

Auswirkungen von hydrophoben Fassadenmaterialien auf die Erhaltung und Pflegefähigkeit von Baudenkmalern.

Beobachtungen aus der Praxis

Einleitung

Verwitterungsvorgänge werden angetrieben durch das Bestreben der Materialien, sich in ein Gleichgewicht mit ihrer Umgebung zu begeben. Die Umgebungsbedingungen ändern sich jedoch ständig, so dass ein Gleichgewichtszustand, in welchem die Verwitterung zu einem Ende kommen würde, unter realen Bedingungen nie erreicht werden kann. Damit ist hier grundsätzlich vorausgeschickt, dass eine vollständige Verhinderung von Verwitterungsprozessen nur durch komplette Isolierung der betroffenen Baumaterialien von ihrer Umwelt zu erreichen wäre und damit für immobile, dem Wetter ausgesetzte Objekte unmöglich ist.

Obwohl es grundsätzlich unmöglich ist, Veränderungen durch Verwitterung bei gleich bleibender Exposition vollständig zu verhindern, wurde und wird verständlicherweise seit jeher versucht, Bauten vor den schädigenden Einwirkungen der direkten Bewitterung zu schützen. Zum Schutz vor Regen und Schnee wurden deshalb Schutzdächer, -bleche und -überzüge angebracht, und wo dies nicht möglich war, wird insbesondere bei Bausteinen und Mörteln versucht, durch entsprechende Ober-

flächenbehandlung das Material resistenter gegen die Einflüsse des Wetters zu machen.¹

Sinnvolle Schutzmaßnahmen schützen vor denjenigen Witterungseinflüssen, von welchen an einem bestimmten Objekt nachgewiesen werden konnte, dass sie Schädigung bewirken.² An Objekten, wo der Einfluss der Beregnung als wesentlicher Faktor für Schäden erkannt oder begründet vermutet wurde oder wird, wurden und werden daher Materialoberflächen oftmals hydrophobiert, also Wasser abstoßend gemacht oder für Oberflächenbeschichtungen wurden und werden Wasser abweisende Materialien verwendet.

Im Rahmen unserer Beratungstätigkeit zur Erhaltung historischer Bauten, werden wir immer wieder mit Objekten konfrontiert, welche einige Jahre zuvor hydrophobiert, mit hydrophoben Anstrichen versehen oder mit Wasser abweisenden Verputzen überzogen wurden. Es liegt in der Natur der Sache, dass wir nur Fälle zu Gesicht bekommen, bei welchen mit der Zeit Probleme auftraten. Deshalb kann hier keine systematische, allgemein gültige Darstellung der Auswirkungen von Hydrophobierungen auf jegliche Art von Baumaterialien gegeben oder angestrebt werden, denn dazu sind die beobachteten Einzelfälle allzu zufällig auf uns gekommen und für diesen Artikel ausgewählt worden.

Die systematische Aufarbeitung der Problematik wird zusätzlich dadurch be- respektive gar verhindert, dass solche baulichen Maßnahmen oftmals schlecht oder noch häufiger gar nicht dokumentiert worden sind. Meist fehlen sowohl Angaben zu den verwendeten Produkten, als auch zum Vorzustand des Objektes, und es sind in der Regel weder der Zeitpunkt, geschweige denn die Witterungsbedingungen bei der Ausführung der Maßnahmen bekannt. Für eine wissenschaftlich hieb- und stichfeste Beurteilung früherer hydrophobierender Maßnahmen am Einzelobjekt, müssten aber die Einzelheiten der Umstände bei der Ausführung der Maßnahmen und natürlich die verwendeten Materialien genau bekannt sein.³

Trotz dieser Nachteile scheint es die Häufigkeit des Auftretens von negativen Auswirkungen von Hydrophobierungen zu rechtfertigen, einige sich zu diesem Thema aufdrängenden Beobachtungen mitzuteilen. Die Schlüsse die sich aus den Beispielen ziehen lassen, können helfen zu entscheiden, ob eine hydrophobierende Maßnahme oder die Verwendung hydrophober Materialien am historischen Bauwerk im Einzelfall tatsächlich angezeigt sei oder eben nicht.

Wovor Hydrophobierungen schützen sollen – Verwitterung von porösen Baumaterialien im Regen

Die Art und Weise wie Bausteine und Mörtel, die der direkten Bewitterung ausgesetzt sind, verwittern, ist von Material zu Material verschieden und hängt von den lokal herrschenden Umgebungsbedingungen und den spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Baumaterialien ab.⁴ Der weitaus größte Teil der

¹ Einen Überblick über die diesbezüglichen Bemühungen im 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts geben: Seymour Z. LEWIN, *The preservation of natural stone, 1838–1965, an annotated bibliography*, Art and Archaeology Technical Abstracts, 6, 1966, S. 185–277; und für den deutschen Sprachraum Christoph HERM, Stephan PFEFFERKORN und Rolf SNETHLAGE, *Historische Verfahren und Handelsmarken in der Steinkonservierung 1840–1940*, in: *Denkmalpflege und Naturwissenschaft. Natursteinkonservierung II*, Förderprojekt des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1998, S. 9–26.

² Zur Herleitung von Konservierungsmaßnahmen aus den Schadensursachen: Christine BLÄUER BÖHM, *Ableiten von Konservierungsmaßnahmen aus dem Verwitterungsgeschehen*, in: *Tagungsbeiträge zu "Mauersalze und Architekturoberflächen"*, Hochschule für Bildende Künste Dresden, 1. – 3.2.2002, hg. von Heinz LEITNER, Stefan LAUE und Heiner SIEDEL, Dresden 2003, S. 84–89; und Sharon CATHER, *Assessing Causes and Mechanisms of Detrimental Change to Wall Paintings*, in: *Conserving the Painted Past: Developing Approaches to Wall Painting Conservation*, Post-prints of a conference organised by English Heritage, London December 1999, hg. von Robert GOWING und Adrian HERITAGE, London 2003, S. 64–74.

³ Die Umgebungsbedingungen wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Materialfeuchtigkeit und so weiter spielen eine wesentliche Rolle für das Verhalten der Materialien nach Hydrophobierungen: A. Elena CHAROLA, *Water Repellents and other "Protective" Treatments: a Critical Review*, in: *Internationale Zeitschrift für Baustandsetzen und Baudenkmalpflege*, 9, 2003, Heft 1, S. 3–22.

⁴ Zur Bausteinverwitterung in Abhängigkeit von ihrer Wetterexposition siehe Alois KIESLINGER, *Zerstörungen an Steinbauten, Ihre Ursachen und ihre Abwehr*, Leipzig, Wien 1932; Francis DE QUERVAIN, *Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil I, Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie*, 23. Lieferung, Bern 1945; R. J. SCHAFFER, *The Weathering of Natural Building Stones*, Facsimile of the 1932 edition, published by Construction Research communications Ltd, by permission of Building Research Establishment Ltd., London 1932.

Verwitterung geschieht unter Beteiligung von Wasser in irgendeiner Form. Im Außenbereich sind es insbesondere die Wetterfassaden, deren Verwitterung durch die direkte Beregnung beeinflusst wird. In solchen Fällen werden Materialoberflächen durch hydrophobierende Maßnahmen Wasser abstoßend gemacht, in der Hoffnung, sie dadurch länger zu erhalten.

Hydrophobierende Behandlungen von Materialoberflächen sind aber einzig an Flächen notwendig respektive sinnvoll, welche durch Bewitterung auch tatsächlich nass werden können. Solche Stellen sind direkt beregnete Flächen, Stellen, an denen Schnee liegen bleiben kann, oder Flächen, über die Wasser bei entsprechenden Bedingungen abfließt. Diese regelmäßig nass werdenden Fassadenflächen sind im Einzelfall nicht einfach zu erkennen. Die Beobachtung von Gebäuden bei Regen kann hier Hinweise geben (Abb. 1).

Für die Interpretation der Beobachtungen an regennassen Fassaden ist aber vieles zu beachten. So hängt es stark davon ab, wie schnell das vorhandene Baumaterial auftreffendes Wasser einsaugen kann, ob ein Bauteil bei Regen sichtbar nass erscheint oder nicht. Wenn jeder auftreffende Tropfen vom Material sofort in die Tiefe gesaugt wird, so wird die Fassade auch dann trocken erscheinen, wenn sie direkt beregnet ist. Umgekehrt werden schlecht saugende Materialien, auch wenn sie von geringen Niederschlagsmengen getroffen werden, sehr schnell und deutlich sichtbar nass.⁵ Wenn allerdings Fassadenflächen aus ein und demselben Material beim gleichen Regenereignis an verschiedenen Stellen unterschiedlich stark nass werden, so kann dies nur dadurch bedingt sein, dass manche Stellen von mehr Regenwasser getroffen wurden als andere. Die regelmäßige Beobachtung zeigt, dass Fassaden bei Regen höchst ungleichmäßig benetzt werden. Einerseits werden man-



Abb. 1. Bern, Bundesgasse 8, nach Norden exponierte regennasse Fassade aus Berner Sandstein (15.2.1990) mit sichtbar dunkleren Stellen, an denen die Steine oberflächlich nass sind: zum einen direkt beregnete Flächen, zum anderen Bereiche, an denen das Wasser durch Fugen oder Risse in den Gesimsen kanalisiert abfließt.

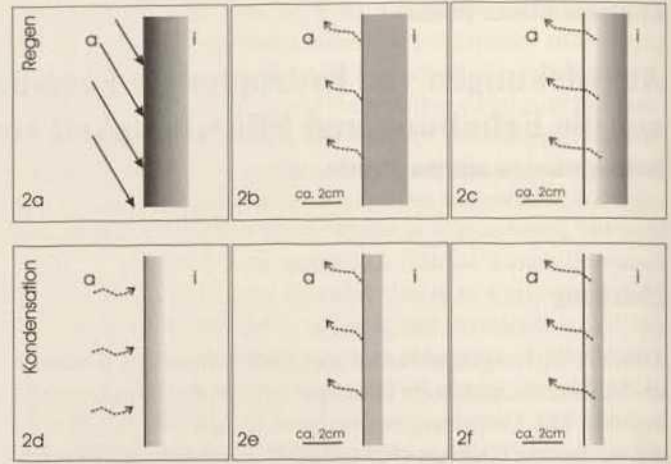


Abb. 2a-f. Schematische Darstellung der Benetzung respektive Trocknung von porösen Materialoberflächen bei Regen (a-c) sowie unter Kondensationsbedingungen (d-f), wobei die Intensität der Graufärbung ein Maß für den Wassergehalt ist (a = aussen; i = innen).

che Teile der Fassade durch vorspringende Bauteile vor auftreffendem Regen geschützt und bleiben trocken, und andererseits werden Teile, welche im Einflussbereich von kanalisiert abfließendem Wasser liegen, stärker benetzt als andere Bereiche (vgl. Abb. 1). Das Bild der Benetzung der verschiedenen Fassadenteile ändert sich zudem je nach den während des Regens herrschenden Windverhältnissen.

Bei der Entscheidung für oder gegen eine hydrophobierende Behandlung kann auf feine Unterschiede in der Beregnung respektive Benetzung innerhalb einer Fassade keine Rücksicht genommen werden. Fassaden werden also in der Regel vollflächig hydrophobiert, womit zwangsläufig auch Stellen behandelt werden, welche keinen Schutz vor auftreffendem Wasser benötigen würden. Auch werden normalerweise alle Fassaden eines Gebäudes behandelt, also auch diejenigen, welche kaum je vom Regen getroffen werden. Dies erscheint wahrscheinlich deshalb notwendig, weil es schwierig wäre festzulegen, wo die Maßnahme enden sollte, denn Hydrophobierungen verändern das Verhalten der Materialien sowohl gegenüber Wasser in flüssiger Form als auch gegenüber Wasserdampf. Damit würden nicht hydrophobierte Teile in einer hydrophobierten Umgebung zu Inhomogenitäten der Fassade führen, deren Alterungsverhalten unvorhersehbar wäre und damit unerwünscht erscheinen muss.

Flüssigkeits- und Gastransport in porösen, mineralischen Materialien

Für die Überlegungen zu den nachstehenden Fallbeispielen ist ein gewisses Verständnis der Transportvorgänge von Flüssigkeiten und Gasen im Porenraum der Materialien unabdingbar.

⁵ So sind Bauten aus Beton viel öfter sichtbar nass als solche mit besser saugenden Materialoberflächen.

⁶ Wo nichts anderes gesagt wird, basieren die nachstehenden Aussagen auf den Erläuterungen von Daniel JEANNETTE, Structures de porosité, mécanismes de transfert des solutions et principales altérations des roches des monuments, in: La pietra dei monumenti in ambiente fisico e culturale, Atti del 2° Corso Intensivo Europeo tenuto a Ravello e a Firenze dal 10 al 24 aprile 1994, Bari 1997, S. 49-77.

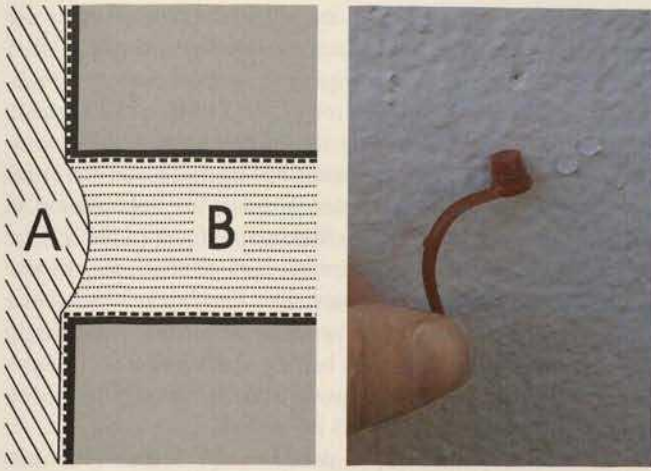


Abb. 3. Schematische Skizze des Schnitts durch eine Kapillarpore an einer hydrophobierten Oberfläche, auf welche Wasser (A) auftrifft; indem das Wasser die Porenwände nicht benetzen kann, wird das Eindringen in die offene Kapillare verhindert (grau = Material; schwarze dicke Linie = Porenwände; gestrichelte Linie = Hydrophobiermittel auf Porenoberflächen; A = Wasser; B = Luft; vgl. Anm. 14).

Abb. 4. Auf hydrophoben Oberflächen bleiben Wassertropfen hängen (Bildmitte bei der Verschlusskappe), oder sie laufen über die Oberfläche ab.

Im Folgenden werden daher die wirkenden Kräfte, soweit sie zum Verständnis des Weiteren notwendig erscheinen, qualitativ erläutert.⁶

Wie und wie schnell ein poröses Material Wasser oder andere Flüssigkeiten aufnimmt oder abgibt, hängt mit den Eigenschaften der Flüssigkeit, mit der Porosität des Materials und mit den Umgebungsbedingungen zusammen. Materialeigenschaften wie Porenvolumen, Porengrößen, Verbundenheit der Poren untereinander und so weiter entscheiden über diese Transportprozesse.

Kapillartransport

Kapillartransport im Porenraum, also das spontane Aufsaugen von Flüssigkeiten durch poröse Materialien, bedeutet immer, dass eine netzende fluide Phase, das heißt eine Flüssigkeit oder ein Gas, eine nicht netzende fluide Phase verdrängt. Im Falle des Eindringens von Wasser in eine Kapillare ist Wasser die netzende Phase, welche feuchte Luft, als die nicht netzende Phase, verdrängt. Dabei wird nicht der ganze Porenraum mit Flüssigkeit gefüllt, sondern das Gas wird in Form von Blasen meist in den größeren Poren eingeschlossen.

Die treibenden Kräfte beim Kapillartransport, sind einerseits die Fähigkeit der Flüssigkeit die Porenwände zu benetzen und andererseits die Oberflächenspannung an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Gas.

Kapillarer Wassertransport findet in Porenräumen mit Radien zwischen circa einem Millimeter und einigen Nanometern statt. Wasser oder andere Flüssigkeiten können dabei im Material grundsätzlich in alle Richtungen gleich gut und gleich schnell transportiert werden. Erst in Porenräumen ab etwa einem Millimeter oder größer, zum Beispiel in Grobporen von Kalksinter-tuffen oder Rissen im Material, wird der Einfluss der Schwerkraft so groß, dass Wasser durch sein Eigengewicht nur noch nach unten durch diese Porenräume sickern kann. Sind die

Porenräume dagegen kleiner als einige Nanometer, so kommt es darin bereits bei tiefen Luftfeuchtigkeiten zu Kapillarkondensation. Diese feinsten Porenräume sind deshalb unter Normalbedingungen in unseren Breiten mit der Flüssigkeit gefüllt.

Volumenmäßig gehört der weitaus größte Teil der Hohlräume fast aller Natur- und Bausteine sowie Putze in den Bereich der Kapillaren. Für die Verwitterung stellen die Kapillaren damit die wichtigste Porenklasse dar.

Die Geschwindigkeit, mit welcher Kapillaren Flüssigkeiten einsaugen, ist umso langsamer, je feiner die Kapillaren sind. Das Eindringen der Flüssigkeit verläuft linear zur Wurzel der Zeit, das heißt sie wird mit der Zeit immer langsamer. Bei horizontalem Eindringen geht dieser Saugvorgang theoretisch unendlich tief.

Kapillare Saugvorgänge finden zum Beispiel dann statt, wenn eine Materialoberfläche von direktem Regen getroffen wird, oder wenn auf ihr Schnee schmilzt. Die Eindringtiefe des Wassers ist hier abhängig von der Geschwindigkeit mit welcher das Material Flüssigkeiten saugen kann und natürlich auch von der Menge des auftreffenden Wassers und der Dauer des Regens.

Adsorption von Gasen auf Feststoffen (Kondensation auf Oberflächen)

Oberflächen von Feststoffen tragen eine gewisse Oberflächenladung. Befindet sich der Feststoff an feuchter Luft, so fixiert er je nach seinen Oberflächeneigenschaften, der herrschenden Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf seiner (inneren) Oberfläche eine oder mehrere Moleküllagen Wasser. Wenn diese adsorbierten Wasserlagen in sehr feinen Poren auftreten, können sich diese Poren ganz mit Wasser füllen, was als Kapillarkondensation bezeichnet wird.

An Bauten kommt es dann zu Kondensation, wenn kalte Materialoberflächen mit feuchter warmer Luft im Kontakt stehen. Diese Erscheinung ist oftmals in kühlen Innenräumen in Form von Tröpfchenbildung und Rinnsalen an Fensterscheiben zu beobachten, welche bei feuchtwarmem Wetter gelüftet werden. An porösen, mineralischen Oberflächen lässt sich Kondensation unter vergleichbaren Bedingungen nur deshalb nicht beobachten, weil hier das kondensierte Wasser sofort vom porösen Material aufgesaugt wird. Wenn also kalte Oberflächen von porösen Baumaterialien mit feuchter warmer Luft beaufschlagt werden, so werden die oberflächennahen Porenräume feucht.

Verdunstung respektive Trocknung

Die Geschwindigkeit der Austrocknung poröser Materialien wird einerseits von den Umgebungsbedingungen, wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Intensität der Luftbewegung bestimmt. Andererseits entscheidet die Beschaffenheit des Porensystems darüber, wie rasch Flüssigkeit vom Innern an die trocknende Oberfläche nachströmen kann und damit, ob die Flüssigkeit vor allem an der Oberfläche oder im Inneren des Materials verdunstet. Grundsätzlich werden Flüssigkeiten in feinen Poren stärker zurückgehalten als in groben. Feinkörnige Materialien haben in der Regel feinere Poren als grobkörnige. Deshalb kann z.B. bei Sandsteinen mit einer Wechsellagerung von feinkörnigen und grobkörnigen Lagen davon ausgegangen werden, dass die feinen Lagen nach einer Durchfeuchtung länger feucht bleiben als die groben.

Das Trocknen poröser Materialien erfolgt in der Regel zweiphasig. In einer ersten Phase erfolgt der Feuchtigkeitstransport



Abb. 5a-b. Bohrkern aus Berner Sandstein (Durchmesser 5,7 cm) von einer vor Jahren hydrophobierten Fassade, nachdem er für ca. 40 Minuten auf einem nassen Tuch Wasser aufgesogen hat (kenntlich an dunkler Verfärbung): vorderster Bereich (ca. 5 mm) hydrophob und daher trocken geblieben (a, rechts); in der Vorderansicht dunkler, feuchter Hof im unteren Teil durch nicht mehr hydrophoben Zustand der äußersten Oberfläche (b).

vom Materialinnern zur Oberfläche kapillar und damit rasch und in einer zweiten, sehr viel langsameren und mit der Zeit immer langsamer werdenden Trocknungsphase hauptsächlich gasförmig durch Dampfdiffusion. Die Dampfdurchlässigkeit eines Materials ist von seiner Porosität, der Schichtstärke und den herrschenden Umgebungsbedingungen abhängig.

Bei Materialien, die Wasser sehr gut kapillar transportieren können, überwiegt bei bestimmten Umgebungsbedingungen die erste, schnelle Trocknungsphase, denn hier wird der größte Teil des Wassers relativ rasch, kapillar zur Oberfläche transportiert, wo es dann in die Umgebung verdunstet. Bei schlecht kapillar leitenden Materialien kann dagegen die zweite, langsame Trocknungsphase so stark dominieren, dass die Verdunstung des Wassers fast ausschließlich im Materialinneren stattfindet.⁷

Grundsätzlich gesehen ist die Geschwindigkeit der Trocknung jedoch für fast alle porösen Baumaterialien sehr viel langsamer als die Flüssigkeitsaufnahme.⁸

Festzuhalten bleibt noch, dass unter realen Bedingungen immer ein wenig Feuchtigkeit in den Proben zurückbleibt und der Zustand einer vollständigen Trocknung, in unseren Breiten, an Außenfassaden nie erreicht wird.

Für den Wassertransport in nicht hydrophoben mineralischen Materialien gelten damit die folgenden, für die weiteren Betrachtungen hilfreichen Faustregeln:

- Je grobporöser ein Material ist, desto schneller saugt es Wasser kapillar auf und umgekehrt.
- Je schneller ein Material Wasser aufsaugt, desto schneller trocknet es auch wieder aus und umgekehrt.
- Der Vorgang des Trocknens dauert bei einem bestimmten Material ein Mehrfaches der Dauer des Vorganges der Benetzung.

Modellvorstellung über den Zustand von porösen Materialoberflächen bei Regen oder bei Kondensationsbedingungen

In Abbildung 2 wird versucht, die Vorgänge in der Oberfläche eines porösen Baumaterials während und nach einer Beregnung respektive der Beaufschlagung mit Kondensationsfeuchtigkeit schematisch darzustellen. Bei Beregnung (Abb. 2a) oder Kondensation (Abb. 2d) wird das Material nur in einem relativ dünnen Oberflächenbereich nass, wobei angenommen werden kann, dass das Material bei Regen bis in eine größere Tiefe feucht wird als bei Kondensationsereignissen.⁹ Anfänglich dürfte sich in beiden Fällen ein Feuchtigkeitsgradient mit nied-

rigeren Feuchtigkeitsgehalten im Materialinnern als nahe der Oberfläche ausbilden. Dieser dürfte sich aber spätestens beim Wechsel der Umgebungsbedingungen zu trockeneren Verhältnissen ausgleichen (Abb. 2b resp. 2e). Zu diesem Zeitpunkt beginnt auch die Verdunstung des Wassers aus der Materialoberfläche. Je nach den Umgebungsbedingungen und den Porositätseigenschaften des Baumaterials findet die Verdunstung an der Materialoberfläche oder im Steininneren statt (Abb. 2c resp. 2f). Die Trocknungsphase dauert bis zum nächsten Regen oder zur nächsten Kondensationsphase. Der Feuchtigkeitsgehalt der Oberfläche zum Zeitpunkt der erneuten Benetzung ist abhängig davon, wie nass das Material bei der vorhergehenden Benetzung geworden war, sowie davon, welche Umgebungsbedingungen während des Trocknens herrschten.

Durch Hydrophobierungen sollen in der Regel die Benetzungsvorgänge bei Beregnung verhindert werden, und dies möglichst ohne die Trocknungsvorgänge zu verzögern.

Hydrophobiermittel und Verhalten hydrophober Materialoberflächen gegenüber Wasser

Hydrophobierungen sollen das Material vor dem Eindringen von Wasser in flüssiger Form schützen.¹⁰ Dies wird bei den in unserem Zusammenhang bis heute am häufigsten verwendeten Hydrophobiermitteln auf Silan-Siloxanbasis¹¹ dadurch erreicht, dass die inneren Oberflächen der Poren mit Polymeren beschichtet werden,¹² welche die Oberfläche apolar und dadurch wasserabstoßend machen.¹³ Die Porenöffnungen bleiben bei

⁷ Solche Unterschiede im Trocknungsverhalten der Materialien führen dazu, dass unterschiedliche Materialien trotz identischer Umgebungsbedingungen vollständig anders verwittern. Beispiele in Steffen LAUE, Christine BLÄUER BÖHM und Daniel JEANNETTE, Salt weathering and porosity, examples from the crypt of St. Maria im Kapitol, Cologne, in: 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin 1996, S. 513–522.

⁸ Es kann ohne weiteres von einem mehr als hundertfachen Unterschied zwischen der Geschwindigkeit des Trocknens und des Nasswerdens ausgegangen werden. Siehe z.B. Messungen von Kapillarität und Trocknung eines Mikrits respektive eines Sandsteins in: Bénédicte ROUSSET TOURNIER, Transferts par capillarité et évaporation dans des roches – rôle des structures de porosité. Dissertation Université Louis Pasteur, Straßburg 2001, S. 94, 158 und 159.

⁹ Beobachtungen scheinen z.B. zu zeigen, dass die Eindringtiefe für Regenwasser für Berner Sandsteine in Bern im Bereich von 1 bis 2 cm liegt. Die Befeuchtungstiefe durch Kondenswasser, welches sich an kalten Oberflächen bildet, dürfte dagegen, vermutlich wegen der wohl geringeren Wassermenge, höchstens einige mm betragen.

¹⁰ CHAROLA, Water Repellents (Anm. 3), S. 6.

¹¹ CHAROLA, Water Repellents (Anm. 3), S. 5.

¹² Die Porenwände werden von einer Polysiloxananschicht von 0,015 bis 0,1 µm Dicke überzogen. Jan CARMELIET, Geert HOUVENAGHEL, Jos VAN SCHIJNDEL und Staf ROELS, Moisture Phenomena in Hydrophobic Porous Building Material, Part 1: Measurements and Physical Interpretations, in: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 8. Jahrgang, Heft 2/3, 2002, S. 165–183, bes. S. 169, dort zitiert aus: W. H. SCOUTEN, Activation of Porous Glass and Similar Supports for the Affinity Chromatography and Enzyme Immobilization. Proc. of the Silanes, Surfaces and Interfaces Symposium, Gordon and Breach Science Publishers, New York.

¹³ Christian FISCHER, Importance des propriétés pétrophysiques et des interactions physico-chimiques dans l'hydrofugation des roches par des silicones, Dissertation, Université Louis Pasteur, Strassburg 1993, S. 44 ff.

dieser Behandlung weitgehend offen. Es wird also im Idealfall lediglich der kapillare Wassertransport verhindert, nicht jedoch der Transport von Wasserdampf (Abb. 3).¹⁴

Ob eine Oberfläche hydrophob ist, lässt sich am Objekt selber oder an Materialproben einfach überprüfen, indem ein Tropfen Wasser vorsichtig auf die Oberfläche gesetzt wird. Wird der Wassertropfen aufgesogen, so ist die Oberfläche nicht oder nicht mehr hydrophob, bleibt der Wassertropfen an der Oberfläche hängen, perlt (Abb. 4) oder läuft er ab, ohne die Oberfläche sichtbar zu benetzen, so ist sie entweder hydrophob oder die Poren sind vollständig verstopft. Ob die Porenöffnungen für kapillaren Transport jeglicher Flüssigkeit verschlossen sind, lässt sich einfach dadurch überprüfen, dass ein Tropfen einer nicht polaren Flüssigkeit, zum Beispiel Alkohol oder Reinbenzin, auf die hydrophobe Materialoberfläche gebracht wird. Läuft auch diese Flüssigkeit ab oder bleibt der Tropfen stehen ohne aufgesaugt zu werden, so sind die Poren des Materials verstopft. Wird diese Flüssigkeit dagegen in die Materialoberfläche eingesaugt, so sind die Poren weitgehend offen und lediglich für den kapillaren Wassertransport unzugänglich.

Durch die hydrophobierte Oberflächenschicht ist nur noch dampfförmiger, also vergleichsweise langsamer Wassertransport möglich. Wenn aus irgendeinem Grund Wasser rasch von hinten an die hydrophobierte Oberflächenschicht gelangen kann, wird es dort unweigerlich gestaut. Deshalb muss bei Bauteilen, welche von hinten nass werden können, auf eine Hydrophobierung der äußeren Oberfläche verzichtet werden.¹⁵

Durch Hydrophobierungen wird der Dampfdiffusionswiderstand des behandelten gegenüber dem unbehandelten Material

verändert. Er wird größer, je näher die hauptsächlichsten Porengrößen des Materials der Größenordnung der Längen der Polymerketten liegen, denn die Poren dieser Porengrößenklassen können durch das Hydrophobiermittel vollständig verstopft werden.¹⁶ Die Porengrößen der meisten uns interessierenden Baumaterialien liegen zu einem mehr oder weniger großen Teil in diesem Bereich.¹⁷

Wenn die Materialoberfläche Risse aufweist, durch welche das Wasser, allein getrieben durch die Schwerkraft, eindringen kann, so kann hierdurch die Hydrophobierung von Wasser hinterlaufen werden.¹⁸ Bei solchen Stellen kann dann das Wasser trotz der Hydrophobierung eindringen, sich in der Tiefe verteilen, von wo es danach aber nur sehr langsam verdunsten kann.¹⁹

Auch rissfreie, hydrophobierte Oberflächen nehmen mit der Zeit Feuchtigkeit auf, wenn sie lange nass bleiben.²⁰ Situationen wo die Materialien lange feucht bleiben, dürften sich zum Beispiel im Zusammenhang mit auf Gesimsen schmelzendem Schnee ergeben. Hier muss also damit gerechnet werden, dass die Bauteile trotz der Hydrophobierung manchmal relativ stark durchfeuchtet werden, wegen der durch die Hydrophobierung verzögerten Austrocknung lange feucht bleiben und entsprechende Folgeschäden entstehen können.

Hydrophobiermittel werden als Flüssigkeiten, Cremes oder Pasten aufgetragen. Das Eindringen des Hydrophobiermittels in das Porengefüge des Materials unterliegt dabei den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie das Eindringen anderer Flüssigkeiten. Materialien welche schnell viel Wasser aufsaugen werden also auch das Hydrophobiermittel entsprechend aufsaugen. Die Eindringtiefe des Hydrophobiermittels ist je nach Applikationsmethode und Material verschieden. Sie kann nach der Behandlung durch Wassersaugversuche an Bohrkernen (Abb. 5) oder an Bruchflächen überprüft werden. Wir beobachten meistens Eindringtiefen von einigen Millimetern bis etwa einem Zentimeter.

Die Auswirkungen der Behandlung hängen von den Eigenschaften des behandelten Materials, den verwendeten Produkten, den Applikationstechniken sowie den während der Applikation herrschenden Umweltbedingungen ab.²¹

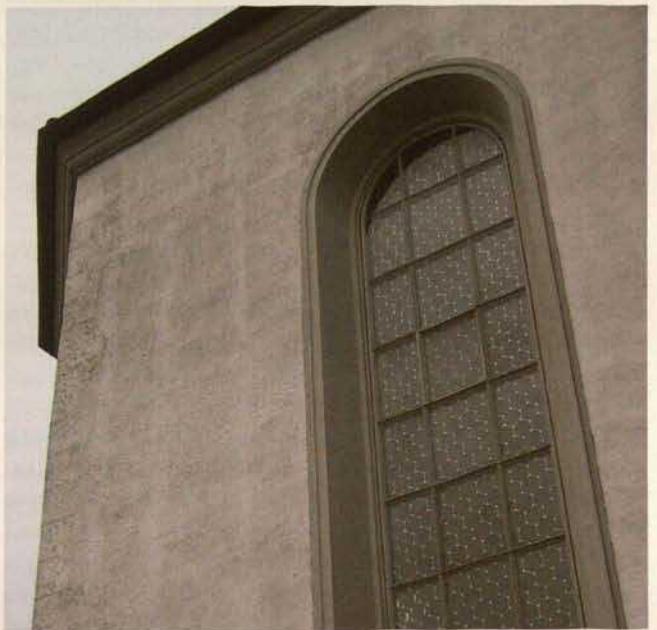


Abb. 6. Nördliche Seitenkapelle einer Kirche, Westfassade; dunkle Verfärbungen im oberen Teil, die zunächst fälschlich als Abwaschung der Tünche interpretiert wurden (20.3.2001).

¹⁴ Andere Darstellungen des Hydrophobiermittels im Porenraum finden sich in CARMELIET, *Moisture Phenomena* (Anm. 12), S. 168, 169 und 179.

¹⁵ Solche Bauteile sind zum Beispiel erdberührte Stützmauern aber unter Umständen auch die Außenmauern von Feuchträumen.

¹⁶ Nach CARMELIET, *Moisture Phenomena* (Anm. 12), S. 179, können Poren bis ca. 0.1 µm Porendurchmesser durch das Hydrophobiermittel verstopft werden.

¹⁷ Angaben zur Porosität zahlreicher Naturbausteine finden sich in Wolf-Dieter GRIMM, *Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland* (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Bd. 50), München 1990; zu Kalkmörteln zeigen die Quecksilber-Porosimetrie-Kurven der Arbeit von Alison SAWDY, *The Kinetics of Salt Weathering of Porous Materials: Stone Monuments and Wall Paintings*, PhD thesis, Institut of Archaeology, University College, London 2001, S. 304, dass bei einer Mörtelzusammensetzung von 1 Teil Sumpfkalk auf 3 Teile Sand weniger als 5% der Porosität durch Poreneingangsradien erschlossen werden, die kleiner als 0,05 µm sind. Karl Georg BÖTTGER, *Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze, Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze*, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Berlin 1997, S. 212, untersuchte historische Kalkputze, deren Porositäten zu ca. 3–4 Vol.% Poreneingangsradien von kleiner als 0.1 µm aufwiesen.

¹⁸ Dieses Hinterlaufen scheint bereits ab Haarrissen von 0.3mm möglich zu sein (CHAROLA, *Water Repellents* (Anm. 3), S. 11).

¹⁹ Ob ein Riss in einer hydrophoben Materialoberfläche Wasser eindringen lässt oder nicht, kann einfach durch das Aufbringen eines Wassertropfens geprüft werden (vgl. Abb. 4). Wenn bereits ein kleiner Tropfen rasch in den Riss eingesaugt wird, so kann davon ausgegangen werden, dass auch auftreffendes Regenwasser schnell eingesaugt würde.

²⁰ CARMELIET, *Moisture phenomena* (Anm. 12), S. 182.

²¹ CHAROLA, *Water Repellents* (Anm. 3), S. 8 und 9.



Abb. 7. Materialprobe eines Fassadenputzes mit Mikroorganismen im Dünnschliff (vgl. Abb. 6; aufgenommen 3 Jahre nach Herstellung des Dünnschliffs, weshalb die Mikroorganismen, ursprünglich kugelige, olivgrün-bräunliche Gebilde, nur noch als eingetrocknete Krümel sichtbar sind; V = Verputz; T1 bis T4 = Kalktüncheschichten, darüber Einbettungsharz mit Schleifstaub; M = Mikroorganismen; Aufnahme in einfach polarisiertem Licht, Bildbreite 0,6 mm).

Die gängigen Hydrophobiermittel bauen sich unter dem Einfluss von UV-Licht ab.²² Damit verliert das Material oberflächlich, das heißt in der Regel in den äußersten Zehntelmillimetern, seine Wasser abweisende Wirkung (Abb. 5b). Darunter bleibt die Wasser abweisende Eigenschaft jedoch bestehen (Abb. 5a), denn die UV-Strahlung kann nur wenig tief ins Innere des Materials eindringen.

Wenn also berichtet wird, die Hydrophobierung sei auch nach Jahrzehnten noch intakt, so muss wohl in vielen Fällen davon ausgegangen werden, dass die Hydrophobierung unter einer äußerst dünnen, nicht mehr hydrophoben Oberflächenschicht noch wirkt.²³

Unserer Beobachtung nach scheint sich auf sehr vielen Wasser abstoßenden Materialoberflächen mit der Zeit eine hydrophile äußerste Oberflächenschicht zu bilden, also zum Beispiel auch auf Dispersionsfarben oder hydrophob eingestellten Verputzen. Diese nicht hydrophobe, also hydrophile, äußerste Oberflächenschicht dürfte für jede Materialart ein wenig anders entstehen.²⁴ Die Auswirkungen der hydrophilen Oberflächenschicht, welche auf einem hydrophoben Untergrund liegt, schienen aber, unabhängig von der Art ihrer Entstehung, die gleichen oder doch sehr ähnlich zu sein, sie werden nachfolgend anhand von Beispielen ausführlich geschildert.

Fallbeispiele gealterter hydrophober Materialoberflächen

Beispiel 1: Hydrophobierter, hydraulischer Putz mit mehrlagiger Kalktünche

Der Fassadenanstrich einer Kirche erschien insbesondere an der stark beregneten Westfassade grau (Abb. 6). Die Vergrauung wurde von weitem und ohne weitere Untersuchung von Architekt und Bauherrschaft so interpretiert, dass angenommen wurde, die Tünche sei nicht wetterbeständig, deshalb abgewaschen worden und nun schimmere darunter die graue Verputzeigenfarbe durch. Die Lebensdauer des Anstrichs von nur etwa 20 Jahren bis zum Beobachtungszeitpunkt, erschien der Bauherrschaft als zu gering. An uns wurde deshalb die Frage gestellt, mit welchem, dauerhafteren Farbsystem der Anstrich erneuert werden solle. Anhand der Untersuchung einer Mate-



Abb. 8a. Nordfassade eines Kirchturms (s. Abb. 8b), Ausschnitt: Verschwärzungen nur an leicht nach oben geneigten Stellen des unebenen Fassadenputzes; fehlender Bewuchs im Regenschatten des kleinen Fensterblechs (20.3.2003).

rialprobe sollte abgeklärt werden, um welche Art von Putz- und Anstrichmaterial es sich handle und ob dieser Untergrund auch für eine Kalkfarbe geeignet wäre.

Aus den vorhandenen Akten zu den Verputzen der Kirche ging hervor, dass der Verputz bei der Sanierung von 1979 kom-



Abb. 8b. Nord- (links) und Westfassade eines Kirchturms, welcher knapp 5 Jahre zuvor mit „veredelter Kalkfarbe“ gestrichen worden war: Dunkle Verfärbungen durch biologischen Befall (20.3.2003; gerahmter Ausschnitt s. Abb. 8a).

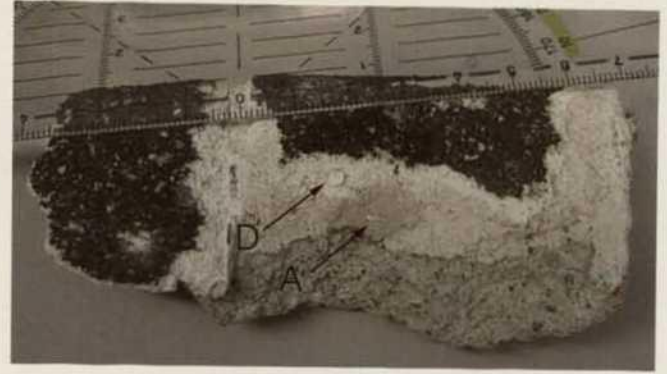


Abb. 9a-b. Westfassade eines zuletzt 1986 renovierten Kirchturms: Dunkle Verfärbung der hellen Tünche in den berechneten Bereichen (b), während im Regenschatten oder bei Kupferanteilen im Ablaufwasser der Bewuchs verhindert wird (a: Pfeil; Sommer 2004).

Abb. 10. Versuch mit einem Wassertropfen auf einer Verputzprobe: die äußerste, einige mm starke Putzlage ist hydrophob (der Tropfen bleibt stehen: Pfeil D), sowohl auf der darunter liegenden Putzschicht als auch in der dunklen Oberfläche dagegen rasche Wasseraufnahme (feuchte Stelle bei Pfeil A).

plett entfernt, sämtliche Fassaden neu mit einem, mit hydraulischen Kalk verschnittenen Kalkmörtel verputzt und viermal mit Kalk nass in nass getüncht worden waren. Diese Informationen aus den Akten wurden durch unsere Untersuchungen an einem Dünnschliff einer Probe des Verputzes (Abb. 7) bestätigt.

In der Probe konnte beobachtet werden, dass der Putz hydraulische Anteile enthielt und auf der Oberfläche vier weiße, reine Kalktünchen ohne organische Zusätze aufwies. Erstaunlich war aber, dass die äußerste und stellenweise auch die zweitäußerste Tünchenschicht stark von dunklen Mikroorganismen besiedelt waren.

²² M. BRUGNARA, E. DEGASPERI, C. DELLA VOLPE, D. MANIGLIO, A. PENATI, S. SIBONI, L. TONIOLO, T. POLI, S. INVERNIZZI und V. CASTELVETRO, The Application of the Contact Angle in Monument Protection, *New Materials and Methods, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Bd. 241, Issues 1-3, 2004, S. 299-312. Im Internet unter: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09277757>.

Durch das Aufbringen von Wassertropfen auf die frischen Bruchflächen einer Verputzprobe ließ sich leicht feststellen, dass der Putz, mit Ausnahme der äußersten Tünchelage, bis in eine Tiefe von ca. 1cm hydrophob war. Tiefer als etwa 1 cm liegende Schichten des Putzes sowie eine etwa 0,1 mm dünne Schicht der Tünchenoberfläche saugten Wasser dagegen gut auf.

²³ Gleiche Beobachtungen bei Eberhard WENDLER, Renate RÜCKERT-THÜMLING, Dietrich KLEMM und Rolf SNETHLAGE, Zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungsmaßnahmen auf Naturstein, Vergleichende Fallbeispiele am Kölner Dom und am Ulmer Münster, in: *Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinerfall-Steinkonservierung*, Bd. 4, 1992, Berlin 1994, S. 197-204, hier: S. 199; sowie Michael AURAS, Heiner SIEDEL, und Helmut WEBER, Reinigung und Steinkonservierung, in: *Natursteinwerk und Umweltschutz in der Denkmalpflege*, hg. vom Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V. Wiesbaden, Ulm 1997, S. 684-716, hier: S. 714.

Das Aktenstudium ergab, dass die Hydrophobierung der Fassaden wahrscheinlich wenige Jahre nach der Sanierung von 1979 erfolgt war. Sie kommt in den Akten einzig als empfehlendes Fachgutachten vor und wurde ohne das Wissen der Denkmalpflege ausgeführt und daher weder mitfinanziert noch begleitet und auch nicht dokumentiert.²⁵ Da auch die Bauherrschaft keine Unterlagen mehr besitzt, liegen keine zur weiteren Beurteilung der Maßnahme dienlichen Unterlagen vor. Weder Zeitpunkt und Umfang der Maßnahme, noch die Art des verwendeten Hydrophobiermittels ließen sich herausfinden.

²⁴ Bei Dispersionsfarben beobachten wir in solchen Fällen oft ein feinschichtiges System von feinen Rissen, welche Wasser aufnehmen und speichern können.

²⁵ In den Akten der Denkmalpflege findet sich lediglich ein auf den 17.7.1981 datiertes externes Fachgutachten, welches das Hydrophobieren der Fassaden empfiehlt. Einem Brief vom 22.8.1981 der Kirchengemeinde an den Architekten kann entnommen werden, dass "... die zusätzliche Hydrophobierung und andere, kleinere Ausbesserungsarbeiten zu Lasten der Kirchengemeinde gehen." In der Zusammenstellung der Unterhalts-, Ergänzungs- und Garantiearbeiten des Architekten vom 21.8.1984 adressiert an die Kirchengemeinde steht: „9. Putzhydrophobierung: Nachdem die Putzstellen geflickt und gekalkt sind, muss der gesamte Fassadenteil zwischen den Stockgurten nochmals hydrophobiert werden.“

Bei der Sanierung 2002 wurde dann beschlossen, die Fassaden zu reinigen, mit einem Biozid zu behandeln, einzelne Putzstellen zu flicken und darüber mit Organosilikatfarbe zu streichen. Ein erneuter sichtbarer Befall mit Mikroorganismen ist damit in einigen Jahren wieder zu erwarten. Eine Rückkehr zu einem nicht hydrophoben System wäre hier nur durch das vollständige Entfernen sämtlicher hydrophober Schichten möglich gewesen, wofür der Bauherrschaft der finanzielle Aufwand zu groß erschien.

²⁶ Daraus, dass die schwarzen Verfärbungen nur an Stellen auftraten, welche bei Regenwetter regelmäßig nass wurden, konnte geschlossen werden, dass es sich dabei um einen biologischen Befall handeln musste. Dunkle Verfärbungen durch Schmutzablagerungen würden sich vor allem in vor Regen geschützten Bereichen finden, wohingegen Bewuchs zwingend regelmäßige Bewässerung braucht und deshalb im Regenschatten in der Regel nicht wachsen kann. Theoretisch kann auch das Abwaschen der weißen Farbschicht von der Oberfläche zu schwarzen Flecken führen, solche Flecken sehen aber anders aus.

Beispiel 2: „Veredelte Kalkfarbe“

Ein Kirchturm wurde 1997 mit einer „veredelten Kalkfarbe“ gestrichen. Noch innerhalb der Garantiefrist von 5 Jahren zeigten manche Fassadenflächen intensive schwarze Verfärbungen durch biologischen Befall (Abb. 8a-b).²⁶ Der Bewuchs ist dort am stärksten, wo die Fassade am stärksten und häufigsten benetzt wird. So ist in Abb. 8b zum Beispiel unter den kleinen Dach-

vorspringen in den Turmecken zuoberst kein Bewuchs zu erkennen, was hier so interpretiert wird, dass dort, im Regenschatten, das Wasserangebot für die Mikroorganismen zu gering ist.

Der Test mit einem Tröpfchen zeigte, dass Wasser auf dem Anstrich abperlte (vgl. Abb. 4), der Farbanstrich war also eindeutig hydrophob. Der Untergrund unmittelbar unter dem Anstrich erwies sich dagegen als deutlich weniger hydrophob. Im vorliegenden Fall genügt damit eine sehr dünne hydrophobe Oberflächenschicht, um an berechneten Stellen bereits nach weniger als fünf Jahren einen dunklen Bewuchs zu fördern.

Unseres Wissens wurden die vom Bewuchs betroffenen Fassaden vom Bewuchs gereinigt, mit Bioziden behandelt und mit einem ähnlichen, wiederum hydrophoben Farbsystem neu gestrichen. Diese Lösung wurde aus ökonomischen Überlegungen gewählt.

Beispiel 3: Hydrophob eingestellter Verputz

Das eindrucklichste mir bekannte Beispiel einer Auswirkung der Verwendung von hydrophoben Materialien an Wetterfassaden verdanke ich Herrn Restaurator Hans-Jörg Gerber. Die betroffene Kirche (Abb. 9b) war 1986 renoviert worden. 16 Jahre später wies sie an stark beregneten Stellen, einen äußerst kräftigen, dunklen Bewuchs auf. Ein deutliches Indiz dafür, dass die Verdunkelung durch Mikroorganismenbefall verursacht wird, liegt hier unter anderem in der Tatsache, dass sie im Bereich des Abflusswassers vom Blitzableiter aus Kupfer fehlt (links in Abb. 9a).²⁷ Bereits der leichte Regenschatten, verursacht durch das etwas vorstehende Dach oder durch den Gurt



am Turm, reduzierten die Intensität des Bewuchses beträchtlich und da, wo die Turmwestfassade durch das Dach des Schiffes vor Regen geschützt war, fehlte der Bewuchs durch Mikroorganismen vollständig. Der Bewuchs bestand hier aus einer dunklen, rötlichbraunen bis schwarzen, weichen Schicht, welche nur locker auf der Putzoberfläche lag und an ihrer Unterseite stellenweise leuchtend grün war.

Der Verputz von 1986 bestand aus einem grauen Grundputz einem leicht rosafarbenen Ausgleichsputz sowie aus einem weißen Deckputz (Abb. 10). Die äußeren beiden Putzschichten waren nur einige Millimeter dick. Der Restaurator bespritzte die Fassade mit Wasser und es zeigte sich, dass sich die Oberfläche gut benetzen ließ. Dies führte zuerst zur fälschlichen Annahme, dass keine wasserabstoßenden Materialien vorhanden seien. Wurde aber an einer Probe des Verputzes ein Wassertropfen vorsichtig auf die frische Bruchfläche der Deckputzschicht gelegt, so blieb dieser dort stehen, ohne aufgesogen zu werden (Abb. 10). Die darunter liegenden Schichten des Ausgleichs- und Grundputzes sowie die dunkle Schicht des biologischen Bewuchses saugten Wasser dagegen sehr schnell auf.

Bei diesem Putzaufbau war demnach einzig die dünne Deckputzschicht hydrophob. In einem solchen Fall könnte das Problem am einfachsten durch den vollständigen Ersatz dieses Deckputzes mit nicht hydrophobem Material gelöst und für die Zukunft vermieden werden.

Beispiel 4: Hydrophobierte Berner Sandsteine

Der südwestliche Pavillon auf der Münsterplattform in der Stadt Bern wurde, im Zug der notwendigen statischen Sanierung der Münsterplattformstützmauer, 1987 restauriert. Dabei wurden die Steine am Fuß des Pavillons weitgehend ersetzt, gefestigt²⁸ und hydrophobiert²⁹. Die Fassadenflächen wurden

²⁷ Das vom Stift des Blitzableiters abfließende Wasser enthält geringe Mengen Kupfer, welches für den Bewuchs giftig ist und ihn verhindert. Die Oberfläche ist in der bewuchsfreien Zone durch die Kupferablagerungen leicht bläulich-grünlich verfärbt.

²⁸ Mit dem Kieselsäureethylester Wacker OH. Dazu: Aktennotiz zur Bausitzung Sanierung Münsterplattform vom 15.10.1987: „...Festiger OH, Fa. Wacker. Ausführung in 3–4 Einzeltränkungen nass in nass mit einer Wartezeit von 30–40 Minuten zwischen den Tränkungen. Nach der letzten Tränkung wird die Oberfläche mit reinem Lösungsmittel (...) mittels absprühen leicht nachgewaschen.“; Aktennotiz zur Bausitzung Sanierung Münsterplattform vom 12.11.1987: „... Nach der erfolgten Festigung ist das Gerüst ohne Unterbruch während mindestens 2 Wochen zu beheizen...“

²⁹ Mit dem Siloxan Wacker 090, s. dazu: Aktennotiz zur Bausitzung Sanierung Münsterplattform vom 12.11.1987: „...Nach der Festigung und einer Wartezeit von 3 Wochen ... hydrophobiert...“ und weiter „Das Hydrophobieren erfolgt in zwei Einzeltränkungen nass in nass. Beim Hydrophobieren muss das Gerüst leicht temperiert sein.“; Aktennotiz zur Bausitzung Sanierung Münsterplattform vom 19.11.1987: „Als Hydrophobierungsmittel wird ... Wacker 090 S (gebrauchsfertige Lösung) verwendet. Zum Nachwaschen wird Isopropylalkohol verwendet.“

³⁰ Der Zeitpunkt für die Maßnahmen geht aus den in Anm. 28 und 29 zitierten Protokollstellen hervor.

³¹ Christine BLÄUER, Verwitterung der Berner Sandsteine, unpublizierter Dissertation, Universität Bern, 1987.

Abb. 11. Bern, Südwestecke der Münsterplattform, Pavillon (13.10.1994): 1987 gefestigte und hydrophobierte Fläche mit ersten Ansätzen einer Verdunkelung durch Bewuchs (Pfeil; vgl. Abb. 12).

dagegen lediglich gefestigt aber nicht hydrophobiert. Die Maßnahmen wurden offenbar im Winter 1987 ausgeführt.³⁰

Eine Fotografie des Pavillons vom Oktober 1994, also sieben Jahre nach den Maßnahmen, auf welcher die hydrophobierten Flächen leider nur zu einem kleinen Teil zu sehen sind (Abb. 11), zeigt erste Ansätze für eine Verdunkelung im berechneten Bereich. Siebzehn Jahre nach den Maßnahmen hat sich dann ein intensiver Bewuchs, sowohl an den schräg abfallenden als auch an den senkrechten Sandsteinflächen des Pavillonfußes ausgebildet (Abb. 12). Wo das auftreffende Wasser für den Bewuchs giftiges Kupfer aus darüber befindlichen Blechen enthält, fehlt der Bewuchs jedoch vollständig. An den Fassadenflächen des Pavillons oberhalb des Niveaus der Fensterbänke, die nur gefestigt worden waren, fehlt ein sichtbarer Bewuchs ebenfalls.

Solch intensiver Bewuchs ist auf älteren Objekten aus Berner Sandstein, insbesondere an senkrechten Flächen, kaum je zu beobachten.³¹ Berner Sandsteine sanden an ihrer Oberfläche ständig ein wenig ab, so dass der Bewuchs schlecht Fuß fassen kann, weil er kontinuierlich mit dem abfallenden Sand zusammen herunterfällt. Werden diese Steine aber vor dem Hydrophobieren gefestigt, so fällt der „Selbstreinigungseffekt“ durch das Absanden weg und der Bewuchs kann sich offenbar gut festsetzen.

Hypothesen zur Entstehung der Förderung von Bewuchs durch Hydrophobierungen oder hydrophobe Materialien³²

Den hier gezeigten Beispielen ist gemeinsam, dass die hydrophobe Wirkung, egal wie sie ursprünglich zustande kam, auch nach jahrelanger Standzeit noch wirksam ist. Allerdings scheint sich jeweils auf der Oberfläche eine nur äußerst dünne, nicht

³² Die hier geäußerten Vermutungen stützen sich auf Beobachtungen an den gezeigten Beispielen, aber auch an verschiedenen weiteren Objekten.

³³ Nachweise für die hydrophile Oberflächenschicht auf dem hydrophoben Untergrund sind für die hier erwähnten Beispiele in den Abbildungen 5b, 7 und 10 dargestellt.

³⁴ AURAS, Reinigung und Steinkonservierung (Anm. 23); CHAROLA, Water Repellents (Anm. 3); WENDLER, Dauerhaftigkeit (Anm. 23).

³⁵ Solche craqueléartig gerissenen Oberflächen, welche Wasser gut aufsaugen, haben wir zum Beispiel bei manchen Dispersionsfarbanstrichen beobachtet.

³⁶ Von intensivem biologischem Befall auf Flächen mit oberflächlich abgebauter Hydrophobierung wird ebenfalls durch AURAS, Reinigung und Steinkonservierung (Anm. 23), S. 714, sowie WENDLER, Zur Dauerhaftigkeit (Anm. 23), S. 203, berichtet.

³⁷ Paul RASCHLE, Mikrobiologische Analytik am Beispiel der Klosterkirche Münstair, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Jg. 18, 2004, Heft 2, S. 311–317; Katja STERFLINGER, Monument as Microbial Environment, in: European Commission, Protection and conservation of European cultural heritage. Research report No 14, 2001, S. 147–154; Thomas WARSCHEID und Joanna BRAAMS, Biodeterioration of Stone, a Review, International Biodeterioration & Biodegradation, 46, 2000, S. 343–368.

³⁸ STERFLINGER, Monument as Microbial Environment (Anm. 37), S. 147.

³⁹ STERFLINGER, Monument as Microbial Environment (Anm. 37); WARSCHEID, Biodeterioration (Anm. 37).

Abb. 12. Bern, Südwestecke der Münsterplattform, Pavillon (15.4.2004): 1987 gefestigte und hydrophobierte Fläche mit starkem Bewuchs, aber fehlendem Bewuchs dort, wo das auftreffende Wasser giftige Kupferanteile enthält, die sich als Grünspan niederschlagen.

mehr hydrophobe Schicht ausgebildet zu haben.³³ Bei der Anwendung von Hydrophobiermitteln auf Silan-Siloxanbasis an zuvor nicht hydrophoben Baumaterialien scheint dieses Phänomen allgemein bekannt zu sein.³⁴ Aufgrund der gezeigten Beispiele und weiterer, uns bekannter Fälle kann vermutet werden, dass solch dünne, nicht mehr Wasser abstoßende Oberflächenschichten mit der Zeit auch auf anderen hydrophoben Materialien entstehen. Manchmal schienen sie zum Beispiel dadurch zu entstehen, dass sich feine Rissnetze in den Oberflächen der Materialien bilden, in welche Wasser eindringen kann.³⁵

In dieser nicht hydrophoben Oberflächenschicht konnte sich jeweils ein biologischer Befall festsetzen³⁶, welcher in jedem Fall intensiver war als es an gleich exponierten unbehandelten Flächen zu erwarten wäre.

Für den Befall durch Mikroorganismen braucht es drei Dinge, nämlich Organismen/Keime, Nahrung und Wasser.³⁷ Organismen sind in unserem Zusammenhang überall genügend vorhanden.³⁸ Als Nahrung verwertbar sind fast alle organischen Materialien, und offenbar genügen bereits die organischen Bestandteile aus der Luftverschmutzung.³⁹ Damit scheint, wo kein Gift vorhanden ist, das Angebot an Wasser der entscheidende Faktor zu sein. Die Beobachtung von Bauten in unseren Breiten zeigt jedenfalls, dass biologischer Befall im Außenbereich überall dort auftritt, wo das Wasserangebot groß genug, die Materialoberflächen stabil und keine giftigen Substanzen vorhanden sind.

Aus der Tatsache, dass an Stellen mit abgebauter Oberflächenhydrophobierung über einer noch funktionierenden Hydropho-



bierung in der Tiefe ein viel intensiverer Bewuchs als bei un- behandelten Materialien entsteht, kann damit abgeleitet werden, dass das Wasserangebot an solchen Stellen für die Mikroorganismen viel besser ist als an nicht hydrophobierten Oberflächen.

Das für den Bewuchs optimale Wasserangebot entsteht vermutlich wie folgt:

Dem Regen ausgesetzte Fassadenflächen werden regelmäßig nass. Wenn Regenwasser auf ein poröses gut saugendes Material trifft, wird es in die Tiefe gesaugt (vgl. Abb. 2) und so im Material verteilt, dass dieses nur feucht, nicht aber nass ist. Wenn die gleiche Wassermenge aber auf eine äußerst dünne, saugende Schicht fällt, die über einem nicht saugenden Untergrund liegt, so wird diese Schicht zuerst bis zur Sättigung nass und danach läuft das Wasser oberflächlich ab.⁴⁰ Da bereits geringe Wassermengen genügen, um diese äußerst dünne Oberflächenschicht vollständig zu durchnässen, dürfte sie auch bei jedem Auftreten von Kondensationsbedingungen nass werden. Die Trocknung dauert in jedem Fall sehr viel länger als das Nasswerden. Ein Bewuchs mit Mikroorganismen dürfte das Trocknen noch zusätzlich verzögern. Damit werden Stellen mit oberflächlich abgebauter Hydrophobierung häufiger und stärker nass und stellen ein optimales Milieu für das Wachstum von Mikroorganismen dar.⁴¹

Den geschilderten Beispielen ist zudem gemeinsam, dass an hydrophoben Flächen nur dort ein intensiver biologischer Befall auftrat, wo sie regelmäßig von Regen benetzt werden. Anders gesagt, scheint der Befall nur an denjenigen Flächen aufzutreten, welche tatsächlich unter Umständen eine Hydrophobierung nötig haben könnten. Flächen welche lediglich ab und zu mit Kondensfeuchte beaufschlagt werden, scheinen dagegen viel weniger vom Dunkelwerden durch einen Befall betroffen zu sein, offenbar ist hier das Wasserangebot für die Mikroorganismen nicht groß genug.⁴²

Schlussfolgerungen

Die Entscheidung, für oder gegen eine Hydrophobierungsmaßnahme, setzt einerseits die Kenntnis der am gegebenen Ort herrschenden Bewitterungssituation und andererseits genaue Kenntnis der zu behandelnden Materialien bezüglich ihrer Fähigkeit Wasser aufzunehmen oder abzugeben voraus. Üblicherweise werden Fassaden durch mehrere unterschiedliche Materialien aufgebaut. So besteht eine Sandsteinfassade in der Stadt Bern aus mindestens zwei unterschiedlichen Materialien, nämlich dem Sandstein und dem Fugenmörtel. Meistens kommen aber weitaus mehr unterschiedliche Materialien innerhalb einer Fassade vor. So sind die Fensterbänke nicht selten in Kunststein ersetzt oder es gibt verputzte und gestrichene Fassadenflächen. Auch die Sandsteine sind, selbst wenn sie vom gleichen Typus sind, durch unterschiedliche Korngrößen in den einzelnen Schichten mehr oder weniger heterogen bezüglich der Aufnahme und Abgabe von Wasser.

Da Hydrophobiermittel nach den gleichen physikalischen Prinzipien in poröse Materialien eindringen wie andere Flüssigkeiten, werden sich Unterschiede in der Porosität der Materialien zwangsläufig in Unterschieden der Eindringtiefe und auch der Wirkung von solchen Mitteln auswirken. Hydrophobierende Maßnahmen müssten aber eigentlich auf jedes Material einzeln abgestimmt werden, was praktisch nur an Fassaden möglich scheint, welche aus nur einem einzigen Material bestehen.

Hydrophobierende Behandlungen von Materialoberflächen sind einzig an Flächen sinnvoll, welche durch die Bewitterung auch tatsächlich nass werden können und dadurch Schäden erfahren.⁴³ Dass dieser Regel, selbst bei gutem Willen, nicht gänzlich Folge geleistet werden kann⁴⁴, ist sicherlich kein geringes Problem bei der Entscheidung über hydrophobierende Maßnahmen an historischen Bauten. Es zeigt sich weiter, dass nicht nur die grundsätzliche Entscheidung für oder gegen eine Hydrophobierung ein schwierig zu lösender Punkt zu sein scheint, sondern ebenso die Begrenzung der Maßnahme. „Wo aufhören?“ ist, wie bei allen irreversiblen Konservierungsmaßnahmen, eine der wichtigsten Fragen.

Jedenfalls kann festgestellt werden, dass Wetterfassaden von vor Jahren hydrophobierten oder mit hydrophoben Materialien verputzten oder gestrichenen Bauten, dort durch biologischen Befall dunkel werden, wo sie am häufigsten nass werden.

Tiefenhydrophobierungen scheinen zwar eine große Dauerhaftigkeit zu beweisen, für die hier geschilderten Fälle ist aber gerade diese Dauerhaftigkeit zusammen mit dem ausschließlich oberflächlichen Abbau der hydrophoben Wirkung das Problem. Der Bewuchs ließe sich möglicherweise durch regelmäßiges Nachhydrophobieren verhindern, wobei sich die Frage stellt, wie oft eine Hydrophobierung wiederholt werden kann.⁴⁵ Weiter stellt sich hier die Frage, womit diese Nachbehandlung erfolgen könnte, denn unserer Erfahrung nach, sind die früheren Maßnahmen oftmals schlecht dokumentiert⁴⁶ und es kann

⁴⁰ Gedankenexperiment: unter der Annahme, dass die nicht hydrophobe Oberflächenschicht eine Dicke von 0,1 mm hat, beträgt das Volumen dieser Schicht auf 1 cm² berechnet 10 mm³, d.h. 10µl. Wenn diese Schicht zu 20–50% aus Poren besteht, genügt ein Tropfen (ca. 5µl) oder gar weniger, um die Schicht über die ganze Fläche von 1cm² vollständig mit Wasser zu sättigen. Bei nicht hydrophoben, saugenden Materialien kann sich das auftreffende Wasser über das x-fache des Volumens verteilen, das Material wird damit viel weniger nass.

⁴¹ WENDLER, Zur Dauerhaftigkeit (Anm. 23), S. 203, kommt zu den gleichen Schlüssen.

⁴² Unserer Beobachtung nach bilden manche Fassaden mit einer äußeren Wärmeisolationsschicht hier möglicherweise Ausnahmen und können auch ohne direkte Beregnung sichtbar besiedelt werden.

⁴³ Dass diesem an sich logischen Grundsatz nicht immer nachgelebt wurde, zeigt das Beispiel der Altstadt von Bern, wo besonders in den 1980er Jahren reihenweise Nordfassaden hydrophobiert worden sind. Diese Fassaden werden nie von einem Tropfen Regen berührt, da sie durch weit ausladende Dächer und wegen der Enge der Gassen vor Regen geschützt sind. Eine Tatsache, die auch daran hätte erkannt werden können, dass die Fassaden damals großflächig von schwarzen Gipskrusten aus trockener Deposition der Luftverschmutzung überzogen waren, ein untrügliches Zeichen für eine vor Regen geschützte Exposition.

⁴⁴ Zu denken ist hierbei an Wetterfassaden, welche teilweise durch Vordächer, Simse und ähnliches vor Regen geschützt werden und wo die hydrophobierende Maßnahme nicht im Regenschatten halt machen kann (Beispiele im Text).

⁴⁵ Die Möglichkeit, erneut zu hydrophobieren, wird sowohl von AURAS, Reinigung und Steinkonservierung (Anm. 23), S. 715, als auch von WENDLER, Zur Dauerhaftigkeit (Anm. 23), S. 204, genannt, beide erwähnen aber gleichzeitig, dass dieses Nachhydrophobieren ein äußerst heikles Unterfangen ist und nicht klar ist, wie oft eine Wiederholung möglich ist.

⁴⁶ Siehe Beispiel 1.

⁴⁷ WENDLER, Zur Dauerhaftigkeit (Anm. 23), S. 204.

⁴⁸ Zu denken ist hier nicht nur an die Arbeit und das Hydrophobiermittel, sondern auch an die nötigen Gerüstkosten oder andere Kosten für das Zugänglichmachen der Fassaden.

somit nicht einfach auf das gleiche Produkt zurückgegriffen werden. Damit wird aber eine Nachhydrophobierung zu einem schwierig zu lösenden Problem.⁴⁷

Nach unseren Beispielen müssten die Wiederholungen der hydrophobierenden Maßnahmen im Abstand von nur wenigen Jahren erfolgen. Dies ist sicherlich ein finanzielles Problem.⁴⁸ Zudem muss angenommen werden, dass meist gleichzeitig auch ein Biozid eingesetzt würde, um bereits sichtbaren oder vermuteten Befall zu entfernen, was ökologisch zumindest bedenklich erscheint.

In vielen Fällen stellt der beobachtete Bewuchs vor allem ein ästhetisches Problem dar. Wir stellen allerdings fest, dass Objekte deren Äußeres nicht befriedigt, schnell in Ungnade fallen und dass sich hier die Häufigkeit von Maßnahmen stark steigert. Alle nachfolgenden Maßnahmen müssen entweder so gewählt sein, dass sie auch auf hydrophoben Untergründen möglich sind, oder die Fassadenmaterialien müssen bis auf die nicht hydrophoben Schichten zurückgearbeitet werden. Im ersten Fall sind alle rein mineralischen Materialien wie Kalk oder reine Silikatfarben ausgeschlossen. Es müssen also erneut hydrophobe Materialien verwendet werden, was vermutlich ähnliche Folgen haben wird wie diejenigen, welche durch die Maßnahme beseitigt werden sollten. Der zweite Fall bedeutet den Totalverlust der Oberfläche, bis in die Tiefe der nicht mehr Wasser abstoßenden Schichten. Damit beschleunigt aber die Hydrophobierung in vielen Fällen den Zerfall über das Maß hinaus, welches die natürliche Verwitterung gehabt hätte. Hydrophobierungen sollten aber das Objekt erhalten helfen und dürften somit nur da angewendet werden, wo sie tatsächlich dazu führen, dass die Materialien weniger schnell verwittern, als sie dies ohne die Maßnahme tun würden. Andernfalls sind sie zu unterlassen.

Die Anwendung von hydrophoben Materialien oder hydrophobierende Maßnahmen müssen damit an historischen Bauten wohl überlegt werden, denn sie scheinen gerade dort unangenehme Nebenwirkungen zu zeigen, wo die Oberflächen tatsächlich dem Regen ausgesetzt sind. Wo sie nicht dem Regen ausgesetzt sind, zeigen sich offenbar keine entsprechenden Nebenwirkungen. Dort sind die Maßnahmen jedoch von vornherein unnötig und haben zusätzlich den Nachteil, die Materialpalette für zukünftige Maßnahmen einzuschränken.

Summary

Effects of Water-Repellent Treatments on the Conservation and Maintenance of Cultural Heritage. Observations of work practice

The major part of the built historic heritage in central Europe was constructed using inorganic, porous materials, which can take up and transport water in its liquid form by capillarity or in the form of water vapour by diffusion.

Most of the frequently observed forms of deterioration on buildings are correlated in one way or another to the ability of the materials to take up and transport water. Hence for conservation of these materials it was and is frequently considered advantageous to reduce their ability to take up water at places that are exposed to the weather. The methods used most often for such treatments seem to be those which only reduce the uptake of

liquid water, i.e. capillarity, but which do not render the material impermeable for water vapour. These so-called hydrophobic treatments prevent capillarity by making the pore surfaces water-repellent, which makes it impossible for water to wet the inner surfaces of the materials and therefore inhibits capillary transport. As this treatment does not fill the pores, water vapour diffusion through the treated material is still possible.

Depending on the product used for the treatment, the manner of application and the absorptive capacity of the treated material, the water-repellence will be effective at a greater or lesser depth within the material's surface. For Bernese Sandstone the water-repellent effect after treatment usually seems to form in a surface layer of between a half and one centimetre.

During our consultant work we have to deal more and more frequently with buildings which have been treated with water-repellents or where hydrophobic surface coatings were applied in the past and the facades that are exposed the most to rain have become extraordinarily dirty after only a few years; in other cases we deal with the problems which occur when traditional means and methods of repair should be used.

The most commonly used products for hydrophobic treatments lose their effect under the influence of UV light, sometimes only within a few years. In these cases a very thin layer is formed on the surface of the building material which can take up rain water or water from condensation on a cold surface very fast by capillarity. Under examination such a material performs at first sight as if it was never treated because applied water does not form drops which remain on the surface but rather is sucked up and renders the surface visibly moist.

However, as the reduction of the hydrophobic effect is limited to a very thin surface layer of a few tenths of a millimetre it is only this layer which takes up the water. The parts of the material underneath are still water-repellent and can only take up or transport water in the form of vapour, which is a very slow process that only moves water in small amounts. Therefore, in the non-hygroscopic surface layer the water content becomes very high whenever it is hit by rain or affected by water from condensation, and it can only dry out by evaporation of the water into the surrounding air, a comparatively slow process. In porous building materials that are not water-repellent rain or water from condensation will be more or less evenly distributed over a much larger depth, which generally prevents the water content from becoming very high anywhere in the material. The thin and very wet surface layer obviously represents an ideal biotope for micro-organisms, which makes the affected facades look dirty and which in turn leads to frequent treatments. As the water-repellent effect due to the lack of UV light is not measurably reduced at a greater depth in the material every further treatment has to take into consideration the former hydrophobic treatment, unless the water-repellent surface layer is to be replaced completely.

Therefore it can be stated that hydrophobic treatments have quite a large potential to have a negative effect on the conservation of monuments in the long run. Hence such treatments should only be considered if it can be convincingly shown that a reduced water uptake of the materials is necessary for the conservation of a particular monument.

Literaturverzeichnis

- Alois KIESLINGER, Zerstörungen an Steinbauten, Ihre Ursachen und ihre Abwehr, Leipzig, Wien 1932.
- R.J. SCHAFFER, The Weathering of Natural Building Stones, Facsimile of the 1932 edition, published by Construction Research communications Ltd, by permission of Building Research Establishment Ltd., London 1932.
- Francis DE QUERVAIN, Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil I, Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 23. Lieferung, Bern 1945.
- Seymour Z. LEWIN, The preservation of natural stone, 1838–1965, an annotated bibliography, Art and Archaeology Technical Abstracts, 6, 1966, S. 185–277.
- Christine BLÄUER, Verwitterung der Berner Sandsteine, unpublizierte Dissertation, Universität Bern, 1987.
- Wolf-Dieter GRIMM, Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Bd. 50), München 1990.
- Christian FISCHER, Importance des propriétés pétrophysiques et des interactions physico-chimiques dans l'hydrofugation des roches par des silicones, Dissertation, Université Louis Pasteur, Strassburg 1993.
- Eberhard WENDLER, Renate RÜCKERT-THÜMLING, Dietrich KLEMM und Rolf SNETHLAGE, Zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungsmaßnahmen auf Naturstein, Vergleichende Fallbeispiele am Kölner Dom und am Ulmer Münster, in: Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinerfall-Steinkonservierung, Bd. 4, 1992, Berlin 1994, S. 197–204.
- Steffen LAUE, Christine BLÄUER BÖHM und Daniel JEANNETTE, Salt weathering and porosity, examples from the crypt of St. Maria im Kapitol, Cologne, in: 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin 1996, S. 513–522.
- Michael AURAS, Heiner SIEDEL, und Helmut WEBER, Reinigung und Steinkonservierung, in: Natursteinwerk und Umweltschutz in der Denkmalpflege, hg. vom Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V., Wiesbaden, Ulm 1997, S. 684–716.
- Karl Georg BÖTTGER, Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze, Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Berlin 1997.
- Daniel JEANNETTE, Structures de porosité, mécanismes de transfert des solutions et principales altérations des roches des monuments, in: La pietra dei monumenti in ambiente fisico e culturale, Atti del 2° Corso Intensivo Europeo tenuto a Ravello e a Firenze dal 10 al 24 aprile 1994, Bari 1997, S. 49–77.
- Christoph HERM, Stephan PFEFFERKORN und Rolf SNETHLAGE, Historische Verfahren und Handelsmarken in der Steinkonservierung 1840–1940, in: Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Förderprojekt des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1998, S. 9–26.
- Thomas WARSCHIED und Joanna BRAAMS, Biodeterioration of Stone, a Review, International Biodeterioration & Biodegradation, 46, 2000, S. 343–368.
- Bénédictine ROUSSET TOURNIER, Transferts par capillarité et évaporation dans des roches - rôle des structures de porosité. Dissertation Université Louis Pasteur, Strassburg 2001, S. 94, 158 und 159.
- Alison SAWDY, The Kinetics of Salt Weathering of Porous Materials: Stone Monuments and Wall Paintings, PhD thesis, Institut of Archaeology, University College, London 2001.
- Katja STERFLINGER, Monument as Microbial Environment, in: European Commission, Protection and conservation of European cultural heritage. Research report No 14, 2001, S. 147–154.
- Jan CARMELIET, Geert HOUVENAGHEL, Jos van SCHINDEL und Staf ROELS, Moisture Phenomena in Hydrophobic Porous Building Material, Part 1: Measurements and Physical Interpretations, in: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 8. Jahrgang, Heft 2/3, 2002, S. 165–183.
- Sharon CATHER, Assessing Causes and Mechanisms of Detrimental Change to Wall Paintings, in: Conserving the Painted Past: Developing Approaches to Wall Painting Conservation, Post-prints of a conference organised by English Heritage, London 2–4 December 1999, hg. von Robert GOWING und Adrian HERITAGE, London 2003, S. 64–74.
- A. Elena CHAROLA, Water Repellents and other "Protective" Treatments: a Critical Review, in: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 9. Jahrgang, Heft 1, 2003, S. 3–22.
- Christine BLÄUER BÖHM, Ableiten von Konservierungsmaßnahmen aus dem Verwitterungsgeschehen, in: Tagungsbeiträge zu "Mauersalze und Architekturoberflächen", Hochschule für Bildende Künste Dresden, 1.–3.2.2002, hg. von Heinz LEITNER, Steffen LAUE und Heiner SIEDEL, Dresden 2003, S. 84–89.
- M. BRUGNARA, E. DEGASPERI, C. DELLA VOLPE, D. MANIGLIO, A. PENATI, S. SIBONI, L. TONIOLO, T. POLI, S. INVERNIZZI und V. CASTELVETRO, The Application of the Contact Angle in Monument Protection, New Materials and Methods, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Bd. 241, Issues 1–3, 2004, S. 299–312.
- Paul RASCHLE, Mikrobiologische Analytik am Beispiel der Klosterkirche Müstair, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Jg. 18, 2004, Heft 2, S. 311–317.

Abbildungsnachweis

Abb. 1–8, 10–12: Christine Bläuer Böhm, Expert-Center für Denkmalpflege, Zürich; Abb. 9: Hans-Jörg Gerber, Nidau.