserstoffdonatoren wie organische Säuren, die bei jeder anaeroben Gärung entstehen, vorkommen, dann zersetzt sich Eisen zu Eisensulfid und Eisenhydroxid. Metallisches Eisen zersetzt sich also mikrobiell unter anaeroben Verhältnissen, wenn Biofouling eintritt.

Schwarze Rückstände im Wasserkreislauf sind somit Hinweis auf erfolgte Metallkorrosion, das heisst mikrobiell verursachte Korrosion durch Sulfatreduzenten.

Abbildung 9:  
Trinkwasserspeicher mit  
Bewuchs.



## 7. Bewuchs an Mörtel im Trinkwasserbereich oder Schwimmbad

In nationalen und internationalen Regelwerken (zum Beispiel FRANCK R. 1996) sind die Stoffe genannt, die in Produkten für den Trinkwasserbereich (wie zum Beispiel Dichtungsmaterialien oder Mörtel) enthalten sein dürfen. Verschiedene Mörtel können nicht mehr als Kalk- oder Zementmörtel angesehen werden. Um sie unabhängig von Jahreszeit und Klima einsetzen zu können, werden sie häufig vergütet, mit organischen Stoffen versetzt, um entsprechende Eigenschaften nach Wunsch einzustellen.

Bei einem Trinkwasserwerk wurden im Becken schleimige gelblichfarbene Bakterienkolonien festgestellt. Vereinzelt kamen auch fast schwarze Flecken an den Beckenwänden vor. Diese schleimigen Bakterienkolonien enthalten zwar je Millionenzahlen von Bakterienzellen (Abb. 9). Da sie jedoch vor allem als festsitzende Biofilme vorkommen und zudem zu Bakteriengruppen gehören, die in Bezug auf unsere Gesundheit nicht im Vordergrund stehen, waren sie bei der routinemässigen Trinkwasserkontrolle und Keimzahlbestimmung nicht festzustellen. Nur bei der visuellen Kontrolle der Anlagen wurden sie entdeckt.

Bei der mikrobiologischen Analyse der Komponenten dieser Filme zeigten sich vielfältige Organismenvorkommen: Die schleimigen Kolonien bestehen aus aeroben Bakterien, deren Wachstum besonders bei tieferen Temperaturen stattfindet (psychrophile Bakterien), die dunklen, fast schwarzen Anteile wurden als Pilzfäden eines Schwärzepilzes aus der Formfamilie der Dematiaceae bestimmt. Auch diese Organismen – Schimmelpilze – leben aerob. Bei der weiteren Analyse des komplexen Biofilms wurde darin unter anaeroben Verhältnissen nach sulfatreduzierenden Bakterien (SRB) gesucht, und sie wurden gefunden. Das bedeutet, dass die aeroben Organismen im Biofilm den im Wasser vorhandenen Sauerstoff völlig aufzehren und so für strikt anaerobe Le-

bewesen wie SRB den Weg bereiten. Nachdem der Biofilm mit dem Gummischaber entfernt worden war, zeigte sich eine stark <gealterte> zementöse Beschichtung. Die Beschichtung wies Stellen mit Blasen auf. Diese konnten mit Druck zerstört werden, wobei Essiggeruch festzustellen war. Das zeigt, dass in diesen Biofilmen auch fermentierende (Essigsäuregärung) Bakterien vorkamen, welche den Zementüberzug des Wasserspeichers bereits angegriffen und porös gemacht hatten. Dies ist das schon fast klassische Beispiel für Biofilme: An einer Oberfläche konnten sich freischwimmende Organismen festsetzen und dank EPS-Bildung einen Biofilm aufbauen. Der entstandene Biofilm ist Habitat für weitere Organismen, wie Pilze. Das Wasser und die Wandbeschichtung müssen eigentlich als wenig attraktive Habitate betrachtet werden. Dennoch gelingt es diesen aufgrund lokaler Gegebenheiten ent-

standenen Biofilmen, sich zu entwickeln und den Weg für korrosive Prozesse vorzubereiten.

KAISER hat 1999 diese Vorgänge in einem allgemein gültigen Schema über Biofilme festgehalten (Tabelle 2).

Durch die Kenntnis der mikrobiologischen Umsetzungen an Baustoffen und die Analyse der vorhandenen Mikroorganismen ist es möglich, im konkreten Fall die Ursache für den Bewuchs zu definieren und die mögliche mikrobiologische Materialzerstörung (Biodeterioration) zu diskutieren.

Tabelle 2:  
In den verschiedenen Tiefen eines Biofilmes bilden sich verschiedene Zonen von aeroben Verhältnissen an der Oberfläche bis zu strikt anaeroben Verhältnissen in der Tiefe. Je nach Sauerstoffgehalt und vorhandenem Substrat finden unterschiedliche Stoffwechselleistungen statt.

	Kohlenstoff-Kreislauf	Stickstoff-Kreislauf	Schwefel-Kreislauf	Eisen-Kreislauf
Wasser	$(CH_2O)_n$	$NH_4^+$	$H_2S$	$Fe^0, Fe^{2+}$
<i>Biofilmoberfläche</i>				
Aerobe Zone	$(CH_2O)_n \rightarrow CO_2$	$NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$ (Nitrifikation, lithotroph)	$S_2O_3$ $S^0 \rightarrow SO_4^{2-}$ $H_2S$ (Schwefeloxidierer lithotroph)	$Fe^0 \rightarrow Fe^{2+}$ $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  (Eisenoxidierer lithotroph)
Mikroaerophile Zone		$NO_3^- \rightarrow N_2$ (Denitrifikation, organotroph)		
Fakultativ anaerobe Zone (Fermentierer)	$(CH_2O)_n \rightarrow CO_2, H_2, \text{organ. Säuren}$			
Anaerob (Fermentierer)	$(CH_2O)_n \rightarrow CO_2, H_2, \text{Acetat, org. Säuren}$		$SO_4^{2-} \rightarrow H_2S$ (Sulfatreduzierer, organotroph)	$Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ Eisenreduzierer organotroph)
Anaerob	Acetat, $H_2 \rightarrow CH_4$ (Methanogene)			
<i>Substratoberfläche</i>				

In einem Fall von sehr starkem Bewuchs im Schwimmbad – Bewuchs am Fugenmaterial zwischen den einzelnen Fliesen – wurde festgestellt, wie wichtig die Kenntnisse um Materialkomponenten sind. Der betroffene Besitzer war in der Lage, Muster der verschiedenen Materialien beizubringen. Nachdem der bewuchsdominante Schimmelpilz – der unter Wasser grosse Teile der Fliesenfugen schwarz überzogen hatte – isoliert und aus den Materialien Prüfproben bereitete worden waren, wurden Laboruntersuchungen durchgeführt. Da alle Pilze auf die Zufuhr von organisch gebundenem Kohlenstoff angewiesen sind, konnte im Experiment analysiert werden, welches Material dem Pilz die benötigten Kohlenstoffverbindungen lieferte und den Bewuchs provoziert hatte. Diese Kohlenstoffquelle wurde in einem Fall im Fliesenfugenmörtel, in andern Fällen im Kleber, mit welchem die Fliesen an der Betonwand fixiert worden waren, gefunden. Allerdings muss einschränkend festgestellt werden, dass diese biologische Faktorenanalyse zwar einfach und aussagekräftig ist, dass sie aber ohne Qualitätumschreibung und Materialspezifikationen nicht ausreicht, um die Ursache für Bewuchs mit allen Konsequenzen zu definieren.

### Literaturverzeichnis

- BAGDA, E., WÜHL, G., LINDNER, W. (1999): Algen und Pilzen auf Fassadenbeschichtungen auf der Spur. *Farbe & Lack* 3/99, 106–115.
- BLAICH, J. (1999): Biogene Schäden – Algen und Pilze an Fassaden. STV/FAB Seminar Basel, 22.4.99. EMPA Dübendorf.
- BÜCHLI, R. (1999): pers. Mitteilung.
- FLEMMING, H.-C., WINGENDER, J. (1999): Extracellular polymeric substances (EPS): the biofilm construction material. COST 520 Workshop, June 1999, Sion.
- FRANCK, R. (1996): Kunststoffe im Lebensmittelverkehr: Empfehlungen des Bundesinstituts für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin. Textsammlung auf Grund der amtlichen Bekanntmachungen. Begründet von RUDI FRANCK, hrsg. von HELMUT WIECZOREK. 3. Ordner.
- INTERNATIONAL ELECTOTECHNICAL COMMISSION (1988): Basic environmental testing procedures, IEC Standard 68-2-10, part 2, Test J: mould growth.
- KAISER, J.-P. (1999): Mikrobielles Wachstum in Sickerwasser- und Biofilmpollen des Zugwald/Vereina-Tunnels. Unveröffentlichter EMPA-Bericht 840271.
- KRUMBEIN, W. E. (1968): Zur Frage der biologischen Verwitterung: Einfluss der Mikroflora auf die Bausteinverwitterung und ihre Abhängigkeit von edaphischen Faktoren. *Zeitschrift für Allg. Mikrobiologie* 8(2), 107–117.
- NAY, M. (1999): Aerial and subaerial communities on facade surfaces: biofilms as esthetical problems or even biodeteriogens. Postervortrag Sion Juni 1999.
- RASCHLE, P. (1983): Experience of combating moulds during restoration of ceiling paintings in a Swiss baroque monastery church, S. 84–96 in OXLEY, T.A. & BARRY, S. (Edit.) *Biodeterioration* 5, Wiley & Sons Ltd.
- RASCHLE, P. (1989): Einfluss von Mikroorganismen im Alterungsprozess und als Schadenursache an bemalten Aussenflächen. S. 87–91 in SCHWEIZER, F., VILLIGER, V. (Hrsg.) *Methoden zur Erhaltung von Kulturgütern*. Verlag Paul Haupt Bern und Stuttgart.
- RASCHLE, P. (1999): Biofilme und Biofouling an Fassaden. Referat in Sion 9.–11.6.99.
- RASCHLE, P. (2000): Die Klosterkirche Münstair, die Wandbilder und die Mikroorganismen. Text für Kolloquiumsband eingereicht, erscheint 2000.
- STERFLINGER, K. (1995): Geomicrobiological investigations on the alteration of marble monuments by dematiaceous fungi. Dissertation Universität Oldenburg.
- WEIRICH, G. (1988): Wachstum von Schimmelpilzen und Bakterien auf verschiedenen Malgründen. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 2(2), 305–314.
- WEIRICH, G. (1989): Untersuchungen über Mikroorganismen von Wandmalereien. *Material und Organismen* 24(2), 139–159.