

Mikrobieller Befall mittelalterlicher Wandmalerei – Der Einfluss konservatorischer und restauratorischer Behandlungen

Einleitung

Die mikrobielle Besiedlung von Wandgemälden und die damit verbundenen Schadensphänomene sind Restauratoren weit eher geläufig als dies für Natursteinobjekte der Fall ist. Daher sind in der Literatur auch eine Vielzahl insbesondere von Einzelfallstudien¹ bekannt, die eine Besiedlung vor allem durch Pilze beschreiben. Weit weniger wird dagegen an der Feststellung des eigentlichen Schadenspotentials gearbeitet² und noch geringer sind Informationen über Maßnahmen, die in der restauratorischen Praxis tatsächlich einsetzbar sind³.

Um den Einfluss von baulichen Veränderungen und restauratorischen Eingriffen auf Wand- und Deckengemälde abzuschätzen, ist es zunächst notwendig, sich die wichtigsten Wachstumsbedingungen für Mikroorganismen zu verdeutlichen, wobei sich hier selbstverständlich nicht zwischen modernen Objekten und mittelalterlichen Wandgemälden trennen lässt. Wir müssen jedoch unterscheiden zwischen der Aktivierung eines bereits bestehenden Befalls und dem Auslösen einer mikrobiellen Besiedlung im Zuge einer konservatorischen oder restauratorischen Behandlung, da beide Möglichkeiten gegeben sind.

Nachdem wir uns Einblick in die Lebens- und Wachstumsbedingungen der verschiedenen Mikrobengruppen verschafft haben, wird es leichter fallen, deren Beeinflussung durch unser Tun zu erkennen und konservatorische Arbeitsabläufe gegebenenfalls auch so zu gestalten, dass eine verstärkte mikrobielle Schädigung der Objekte weitgehend ausgeschlossen werden kann.

Lebensbedingungen für Mikroben

Um die Voraussetzungen für die Vermehrung von Mikroorganismen, also den Aufbau von Biomasse, zu verstehen, ist es zunächst erforderlich die stoffliche Zusammensetzung der Zellen zu kennen, denn genau diese Stoffe müssen dem Organismus in ausreichender Menge und möglichst auch in einem ausgewogenen Verhältnis zur Verfügung stehen, wenn es zum Aufbau weiterer Biomasse kommen soll.

Hauptbestandteil aller Zellen ist Wasser. Daher ist eine ausreichende Feuchteversorgung die Grundvoraussetzung für alle Wachstumsvorgänge, zumal auch jegliche Stoffwechselaktivität wasserabhängig verläuft. Diese Feuchtigkeit kann den Zellen in Form von eindringendem Wasser oder Kondensfeuchte zur Verfügung gestellt werden. Auch die Porenwässer stellen Feuchtequellen für die Mikroben dar.

Tabelle 1 zeigt für eine Auswahl relevanter Schimmelpilze, dass unterschiedliche Pilzarten durchaus unterschiedliche Mengen an Feuchtigkeit zur Entwicklung benötigen. Zudem hängt die erforderliche Wasseraktivität des Milieus von der jeweiligen Lebenssituation (Zellwachstum, Ausbildung und Keimung von Sporen) ab.

Das mengenmäßig im Trockenmaterial von Zellen am stärksten vertretene Element ist der Kohlenstoff. Dieser kann von den Mikroorganismen auf zwei Wegen genutzt werden. Die Gruppe der sogenannten autotrophen Mikroorganismen ist in der Lage, Kohlendioxid aus der Luft oder dem Wasser auch als Hydrogencarbonat aufzunehmen und in Biomasse umzuwandeln. Hier verhalten sie sich wie grüne Pflanzen, die CO₂ auf dem Weg der Photosynthese einbauen. Zu dieser Gruppe sind Algen und Cyanobakterien, aber z. B. auch andere autotrophe Bakterienarten zu rechnen.

Die Gruppe der kohlenstoffheterotrophen Mikroorganismen ist auf die Aufnahme organischer Kohlenstoffverbindungen angewiesen, die sie, genauso wie Menschen und Tiere dies tun, in körpereigenes Material umwandeln. Protozoen, Pilze, aber auch eine Vielzahl von heterotrophen Bakterien sind hier zu nennen. Als wichtige natürliche Substrate können Zucker, Eiweiße, Fette oder organische Säuren verwertet werden.

Der Aufbau von Biomasse ist energieabhängig und die Organismen lassen sich daher auch nach den verwertbaren Energiequellen einteilen. Bei der Photosynthese wird das Sonnenlicht als Energiequelle genutzt. Andere Bakteriengruppen wie die nitrifizierenden Bakterien sind dagegen in der Lage, durch die Oxidation von Ammoniumsalzen oder von Nitrit Energie zu gewinnen und diese zum Einbau von Kohlendioxid zu nutzen. Die heterotrophen Bakterien und die Schimmelpilze jedoch nutzen die organischen Substrate nicht nur als Kohlenstoff-, sondern auch als Energiequelle.

Da die Zellen nicht nur aus Kohlenstoff und Wasser bestehen, sind auch alle weiteren Inhaltsstoffe zur Entwicklung notwendig. Diese werden bei Laborkulturen in Mineralsalzlösungen bewusst den Ansätzen zugegeben, sind aber auf den Objekten durch die mineralischen Bestandteile sowie Verunreinigungen und Salzbelastungen im Allgemeinen in ausreichenden Mengen verfügbar. Hier soll es genügen, auf die Nitratbelastung aus aufsteigenden Feuchten oder anderen Quellen wie tierischen Leimen als Stickstofflieferanten hinzuweisen. Insbesondere Stickstoff, aber auch Phosphor stellen dabei in natürlichen Lebensräumen oftmals die entscheidenden wachstumsbegrenzenden Faktoren dar. Eine überhöhte Zufuhr der normalerweise eher in zu geringen Mengen verfügbaren Stoffe führt in diesen Situationen zu einem explosionsartig gesteigerten Wachstum, wie es aus der Diskussion um die Eutrophierung der Gewässer durch Phosphate aus den Waschmitteln oder die stickstoffhaltigen Düngemittelzuflüsse bekannt ist.

Ein weiterer entscheidender Faktor für mikrobielle Aktivität ist die Verfügbarkeit von Sauerstoff. Eine Vielzahl von Mikroorganismen ist auf das Vorhandensein von Sauerstoff zum Energiegewinn durch Veratmung der aufgenommenen Substrate angewiesen. Diese obligat aerob lebenden Mikroorganismen können sich nur in Gegenwart von Sauerstoff entwickeln. Einige Spezialisten sind in der Lage, bei Sauerstoffmangel ihren Stoffwechsel umzustellen. So vergären Hefen ihre Substrate, sobald

Pilz	Minimum	Optimum
<i>Aspergillus flavus</i>	0,78	0,95
<i>Aspergillus fumigatus</i>	0,85	0,98
<i>Aspergillus niger</i>	0,77	0,96-0,98
<i>Aspergillus versicolor</i>	0,75	0,95
<i>Cladosporium herbarum</i>	0,88	0,95-0,96
<i>Penicillium brevicompactum</i>	0,78	keine Angabe
<i>Penicillium chrysogenum</i>	0,81	0,96
<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>	0,85	0,92-0,94
<i>Stachybotrys atra</i>	0,94	keine Angabe
<i>Wallemia sebi</i>	0,75	keine Angabe

Tabelle 1
Kardinalwerte der Wasseraktivität ausgewählter Schimmelpilze (nach Reiss, 1998)

eine Veratmung nicht mehr möglich ist. Ein "Abfallprodukt" dieser Gärung durch Hefen ist die Ausscheidung von Alkohol, ein Phänomen, das seit Jahrtausenden bei der Wein- oder Bierherstellung genutzt wird. Auch eine Vielzahl von Bakterien kann unter Sauerstoffmangel zur Gärung übergehen. Die Energieausbeute für die Zellen ist jedoch bei Gärung um ein Vielfaches geringer als bei Veratmung der Substrate. Somit sind höhere Umsatzraten erforderlich, was, bezogen auf die materialschädigenden Aspekte bei Besiedlung von Wandgemälden, durchaus auch eine stärkere Beeinträchtigung bedeuten könnte. Ferner gibt es Bakterienarten, die auch den in Sulfaten oder Nitraten gebundenen Sauerstoff für eine sogenannte "Sulfat- oder Nitratatmung" nutzen können. Auf diese Form des Nitratabbaus wird zu einem späteren Zeitpunkt noch genauer einzugehen sein.

Im Hinblick auf den pH-Wert des Milieus entwickeln sich die unterschiedlichen Mikroben durchaus verschieden. Von solchen Formen, deren Wachstumsoptimum eher im neutralen Bereich liegt, bis hin zu Spezialisten, die im sauren oder im stark alkalischen Bereich nicht nur noch wachsen, sondern sogar die höchsten Wachstumsraten zeigen, sind alle Formen anzutreffen. Der pH-Wert des Objektes (bei ausgehärtetem Calciumcarbonat um 8,5, aber bei salzbelasteten Porenwässern durchaus auch um 11,0 und darüber) wird also einen entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung der Mikrobengesellschaft ausüben. Eher unerwartet waren Ergebnisse, die die Entwicklung von Schimmelpilzen im stark alkalischen Bereich belegen.

Nicht zuletzt ist die Temperatur von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung von Mikroorganismen. Die in Tabelle 2 zusammengestellten Werte stellen nur eine kleine Auswahl der Pilzarten dar, deren Vorkommen auf Wandgemälden belegt ist. Diese Daten verdeutlichen, dass ein Wachstum über die Regelung der Raumtemperatur praktisch nie vermieden werden kann. Für einige Arten wird sogar Wachstum unterhalb des Gefrierpunkts beschrieben.

Beeinflussung der mikrobiellen Besiedlung durch konservatorische und restauratorische Maßnahmen

An dieser Stelle können nur die gängigsten Methoden betrachtet werden, die bei der Konservierung und Restaurierung von

Wandgemälden zum Einsatz kommen. Hier soll bewertet werden, inwieweit die Lebensbedingungen für Mikroorganismen im Verlauf von konservatorischen und restauratorischen Maßnahmen direkt oder indirekt beeinflusst werden.

Der Feuchtehaushalt der Wand

Selbstverständlich werden alle Maßnahmen, die zur Reduktion der in die Wand eindringenden Feuchte führen, die mikrobielle Besiedlung stark beeinflussen. Die jeweiligen Auswirkungen hängen davon ab, inwieweit die Feuchtezufuhr bisher über eben diese Wege erfolgen konnte.

Stellen wir uns eine Deckenmalerei in einem Gebäude vor, dessen Eindeckung, aus welchen Gründen auch immer, schadhaft ist. Nach einer Instandsetzung fällt hier ein wesentlicher, wenn nicht der wesentlichste, Feuchteeintrag fort. Ähnliches gilt für die Regenwasser ableitenden Systeme wie Dachrinnen und Fallrohre, die im ungünstigsten Fall zu einer zumindest temporären starken Durchfeuchtung der Wand führen und somit eine wichtige Feuchtequelle darstellen. Selbstverständlich führt das Anlegen von Drainagen oder Horizontalsperren ebenso wie Veränderungen des Dachüberstands zur Verringerung des Feuchtegehalt im Mauerwerk und damit auch in der Malerei selbst.

Abgesehen von der eigentlichen Gebäudesanierung, wirken sich viele konservatorische Arbeiten auf den Feuchtegehalt aus. Hier sind alle Maßnahmen zu nennen, mit denen häufig über die Malschicht selbst Feuchtigkeit in das Objekt eingebracht wird. Reinigen auf wässriger Basis zählt hierzu ebenso wie das Anbringen von Kompressen zur Salzreduzierung oder von Enzymkompressen, wie sie mehrfach zur Reduktion spannungsreicher Oberflächenfixierungen angewendet wurden. Nicht zuletzt erfolgt auch durch das Anbringen von Kompressen zur Umwandlung von Nitraten unter Luftabschluss ein erheblicher, wenn auch örtlich und zeitlich begrenzter Feuchteeintrag.

Das Mikroklima einer Wandmalerei kann jedoch auch bei Eingriffen, die nicht so eindeutig mit Feuchtezufuhr verbunden sind, beeinflusst werden. Hier sollen auf die Oberfläche aufgebraachte Fixierungen in filmartiger Ausbildung erwähnt werden. Die dargestellten Situationen unter einem zur Oberflächen-

Pilz	Minimum (°C)	Optimum (°C)	Maximum (°C)
<i>Aspergillus flavus</i>	6-8	35-37	42-45
<i>Aspergillus fumigatus</i>	10-12	37-43	52-55
<i>Aspergillus niger</i>	6-8	35-37	45-47
<i>Aspergillus versicolor</i>	4-5	25-30	38-40
<i>Cladosporium herbarum</i>	-7 bis -5	24-25	30-32
<i>Penicillium brevicompactum</i>	-2	23	30
<i>Penicillium chrysogenum</i>	-4	25-28	32-33
<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>	5	24-30	37
<i>Stachybotrys atra</i>	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
<i>Wallemia sebi</i>	5	24-30	37-40

Tabelle 2
Kardinaltemperaturen ausgewählter Schimmelpilze (nach Reiss, 1998)

fixierung aufgebracht Klucelfilm (Abb. 308) ebenso wie nach einer Kalkkaseininjektion im Bereich unterhalb des Injektionslochs, aus dem eine filmbildende Kaseinträne ausgetreten war, können indirekt sehr wohl zur Ausbildung von vor Verdunstung geschützten Bereichen führen. Diese können die Entwicklung einer mikrobiellen Besiedlung ermöglichen oder sie zumindest fördern. Insbesondere im zweiten Fall wird dies deutlich. Die auffällige, streifige Besiedlung durch Grünalgen (Abb. 310) ist auf eine derartige Kaseinträne begrenzt.

Wie zuvor dargestellt, gehören Algen zu den Kohlenstoff autotrophen Mikroorganismen. Kasein stellt für diese also keine Nahrungsquelle dar. Jedoch wird durch den Feuchterückhalt im Kasein eine Zone geschaffen, welche eine Feuchte aufrechterhält, die für das Wachstum von Algen längerfristig ausreicht. Hierin ist die Ursache für die ungleichmäßige Besiedlung zu sehen.

Einen weiteren indirekten Eingriff in den Feuchtehaushalt stellen Veränderungen an Fenstern dar. Mit dem Eindringen der Sonnenstrahlen in ein Gebäude kommt es zur Aufheizung der bestrahlten Flächen. Unter bestimmten klimatischen Voraussetzungen führt dies beim Abkühlen dieser Bereiche zur Ausbildung von Kondensfeuchten, die Mikroorganismen eine Ausbreitung ermöglichen. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass es unterhalb von Kirchenfenstern häufig zu Bereichen mit ablaufender Kondensfeuchte kommt, die damit für eine oftmals mit dem bloßen Auge sichtbare Besiedlung prädestiniert sind. Die zu früheren Zeiten gängigen Ablaufsysteme, die derartige Kondensfeuchten nach außen ableiteten, werden häufig nicht gewartet oder aber beim Einbau neuerer Fenster nicht ersetzt. Auch Putzergänzungen mit feuchtespeichernden Materialien führen oft zu örtlich begrenzten Besiedlungsmustern.

Beeinflussung der Temperatur

Durch Eingriffe in die Temperierung eines Gebäudes wird eine direkte Veränderung der Raumlufttemperatur erreicht. Dies kann insbesondere bei Temperaturerhöhung in bisher unbeheizten Gebäuden dazu führen, dass die für die Aktivität und das Wachstum von Mikroben optimalen Temperaturbereiche erreicht werden oder man diesen zumindest näher kommt, was einer Aktivierung der Besiedlung gleich kommt. Indirekt ist

aber auch eine Verbesserung der Situation möglich, wenn durch eine milde Temperierung die Ausbildung von Kondensfeuchten verhindert werden kann. Ähnliche Effekte sind auch bei mäßiger Wandtemperierung zu erwarten. Systematische Untersuchungen zu derartigen Einbaumaßnahmen liegen bisher nicht vor.

Die in Tabelle 2 dargestellten Kardinalwerte für das Wachstum ausgewählter Schimmelpilze zeigen klar, dass es in keinem Fall realistisch ist, allein durch die Veränderung der Temperatur in einen Bereich zu gelangen, in dem mikrobielles Wachstum auszuschließen ist. An dieser Stelle ist auch zu beachten, dass die Glastemperaturen einiger gängiger synthetischer Polymere in einem Bereich liegen, der in Kirchenräumen sehr wohl erreicht wird. Insbesondere für Mowilith DM 5 und Primal AC 33 ist eine Glastemperatur von 2 bzw. 16 °C angegeben. Beim Erreichen dieser Temperatur geht das Polymer vom festen in einen elastischen Zustand über, was gleichzeitig bedeutet, dass es für die Mikroorganismen besser angreifbar wird. Daher sollten auch die im Gebäude herrschenden Temperaturverhältnisse bei der Auswahl von Festigungsmaterialien berücksichtigt werden.

Die Lichtverhältnisse

Eine indirekte Beeinflussung der Temperatur ist über Veränderungen im Beleuchtungssystem zu erwarten, wenn es sich um Wärme erzeugende Beleuchtungssysteme handelt, die zum Aufheizen der bestrahlten Bereiche führen können, was zudem die Möglichkeit der Bildung von Kondensfeuchten erhöht.

Ferner ist die Verbreitung lichtabhängiger Mikroorganismen wie Algen und Cyanobakterien direkt von der eintreffenden Bestrahlungsstärke begrenzt. Dies wird deutlich bei Vergrünungen um Strahler in ansonsten eher dunklen Gebäuden. Für die Entwicklung eines derartigen Algenbewuchses sind teilweise auch kurzfristige Beleuchtungszeiten ausreichend, wie sie durch Spotbeleuchtungen bei Münzbetrieb erzielt werden.

Auch die Fensterverglasung regelt die Verbreitung photosynthetisch aktiver Mikroben. Dies zeigt sich insbesondere bei Buntglasfenstern, die in einigen Bereichen die für die Photosynthese erforderlichen Wellenlängen des Tageslichtes ausfiltern.

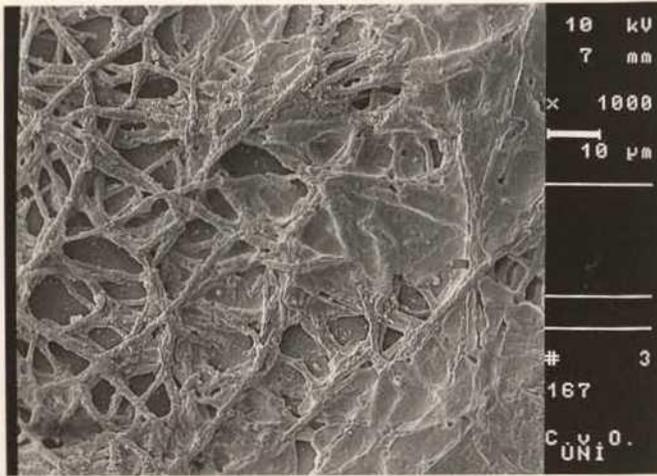


Abb. 308. Salzhemmendorf: Mikroorganismen unter einer Klucelfixierung.

Die Besiedlung durch Algen bleibt nicht immer auf Oberflächen begrenzt. Christoph Oldenbourg (pers. Mitteilung) beobachtete in irischen Kirchen mehrfach die Ausbildung frischer Algenbeläge unter Kittungen. Daraus müssen wir schließen, dass auch durch Kittungsmaterialien hindurch eine für die Photosynthese ausreichende Lichtmenge in die überkitteten Bereiche gelangen kann.

Der pH-Wert

Im Hinblick auf den pH-Wert gibt es ebenfalls Ober- und Untergrenzen, außerhalb derer Mikroorganismen sich nicht entwickeln können, sowie einen Bereich, in dem das Wachstum mit maximaler Geschwindigkeit verläuft. Maßnahmen, die, wenn auch teilweise nur vorübergehend, zu einer Verschiebung des pH-Wertes führen, haben somit einen direkten Einfluss auf die mikrobielle Aktivität. Hier ist nicht nur an alkalische Reinigungskompressen gedacht. Auch das Einbringen von Verpressungsmaterialien, die zu einer Belastung mit alkalischen Salzen führen, sorgt für eine Verschiebung zum alkalischen Bereich. Dadurch werden Organismen in ihrer Entwicklung gehemmt, die sich nur im Säuren (was auf der Wand ohnehin nicht zu erwarten ist) oder im Neutralen entwickeln können. Gefördert werden dagegen Organismen, deren Wachstumsoptimum im Alkalischen liegt und die somit als mäßig alkaliphil einzustufen sind. Erstaunlicherweise wurde festgestellt, dass auch Schimmelpilze, für die üblicherweise eher neutrale bis leicht saure Bereiche angegeben werden, sich zum Beispiel in den Kontaktzonen zu frischen Putzergänzungen verstärkt entwickeln. Untersuchungen ergaben, dass die aus diesen Bereichen angezogenen Isolate im Laborversuch auf Nährmedien mit einem pH-Wert um 10,0/11,0 noch Aktivität zeigen⁴. Auch wenn sich diese Mikroben hier nicht in ihrem optimalen Lebensbereich entwickeln, sind sie den Organismen ohne Alkalitoleranz gegenüber im Vorteil, was zu einer Verschiebung zwischen den einzelnen Populationsanteilen führen kann. Ähnliches gilt, wenn auch nur vorübergehend, für Festigungsmaßnahmen mit Kalksinterwasser⁵.

Bei der Anwendung von Enzymkompressen wird dagegen häufig mit Puffern gearbeitet, die eher eine Verschiebung in den neutralen Bereich bewirken. Damit wird auch hier unter der Kompressen ein Besiedlungsanteil gefördert, der sich normaler-

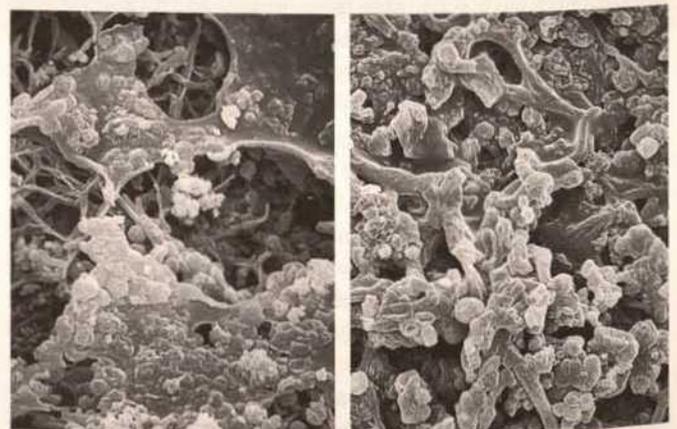
weise auf einem Wandgemälde (pH-Wert um 8,5) eher nicht entwickelt.

Neben diesen direkten Effekten sind indirekte Auswirkungen zu berücksichtigen. So können wir bei einer Vielzahl von Wandmalereien davon ausgehen, dass tierische Bindemittel auf Proteinbasis vorhanden sind. Wird in diesen Situationen der pH-Wert erhöht, so müssen wir mit einer rein chemischen Reaktion, der Spaltung durch Verseifen, rechnen. Dieser Vorgang führt dazu, dass die Proteinmakromoleküle in ihre Einzelbestandteile, die Aminosäuren, zerfallen. Eine Verwertung von Eiweißen ist aber grundsätzlich nur solchen Mikroorganismen möglich, die über eine entsprechende Enzymsausstattung verfügen und proteolytische, eiweißspaltende Enzyme bilden können. Mikroorganismen, die diese Enzyme nicht besitzen, können sich also nicht an Standorten entwickeln, die ausschließlich Proteine bieten. Die Aufnahme und Verwertung von freien Aminosäuren, wie sie im Zuge der Verseifung entstehen, ist dagegen auch für diese Mikroben möglich. Somit kann sich indirekt, auch durch temporäre alkalisch geprägte Maßnahmen, die Nahrungssituation am Objekt deutlich verbessern und zu einer Förderung der mikrobiellen Besiedlung führen.

Der Sauerstoff

Wir können davon ausgehen, dass am Standort Wandgemälde grundsätzlich kein Sauerstoffmangel auftritt und dass bei den porösen Systemen auch eine entsprechende Durchlüftung tiefer liegender Partien erfolgt. Es bleibt jedoch unklar, inwieweit sich diese Situation durch Oberflächenfixierungen ändert. Messungen zur Sauerstoffdurchlässigkeit an Wandmalereien liegen bisher nicht vor. Untersuchungen auf strikt anaerob lebende Mikroorganismen wurden wegen der zuvor beschriebenen Situation und dem immer bestehenden Zwang, mit geringsten Probenmengen zu arbeiten, bisher nicht durchgeführt. Es gibt jedoch einen Hinweis auf das Vorhandensein von Erbmaterial eines derartigen Stammes⁶. Ob es sich hierbei um einen zufällig angetroffenen Einzelkeim oder um eine auf dem Objekt ausgebildete Besiedlung handelt, lässt sich wegen der dort gewählten Untersuchungsform nicht sagen.

Viel eher sind solche Mikroben zu erwarten, die bei ausreichender Sauerstoffversorgung zwar atmen, ihren Stoffwechsel bei Sauerstoffmangel aber auch auf Gärung umstellen können. Zu diesen Mikroben zählen eine Vielzahl von Bakterien, aber auch die Hefen, insbesondere *Rhodotorula*-Arten, die wir häufiger auf Wandgemälden antreffen. Wegen der erheblich geringeren Energieausbeute über Gärungsprozesse müsste dann eine deutliche Erhöhung der Umsatzrate und somit verstärkter Ent-



zug der organischen Substrate (Bindemittel) erfolgen. Dies könnte auch zu einer Anhäufung von Stoffwechselprodukten führen, die ihrerseits wiederum zu einer Schädigung der Objekte führen können. Untersuchungen zu diesem Thema liegen aus den oben dargestellten Gründen nicht vor. Die Entwicklung von Schimmelpilzen kommt dagegen bei Sauerstoffentzug zum Erliegen, eine Tatsache, die man sich bei der Lagerung von Obst und anderen Lebensmitteln zu Nutze macht.

Verstärkt wurden in den letzten Jahren Möglichkeiten der Entsalzung durch anaerob lebende Bakterien diskutiert. Hier werden Bakterien, die zur sogenannten "Sulfat- oder Nitratatemung" fähig sind, über Kompressen an die Objekte gebracht und dort unter Sauerstoffausschluss gehalten. Diese Bakterien sind in der Lage, Sulfat zu reduzieren und somit eine Gipsbelastung zu verringern. Bei der Gruppe der Nitrat reduzierenden Bakterien kommt es im günstigsten Fall zur Umwandlung des Nitrates in molekularen Stickstoff, der dann nach Abnahme der Kompressen entweicht⁷.

Soweit die Theorie. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass die Nitrat reduzierenden Bakterien nicht zu den obligat anaerob lebenden Formen zählen. In Gegenwart von Sauerstoff erfolgt ihre Entwicklung durch Veratmung der Substrate. Es wäre also nach Abnahme der Kompressen durch geeignete Desinfektionsmaßnahmen sicherzustellen, dass die eingebrachten Keime abgetötet werden und sich nicht auf dem Objekt weiterentwickeln können. Dieser Schritt wäre nicht erforderlich, wenn es möglich wäre, mit immobilisierten Bakterien zu arbeiten, die mit der Kompressen vollständig entfernt werden könnten.

Die mineralischen Nährstoffe

Obwohl die Entsalzung von Wandgemälden zu den gängigen konservatorischen Maßnahmen gehört, können wir nur von einer Reduktion der Belastungen ausgehen. Die für die Entwicklung der Mikroorganismen erforderliche Mineralversorgung, insbesondere auch mit Stickstoff, bleibt nach derzeitigem Kenntnisstand sehr wohl in jedem Fall erhalten. Zudem können auch die tierischen Leime als Stickstoffquelle genutzt werden. Unterbleiben sollte jedoch eine Zufuhr von Phosphaten, an natürlichen Standorten ebenfalls ein Wachstum begrenzender Faktor. Die Zugabe von Phosphaten ist insbesondere im Zusammenhang mit Enzymkompressen zu verzeichnen, da über Phosphatpuffer versucht wurde, einen für das jeweilige Enzym günstigen pH-Wert einzustellen. Alle weiteren mineralischen Nährstoffe, die teilweise auch nur in Spuren erforderlich sind, dürften auf Wandgemälden sowohl aus den Materialien selbst als auch aus eindringenden Feuchten verfügbar sein.

Organische Substrate

Abschließend soll hier einer der wesentlichsten Faktoren für die Entwicklung mikrobieller Besiedlung angesprochen werden. Die Mehrzahl der Organismen, denen bei Besiedlung von Wandgemälden ein Schadenspotential zugeschrieben werden muss, sind der Gruppe der chemoorganotrophen Bakterien und Pilze zuzurechnen. Diese Mikroben benötigen zu ihrer Entwicklung organische Nährstoffe, die ihnen überwiegend in Form



Abb. 310. Eilsum, St. Peter, Algenwachstum auf einem Kaseinläufer.

der organischen Bindemittel zur Verfügung stehen. Aber auch Verunreinigungen aus der Nutzung, z. B. durch die Besucher eingebrachter Schweiß, enthalten organische Anteile. Stäube, die sich im Laufe der Jahrhunderte abgelagert haben, besitzen Nahrungsfunktion, ebenso die Überreste von Insekten, die auf oder in dem Gemälde gelebt haben. Exkreme, aber auch Eiblagen und Spinnweb stellen organische Nährstoffe dar⁸.

Ein massives Einbringen von organischen Substraten erfolgt selbstverständlich im Zuge von Konservierungsmaßnahmen durch den oberflächlichen Auftrag oder die Injektion organischer Bindemittel zur nachträglichen Festigung. Malschichtfixierungen mit Kasein oder Hautleim in früheren Zeiten, später dann mit synthetischen Polymeren, fördern die mikrobielle Besiedlung ebenso wie die heute in Osteuropa noch gebräuchliche Injektion mit Kalk-Kasein. Auch bei Übertünchungen muss damit gerechnet werden, dass organische Anteile eingebracht werden, selbst wenn diese auf den Gebinden nicht deklariert werden.

Nicht nur die Naturstoffe, für die es allen geläufig ist, dass ihre Haltbarkeit auf Grund mikrobieller Besiedlung begrenzt ist, sondern auch die synthetischen Polymere sind mikrobiell abbaubar⁹. Dies gilt nicht nur für Dispersionen. Auch für Paraloid B72 konnte eindeutig belegt werden, dass das Material dem mikrobiellen Abbau unterliegt. Der Nachweis erfolgte am Objekt, an einem modernen Wandgemälde von 1949 in Salvador de Bahia, Brasilien. Die Besiedlung durch den Pilz *Engyodontium album* führt zu massiver Vergrauung und zum fast vollständigen Abbau des Polymers, wie die entsprechende Darstellung im Rasterelektronenmikroskop belegt (Abb. 309 a). Der Angriff ließ sich im Labor nachvollziehen. Das Isolat wurde auf einen Film aus Paraloid B 72 aufgeimpft, nach acht Wochen zeigte sich auch hier die massive Zersetzung des Polymerfilms (Abb. 309 b). Natürliche wie synthetische Polymere können zudem bereits vor dem Einbringen in das Objekt Keime enthalten. Diese werden dann mit dem Festigungsmittel auf oder in dem Wandgemälde verteilt und können unter geeigneten klimatischen Bedingungen zu einem massiven Befall führen¹⁰. Auch die Anwendung von Enzymkompressen zur Entfernung von Kaseinoberflächenfixierungen führt zur Anhäufung leicht verwertbarer Spaltprodukte im Wandgemälde. Um diesen Effekt zu verhindern, wurde eine Methode entwickelt, mit der solche Spaltprodukte aus dem Objekt ausgespült werden.

◁ Abb. 309 a-b. Zerstörung eines Paraloidfilms durch Pilzbefall, am Objekt (a) und in der Laborsimulation (b).

Wie aufgezeigt wurde, muss bei der Konservierung und Restaurierung von Wandgemälden ebenso wie bei vergleichbaren Maßnahmen an anderen Objekten eine Vielzahl möglicher Beeinflussungen der mikrobiellen Besiedlung und damit der potentiellen Schädigung berücksichtigt werden. Neben den direkten Auswirkungen sind auch indirekte Effekte zu erwarten, die häufig vor derartigen Bearbeitungen nicht bedacht werden. Eine vollständige Testung auf mögliche Auswirkungen ist im Labor häufig nicht durchführbar, da die Gesamtproblematik sehr vielschichtig ist. Die tatsächliche Situation am Objekt, bei der die gesamte stoffliche Zusammensetzung zu berücksichtigen wäre, also sowohl die organischen wie die anorganischen Komponenten (einschließlich einer möglichen Salzbelastung), ist häufig nicht bekannt und kann im Einzelfall auch oftmals gar nicht analysiert werden. Aus diesen Gründen sollten vor größeren Maßnahmen unbedingt Testflächen am Objekt angelegt werden, die ein Monitoring der zu erwartenden Auswirkungen auf die Besiedlung ermöglichen¹¹.

Summary

Based on a discussion of the essential preconditions for any microbial activity, this contribution presents conservation-restoration measures with a focus on their impact on probable microbial infestation of wall paintings. Mention is made both of direct influencing through climate manipulations or substrate-forming consolidation materials, as well as indirect influencing. The latter may occur through fixation materials, leading to changes in the humidity storage and hence in the microclimate, but also through changes in the salt load because of desalination compresses which may foster or inhibit particular groups. Furthermore, aside from direct changes, pH-value modification may generate certain indirect changes, possibly manifesting themselves, among other things, in pH-dependent cleavage and utilisation of polymers as a consequence thereof.

Anmerkungen

- 1 BERNER – WANNER – LUBITZ, Fungal Flora, 1997; KRUMBEIN – LANGE, Decay of Plaster, 1978; PETERSEN – SCHOSTACK – KRUMBEIN, Mikrobiologische Untersuchungen, 1992; SAIZ-JIMENEZ – SAMSON, Microorganisms and Environmental Pollution, 1981.
- 2 LAZAR – DIMITRU, Bacteria, 1973; PETRUSHKOVA – LYALIKOVA, Microbial Degradation, 1986.
- 3 WARSCHIED, Integrated Concepts, 1999.
- 4 PETERSEN – MOHR – OLTMANN – YUN, Mikroorganismen auf Wandmalereien, 2001.
- 5 Hierzu liegen Beobachtungen vor; siehe BRAJER – KARLSBECK, Limewater Absorption, 1999.
- 6 RÖLLEKE – LUBITZ, Genetische Verfahren, 1998.
- 7 RONALLI – MATTEINI – TOSINI – ZANARDINI – SORLINI, Biomediation, 2000.
- 8 GORBUSHINA – PETERSEN, Distribution of Microorganisms, 2000.
- 9 KOESTLER, Polymers, 2000; KOESTLER – SANTORO, Biodeterioration, 1988; PETERSEN – HEYN – KRUMBEIN, Degradation, 1993; TIANO – BIAGIOTTI – BRACCI, Biodegradability, 1999.
- 10 PETERSEN – SCHOSTAK – KRUMBEIN, Wieskirche, 1992.
- 11 PETERSEN – TOEPFER, Biomonitoring, 2001.

Literatur

- Michaela BERNER – Gerd WANNER – Werner LUBITZ, A Comparative Study of the Fungal Flora Present in Medieval Wall Paintings in the Chapel of the Castle Herberstein and in the Parish Church of St. Georgen in Styria, Austria, in: *International Biodeterioration & Biodegradation* 40, 1997, S. 53-61.
- Isabelle BRAJER – Noline KARLSBECK, Limewater Absorption and Calcite Crystal Formation on a Limewater-Impregnated Secco Wall Painting, in: *Studies in Conservation* 44, 1999, S. 145-156.
- Anna A. GORBUSHINA – Karin PETERSEN, Distribution of Microorganisms on Ancient Wall Paintings as Related to Associated Faunal Elements, in: *International Biodeterioration & Biodegradation* 46, 2000, S. 277-284.
- Robert J. KOESTLER, Polymers and Resins as Food for Microbes, in: *Orio Ciffieri – Piero Tiano – Giorgio Mastromei (Hrsg.), Of Microbes and Art*, New York – Boston – Dordrecht – London – Moscow, 2000, S. 153-167.
- Robert J. KOESTLER – Edward W. SANTORO, Assessment of the Susceptibility to Biodeterioration of Selected Polymers and Resins (GCI Scientific Program report), Marina del Rey 1988.
- Wolfgang E. KRUMBEIN – Cornelia LANGE, Decay of Plaster, Paintings and Wall Material of the Interior of Buildings via Microbial Activity, in: *Wolfgang E. KRUMBEIN (Hrsg.), Environmental Biogeochemistry and Geomicrobiology. The terrestrial environment*, Ann Arbor 1978, S. 687-697.
- Ionita LAZAR – L. DIMITRU, Bacteria and their Role in the Deterioration of Frescoes of the Complex of the Monasteries from Northern Moldavia, in: *Revue roumaine biologie-botanique* 18, 1973, S. 191-197.
- Karin PETERSEN – Christiane HEYN – WOLFGANG E. KRUMBEIN, Degradation of Synthetic Consolidants Used in Mural Paintings Restoration by Microorganisms, in: *Marcel Stefanaggi (Hrsg.), Les Anciennes Restaurations en Peintures Murales, Champs-sur-Marne* 1993, S. 47-58.
- Karin PETERSEN – Uta MOHR – Thorsten OLTMANN – Yunk YUN, Zum Vorkommen alkalitoleranter Mikroorganismen auf Wandmalereien, in: *Konservierung von Wandmalerei (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 104)*, München 2001, S. 221-225.
- Karin PETERSEN – Volker SCHOSTAK – Wolfgang E. KRUMBEIN, Die mikrobiologischen Untersuchungen in der Wieskirche, in: *Die Wies. Geschichte und Restaurierung (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 55)*, München 1992, S. 278-290.
- Karin PETERSEN – Ilka TOEPFER, Biomonitoring an Kunstobjekten, in: *Restaura* 107, 2001, H. 5, S. 364-372.
- Julia P. PETRUSHKOVA – Natalia N. LYALIKOVA, Microbial Degradation of Lead-Containing Pigments in Mural Paintings, in: *Studies in Conservation* 31, 1986, S. 65-69.
- Jürgen REISS, Schimmelpilze, Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung, Berlin – Heidelberg – New York 1998.
- Sabine RÖLLEKE – Werner LUBITZ, Genetische Verfahren für die Untersuchung von Mikroorganismen, in: *Restaura* 104, 1998, H. 4, S. 254-259.
- Giancarlo RONALLI – Mauro MATTEINI – Isetta TOSINI – Elisabetta ZANARDINI – Claudia SORLINI, Biomediation of Cultural Heritage: Removal of Sulphates, Nitrates and Organic Substances, in: *Orio Ciffieri – Piero Tiano – Giorgio Mastromei (Hrsg.), Of Microbes and Art*, New York – Boston – Dordrecht – London – Moscow 1999, S. 231-245.
- Cesareo SAIZ-JIMENEZ – Robert A. SAMSON, Microorganisms and Environmental Pollution as Deteriorative Agents of the Frescoes of the Monastery of Santa Maria de la Rabida, Huelva, Spain, in: *Proceedings of the Sixth Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 21-25 September 1981.
- Piero TIANO – Lucia BIAGIOTTI – Susanna BRACCI, Biodegradability of Products Used in Monuments' Conservation, in: *Orio Ciffieri – Piero Tiano – Giorgio Mastromei (Hrsg.), Of Microbes and Art*, New York – Boston – Dordrecht – London – Moscow 2000, S. 169-181.
- Thomas WARSCHIED, Integrated Concepts for the Protection of Cultural Artefacts Against Biodeterioration, in: *Orio Ciffieri – Piero Tiano – Giorgio Mastromei (Hrsg.), Of Microbes and Art*, New York – Boston – Dordrecht – London – Moscow 1999, S. 185-201.