

Feuchteschäden und Methoden zu ihrer Beseitigung

Ulrike Henes-Klaiber



■ 1 Schädigung der historischen Bemalung und Putze durch aufsteigende Feuchtigkeit und Salze, die zum Teil aus den neueren Putzen stammen.

Feuchteschäden an Gebäuden können durch Spritzwasser, durch Schlagregenbelastung, durch hygroskopische Feuchtigkeit, für die die Salzbelastung eines Mauerwerks verantwortlich ist, durch falsche Lüftungs- und Heizungsgewohnheiten (Kondenswasserbildung) oder durch kapillar aufsteigende Feuchtigkeit verursacht werden. In vielen Fällen ist nicht nur ein einzelner Mechanismus für die Schäden verantwortlich, sondern mehrere ineinandergreifende Vorgänge.

Viele Feuchteschäden, vor allem an historischen Bauwerken, werden durch kapillar aufsteigende Feuchtigkeit hervorgerufen. Diese Problematik betrifft deshalb insbesondere historische Gebäude, da sie im Gegensatz zu modernen Gebäuden in den meisten Fällen nicht gegen aufsteigende Feuchtigkeit geschützt sind.

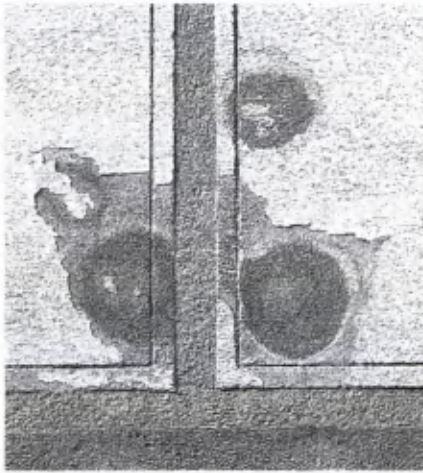
Im Verlauf der letzten Jahrzehnte wurden Verfahren und Materialien entwickelt, mit deren Hilfe man versucht, Gebäude nachträglich im Fundament- und Sockelbereich gegen aufsteigende Feuchtigkeit abzudichten.

Auswirkungen unerwünschter Feuchtigkeit auf Baumaterialien

Feuchtigkeit verursacht Schäden im Mauerwerk durch Herauslösen der Bindemittel aus den Baumaterialien. Ebenso transportiert Feuchtigkeit Salze sowohl ins Mauerwerk hinein (z. B. Chloride aus Streusalz, Nitrate aus anthropogenen Belastungen etc.) als auch innerhalb des Mauerwerks. Kristallisieren diese Salze im Mauerwerk oder Putz aus oder kristallisieren sie um (Hydratation), können sie durch ihren Kristallisationsdruck bzw. Hydratationsdruck historische Baumaterialien und Malereien schädigen oder gar zerstören (Abb. 1).

Bestimmte Salzarten nehmen Feuchtigkeit aus der Luft auf und tragen damit durch ihre sog. Hygroskopizität zur zusätzlichen Feuchtebelastung von Mauerwerk und Putzen mit allen negativen Folgen bei (Abb. 2).

Neben Schädigungen der Baumaterialien durch oben beschriebene Mechanismen können als Folgen von Feuchtigkeit Pilzbefall, Moos- und Al-



■ 2 Auswirkungen hygroskopischer Salze an einer Sgraffito-Malerei.

■ 3 Ein nicht rechtzeitig bemerkter Wasserrohrschaden war Ursache für die ausgeprägte Schimmelbildung an dieser Wand.

■ 4 Ein defekter Dachanschluß ist für den Feuchteschaden an dieser Deckenmalerei verantwortlich.

■ 5 Starke Durchfeuchtungen der Außenwand durch falsch angelegte Fallrohröffnung auf dem Dach der Sakristei.



genbewuchs sowie Schimmelbildung auftreten (Abb. 3), die nicht nur Baumaterialien, sondern auch z. T. die Gesundheit der Bewohner belasten.

Feuchtigkeit bedeutet nicht zuletzt Energieverlust, weil sie die Wärmedämmfähigkeit der Baumaterialien herabsetzt.

Ursachen kapillar aufsteigender Feuchtigkeit

Der Begriff „kapillar aufsteigende Feuchtigkeit“ impliziert häufig die Vorstellung, daß Feuchtigkeit über den Kontakt mit dem umliegenden Boden in den Fundamentbereich eines nicht abgedichteten historischen Gebäudes eindringt und von dort im Porensystem der Baustoffe nach oben steigt. In den wenigsten Fällen sind jedoch gestörte geologische Verhältnisse, ein zu hoher oder geänderter Grundwasserspiegel, Hang- oder Schichtwasser dafür verantwortlich, daß ein Bauwerk durch kapillar aufsteigende Feuchtigkeit belastet wird. Wie sich im folgenden zeigen wird, stammt die Feuchtigkeit meist aus anderen Quellen.

Kapillar aufsteigende Feuchtigkeit ist in den meisten Fällen nicht Ursache, sondern Symptom für die eigentlichen Schadensursachen.

– Die Ursachen für die Schadensproblematik sind in vielen Fällen darauf zurückzuführen, daß *Dächer undicht, Regenrinnen und Fallrohre defekt* oder letztere durch Laub und Moos „nur“ verstopft sind und unkontrolliert überlaufen. Das Regenwasser kann nicht mehr gezielt in den Regen-

wasserkanal geleitet werden. Ähnliche Auswirkungen haben Regenrinnen, die nicht an die Kanalisation angeschlossen sind, sondern in das umgebende Erdreich abgeleitet werden oder deren Anschlüsse an die Kanalisation defekt sind (Abb. 4, 5).

Für Reparatur oder Reinigung wird lange kein Geld investiert, bis die Sanierung dieser völlig unnötigen Schäden später erhebliche Kosten verursacht (Abb. 6).

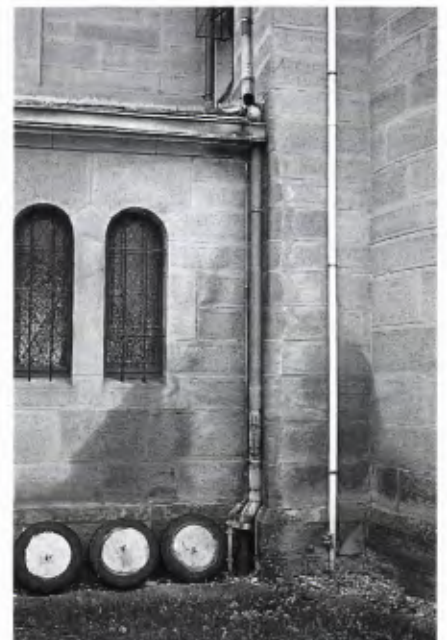
Im Einzelfall ist zu prüfen, ob Gebäude, die bis jetzt noch nicht mit Regenrinnen ausgestattet sind, nachgerüstet werden können.

– Sind *Dränagen* falsch verlegt oder können sie aus technischen Gründen nicht funktionieren (kein Gefälle, falsche Höhenlage des Dränrohrs, durchlässiger Baugrund, keine Sicker- bzw. Dränschicht, zugeschlammtes Dränrohr, weder ein Anschluß an den Kanal noch eine Versickerung vorhanden etc.), dienen sie weniger der Feuchteentlastung als der „Bewässerung“ eines Gebäudes (Abb. 7, 8).

– Gebäude, in deren unmittelbarer Umgebung nachträglich *bauliche Veränderungen* durchgeführt werden, wie z. B. Aufschüttung des Außenniveaus, Einbringen einer Asphaltdecke bis ans Mauerwerk, zeigen generell erhebliche Belastungen durch aufsteigende Feuchtigkeit.

Voruntersuchungen

Besonders schwerwiegende Versäumnisse betrafen und betreffen immer noch den Bereich der Voruntersuchungen. Bevor eines der nach-





■ 6 Die ausgeprägten Schäden an Außenputz und hölzerner Traufe wurden durch ein undichtes Dach verursacht.

folgend beschriebenen Abdichtungsverfahren an einem denkmalgeschützten Bauwerk angewandt wird, ist es unumgänglich, zuerst einmal die wirklichen Ursachen für die Durchfeuchtung zu suchen.

Voraussetzungen

Um die Ursache(n) für Feuchtigkeit und Schäden festzustellen, sind verschiedene Untersuchungen notwendig. Es muß erst einmal überprüft werden, ob die Probleme nicht durch mangelhafte Bauunterhaltung, wie oben beschrieben, verursacht werden.

Falls dies ausgeschlossen werden kann, muß geklärt werden, ob es sich tatsächlich um kapillar aufsteigende Feuchtigkeit handelt, oder ob die Durchfeuchtung hygroskopische Ursachen hat, das heißt, ob sie durch eine Salzbelastung des Mauerwerks verursacht wird.

Zur Klärung dieser Fragen, daher eigentlich zur Klärung der Frage, ob überhaupt eine Abdichtungsmaßnahme notwendig ist, sind Untersuchungen des Gesamtdurchfeuchtungsgrades und des hygroskopischen Durchfeuchtungsgrades der Baumaterialien sowie der Salze und ihrer Konzentrationen unerlässlich.

Dies bedeutet, daß bei jeder Maßnahme, die in die historische Substanz eingreift, vorab erst einmal grundsätzlich überprüft wird, ob sie überhaupt notwendig ist.

Sind die oben beschriebenen Voraussetzungen erfüllt, und soll ein Abdichtungsverfahren (mechanisches Verfahren, Bohrlochinjektionsverfahren etc.) zum Einsatz kommen, sind

Kenntnisse über Wandstärke, Aufbau des Mauerwerks (einschalig / zweischalig; Hohlräume vorhanden / nicht vorhanden) und Art der Baumaterialien unbedingt erforderlich, um Materialverbrauch, Substanzverträglichkeit, Auswirkungen und Erfolg der Maßnahme einschätzen zu können.

Bedauerlicherweise wird heute immer noch in vielen Fällen ohne Hintergrundwissen – allein aufgrund der Optik – der Einsatz solcher Maßnahmen entschieden.

Horizontalabdichtungsverfahren zur Eindämmung kapillar aufsteigender Feuchtigkeit an Baudenkmalen

Im Laufe der Jahre hat man eine breite Palette von *mechanischen, chemischen* und *physikalischen Verfahren* entwickelt, mit deren Hilfe man versucht, Gebäude, die durch kapillar aufsteigende Feuchtigkeit belastet werden, nachträglich horizontal abzudichten und auf Dauer trockenenzulegen.

– *Mechanische Verfahren*, wie zum Beispiel die Mauer säge, sind seit langer Zeit bekannt. So wurden z. B. am Überlinger Münster schon 1913 Außenmauerwerk und Säulen im Sockelbereich durchgesägt und eine mechanische Sperre aus Asphaltpappe, Walzblei und Portlandzement eingebaut. Bereits ein Jahr nach der Fertigstellung wurden wesentliche Fortschritte bezüglich der Austrocknung der Mauern und Säulen dokumentiert. Die Abdichtung ist heute noch vollständig intakt.

– Häufiger als die mechanischen Verfahren werden seit einigen Jahren die

■ 7 Knapp unter die Erdoberfläche verlegtes Dränrohr mit nicht funktionsfähiger Sickerschicht.

■ 8 Um diesem Betonrohr eine Dränwirkung zu geben, wurden zwei kleine Löcher hinein gepickt.





- 9 Für diese horizontale Abdichtung werden glasfaserlamierte Kunststoffplatten (GFK-Platten) verwendet, die in den Sägeschlitz eingeschoben werden
- 10 Stützen der Fuge durch geeignete Kunststoffkeile, um die Standsicherheit nicht zu gefährden.
- 11 Verpressen der Schnitffuge mit einer sulfatbeständigen Zementsuspension, der ein Quellmittel zugegeben wurde.
- 12 Austritt der Sägeblattspitze unterhalb der Lagerfuge.

sogenannten *Bohrlochverfahren* angewendet.

– Als dritte Verfahrensgruppe sind die *elektrokinetischen Verfahren* zu nennen.

Mechanische Verfahren zur nachträglichen Horizontalabdichtung

Es kommen drei verschiedene Verfahren zur Anwendung: Dies sind das *Mauersäge-Verfahren*, das *V-Schnitt-Verfahren* und das *Chromstahlblech-Verfahren*.

– Beim *Mauersäge-Verfahren* wird das Mauerwerk in einer Lagerfuge in kurzen Abschnitten maschinell aufgesägt. Hierzu werden Schwertsägen, Seilsägen oder Kreissägen benutzt, die mit Wasser gekühlt werden müssen. In die Schnittfuge wird abschnittsweise eine mechanische Horizontalsperre eingelegt. Sie kann aus Bleiplatten, Kunststofffolien oder -platten (Polyethylen, glasfaserlamierte Kunststoffe), bitumen- oder kunststoffkaschierten Blechen (Aluminium, Blei) oder rostfreiem Edelstahl bestehen (Abb. 9). Die Platten müssen an den Kanten vollständig überlappen (mindestens 5 cm), um eine funktionsfähige Abdichtung zu gewährleisten. Nach Einlegen der Platten wird die Fuge mit geeigneten Kunststoffkeilen gestützt, um die Standsicherheit des Bauwerks nicht zu gefährden (Abb. 10). Die Schnittfuge wird abschließend mit einer quellmittelhaltigen Zementsuspension verpreßt (Abb. 11), um eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Mauerwerksteilen herstellen zu können.

Mit der Schwertsäge sind heutzutage Schnittiefen bis zu 2 Metern von einer Mauerseite her möglich. Große Schnittiefen können jedoch problematisch sein, da es beim Auftreten von Hohlräumen im Mauerwerk zum Durchhängen des Sägeblatts und damit zum Weglaufen des Sägeschnitts kommen kann (Abb. 12). Die Schwertsäge ist die einzige Säge mit der unter bestimmten Umständen ohne Wasserkühlung, also trocken, gesägt werden kann. Voraussetzungen hierfür sind eine durchgängige Lagerfuge und weiche Baumaterialien. Bei stark feuchte- und salzbelastetem Baumaterial kann dies von sehr großer Bedeutung sein. Denn durch das Kühlwasser gelangt zusätzliche Feuchtigkeit ins Mauerwerk und belastet es. Diese Feuchtigkeit wiederum mobilisiert bereits im Mauerwerk vorhandene Salze, die zu weiteren Schäden führen können.

Größere Wandstärken werden im all-

gemeinen mit der Seilsäge gesägt. Mit dieser Säge ist eine größere Präzision bei der Einhaltung des Sägehorrizonts möglich, da die Seile über Umlenkrollen laufen, die an einem Bauteil verdübelt werden. Die Platzierung der Umlenkrollen ist vor allem bei denkmalgeschützten Gebäuden zu beachten. Die Verdübelung der Rollen im Bereich historischer Befunde (Maleisen, Putze etc.) führt zu irreparablen Schäden! Es ist darauf zu achten, daß entsprechend überlegt und vorsichtig vorgegangen wird. Mit dieser Säge wird naß geschnitten.

Mit der Kreissäge sind Schnittiefen von maximal 50 cm von einer Wandseite her möglich. Auch hier sind nur Naßschnitte möglich.

– Beim *V-Schnitt-Verfahren* wird mit einer Trennscheibe das Mauerwerk von beiden Seiten unabhängig von der Lagerfuge unter einem Winkel von 10° bis 30° aufgeschnitten. Der Schnitt wird bis ca. 3 Zentimeter über die Mittelachse der Wand geführt. Bevor der Schnitt verfüllt wird, werden die Schnittflächen hydrophobiert (mit einem wasserabweisenden Mittel behandelt). In die hydrophobierte Schnittfuge wird ein zementgebundener quellfähiger Vergußmörtel eingefüllt, der eine kraftschlüssige Verbindung mit dem Mauerwerk bildet. Durch seinen geringen Wasserzementwert bildet der Vergußmörtel eine wassersperrende Schicht. Sobald der Mörtel die Festigkeit des umgebenden Mauerwerks erreicht hat, kann die Mauergegenseite geschnitten werden. Der zweite Schlitz wird dann so ausgeführt, daß er den ersten mörtelverfüllten Schlitz kreuzt. So ist sichergestellt, daß die Sperrschicht durchgängig ist.

Dieses Verfahren läßt sich bei größeren Mauerstärken und bei zweischaligem Mauerwerk nicht anwenden.

– Beim *Chromstahlblechverfahren* werden gewellte Edelstahlbleche mit Hilfe von Druckluflämmern maschinell in die Lagerfuge eingetrieben. Damit das Verfahren zur vollständigen Abdichtung führen kann, müssen sich die letzten beiden Wellen der eingesetzten Bleche überlappen.

Dieses Verfahren kann nur an Mauerwerken mit durchgängigen Lagerfugen durchgeführt werden. Es handelt sich um ein Schnellverfahren, das bei Mauerstärken bis ca. 1 Meter angewendet wird. Während des Verfahrens kann es zu Erschütterungen des Bauwerks und damit zu statischen Problemen kommen. Das Einführen der Bleche in den Eckbereichen der Gebäude ist sehr problematisch. Das

Mauerwerk ist auf Chloridbelastungen zu überprüfen, da in diesem Fall bei manchen Stählen Korrosionsprobleme auftreten können.

Beurteilung der mechanischen Verfahren

Von Vorteil bei den mechanischen Verfahren ist, daß die aus dem Fundament aufsteigende kapillare Feuchtigkeit an der Horizontalabdichtung aufgehalten wird, und daß über der mechanischen Sperre eine vollständige horizontale Abdichtung des Mauerwerks erreicht wird.

Mit der Schwertsäge ist es bei geeigneter Lagerfuge und entsprechendem Baumaterial möglich, den Sägeschnitt ohne Wasserspülung durchzuführen und so eine zusätzliche Feuchtebelastung der Wand bzw. eine erneute Mobilisierung der Salze zu vermeiden.

Die Verfahren haben dabei folgende Nachteile:

Da historisches Mauerwerk häufig in Form eines Bruchsteinmauerwerks oder eines zweischaligen Mauerwerks vorliegt, muß mit Erschütterungen und Standsicherheitsproblemen gerechnet werden. Bei schlecht verfülltem zweischaligem Mauerwerk kann es zu einem Nachrutschen des Verfüllmaterials und so zu einem Verschuß des Sägeschnitts kommen.

Nicht in jedem Fall ist es von Vorteil, eine Wand vollständig trocken zu legen, da die Austrocknung des Mauerwerks dazu führt, daß die Salze, die im feuchten Mauerwerk gelöst sind, verstärkt auskristallisieren und dadurch historische Wandmalereien, Putze und Baumaterialien geschädigt werden können. Hier müssen zusätzliche Maßnahmen zur Entsalzung der entsprechenden Bereiche getroffen werden, wie z. B. eine Behandlung mit Kompressen oder Kompressenputzen.

Wenn naß gesägt werden muß, kommt es durch das Spülwasser zu einer zusätzlichen Feuchtebelastung der Wand; Salze können mobilisiert werden.

Auf die Zusammensetzung des Verpreßmaterials ist zu achten! Es muß alkalibeständig und, falls Gips im Mauerwerk vorhanden ist, auch sulfatbeständig sein. Nur dadurch läßt sich verhindern, daß es nach der Verpressung der Fuge zur Bildung von sogenannten Treibmineralien, wie z. B. Ettringit oder Thaumasit, kommt, die durch Volumenvergrößerung und Sprengdruck bei ihrer Bildung zu nachträglichen Substanzschäden führen können.

■ 13 Damaszenerhalle mit Langem See, ca. 1910/1920. Wilhelma, Stuttgart.



Beispiele für Horizontalabdichtungen im Mauersägeverfahren

Im folgenden werden verschiedene Denkmale vorgestellt, an denen das Mauersägeverfahren durchgeführt wurde, wie z. B. an der *Damaszenerhalle der Wilhelma in Stuttgart-Bad Cannstatt (Kreissäge)*, an der *evangelischen Stadtkirche in Ludwigsburg (Seilsäge)* und an der *Kreuzigungsgruppe von Hans Backoffen in Bad Wimpfen (Schwertsäge)*.

– Die Wilhelma in Stuttgart-Bad Cannstatt, ein Kulturdenkmal von besonderer Bedeutung, wurde zwischen 1837 und 1853 von K.-L. von Zanth im maurischen Stil für König Ludwig I. von Württemberg angelegt.

Die sogenannte *Damaszenerhalle*, von der im folgenden die Rede ist, wurde als unterer Zielpunkt der Architekturachse in der Gartenanlage erbaut (Abb. 13). Es handelt sich um einen kleinen, in zweifarbigen Sandsteinmauerwerk ausgeführten Bau mit angehängter Stahl-Glas-Fasanie, der die Kriegszerstörungen und die erste Abbruch- und Erweiterungsphase danach weitgehend unzerstört überstanden hat. Im Innenraum ist reich profiliert und stark farbig differenzierter Stuckmarmor in maurischen Stilformen an Wänden und Decke bis heute gut überliefert.

1987 wurde aufgrund einer optisch feststellbaren starken Durchfeuchtung des Sandsteinmauerwerks und der ausgeprägten Schäden an den Stuckmarmorputzen der Innenwände ein bauchemisches Gutachten in Auftrag gegeben. Das Gutachten diagnostizierte starke Durchfeuchtungen und Versalzungen der Wände.

Die Salzbelastung konnte überwiegend auf die Raubtierhaltung in der Fasanie zurückgeführt werden. Durch die Reinigung der Raubtiergehege wurde ein Teil der Feuchtigkeit in das Gebäude eingebracht. Ein Teil des Feuchteintrags wurde durch kapillar aufsteigende Feuchtigkeit verursacht, die aus einem neben der Halle liegenden undichten Wasserbecken stammte. Da das Wasserbecken nicht abgedichtet werden konnte, mußte auch in Zukunft mit einer dauernden Feuchtebelastung durch kapillar aufsteigende Feuchtigkeit gerechnet werden.

Als Maßnahmen gegen die aufsteigende Feuchtigkeit wurden 1988 die Außenwände der Damaszenerhalle im Mauersägeverfahren mit der Kreissäge aufgesägt und bituminierte Bleiplatten als Horizontalabdichtungsschicht eingebaut. Wegen des an den Innenwänden vorhandenen Stuckmarmors (gipshaltig!) wurde die Schnittfuge mit einer sulfatbeständigen Zementsuspension verpreßt.

Die noch intakten Putz- und Stuckflächen der Innenwände sowie die Malereien wurden mit Hilfe von Kompressen entsalzt. Der Entsalzungsfortschritt wurde chemisch überwacht. In völlig zerstörten Bereichen mußte der Stuckmarmor erneuert werden. Um das Fundamentmauerwerk vor dem Andrang größerer Wassermengen zu schützen, wurde zusätzlich um das Gebäude eine Ringdränage verlegt. Die Restaurierungs- und baulichen Maßnahmen kamen 1992 zum Abschluß.

Kurz nach der Fertigstellung traten – räumlich begrenzt (im Sockelbereich des Durchgangs zur Fasanie) – am Stuckmarmor Schäden in Form von

■ 14 Salzausblühungen und Dunkelfärbung des Stuckmarmors im Sockelbereich durch Feuchtigkeit (im Vordergrund Kugelschreiber als Größenvergleich).



Salzausblühungen und Feuchterändern auf (Abb. 14). Bei einer Nachkontrolle 1997 wurde jedoch festgestellt, daß sich das Schadensbild nicht mehr verändert hatte.

Da das Mauerwerk horizontal isoliert worden war, und an dem Schadensbild innerhalb eines mehrjährigen Zeitraums keine Veränderungen mehr aufgetreten sind, kann man davon ausgehen, daß die Horizontalisolierung intakt und keine kapillar aufsteigende Feuchtigkeit mehr vorhanden ist. Es ist eher anzunehmen, daß das Mauerwerk vor dem Aufbringen des Stuckmarmors eine große Menge an Restfeuchte gespeichert hatte, die dann zu dem vorhandenen Schadensbild geführt hat.

- Auch an der evangelischen Stadtkirche in Ludwigsburg, einem barocken Kirchenbau mit Zwei-Turm-

Fassade, wurde im Rahmen eines Gutachtens ein hoher Versalzungs- und Durchfeuchtungsgrad des Mauerwerks durch kapillar aufsteigende Feuchtigkeit festgestellt. Daraufhin wurde eine Horizontalisolierung von Teilbereichen des Mauerwerks mit Hilfe der Mauersäge vorgesehen. In diesem Fall wurde die Ursache der kapillar aufsteigenden Feuchtigkeit jedoch nicht zweifelsfrei nachgewiesen. Es ist davon auszugehen, daß auch eine weniger aufwendige und weniger kostenintensive Baumaßnahme zu einem befriedigenden Ergebnis geführt hätte.

Die Mauersägearbeiten (Seilsäge, naß) im Bereich der Ostwand und an den Türmen wurden Anfang 1994 abgeschlossen (Abb. 15). Vor Beginn der Mauersägearbeiten wurde das Mauerwerk mit Zementinjektionen stabilisiert. Auf den Innen- und Außenwän-

den wurden als Begleitmaßnahme Sanierputze aufgebracht. Der Fußboden wurde mit einem Zementestrich abgedichtet.

Bei einer Überprüfung Ende Januar 1996 wurde die Stadtkirche in gutem Zustand vorgefunden. Einschränkend ist jedoch dazu zu bemerken, daß am Sockelputz der Westseite Salzränder aufgetreten sind. Diese Salzränder sind auf die Verwendung von Streusalz im Außenbereich zurückzuführen (Abb. 16).

- Die Kreuzigungsgruppe von Hans Backoffen in Bad Wimpfen (Abb. 17) ist eines der seltenen denkmalgeschützten Objekte dieser Art, die seit ihrer Errichtung noch am Originalstandort stehen. Sie stammt vermutlich aus der ersten Hälfte des 16. Jahrhunderts. Der Bau, der zum Schutz der Gruppe errichtet wurde, ist auf das Jahr 1551 datiert.



Die Kreuzigungsgruppe leidet seit Jahren unter extremer Salzbelastung und starker Durchfeuchtung. Dies hat zu empfindlichen Schäden an der wertvollen Figurengruppe aus Weiberner Tuff und der aus braunem Heilbronner Schilfsandstein gearbeiteten Mensa geführt.

Mit Hilfe eines bauphysikalischen/chemischen Gutachtens wurde nachgewiesen, daß die Feuchtigkeit in der Mensa sowie auch in den Figuren und den Kreuzen auf kapillar aufsteigende Feuchtigkeit sowie auf die Anwesenheit hoher Konzentrationen stark hygroskopischer Nitrat- und Sulfatsalze zurückzuführen ist. Da die Kreuzigungsgruppe auf dem Gelände eines ehemaligen Friedhofs steht, ist davon auszugehen, daß die umliegenden Bodenverhältnisse geologisch gestört sind. Dadurch kann es zu unkontrollierbaren Wasserbewegungen bzw. zu Wasserstaus im Boden kommen, die sich belastend auf das Objekt auswirken. Schadensverstärkend kommt hinzu, daß die Gruppe - obwohl sie überdacht ist (Abb. 18) - an ihrem Standort extremen Witterungsverhältnissen ausgesetzt ist. Und zwar führt der Standort der Gruppe in einer Art „Windkanal“ trotz der Öffnung der Gruppe nach Osten und Norden zu Schlagregenbelastung. Zeitweilige starke Sonneneinstrahlung im Winter und damit verbundene Frost-Tau-



■ 15 Anwendung des Mauersägeverfahrens mit einer wassergekühlten Seilsäge. Im Bild ist eine Umlenkrolle mit Seil zu sehen.

■ 16 Feuchte- und Salzränder im Putz, die durch Streusalz hervorgerufen wurden.



■ 17 Kreuzigungsgruppe von Hans Backofen, Bad Wimpfen, Aufnahme um 1886.

■ 18 Kreuzigungsgruppe mit Schutzbau in der Form von 1903, Aufnahme von 1991.



Wechsel führen zusätzlich zu außerordentlichen physikalischen Belastungen.

Um die Feuchtigkeit einzudämmen, die durch hygroskopische Salze verursacht wurde, hat man die Figuren im Frühjahr 1995 abgebaut und mit Kompressen entsalzt. Da es sich um ein ausgesprochen wertvolles Objekt handelt und sich in diesem Fall die Ursache der aufsteigenden Feuchtigkeit nicht beseitigen ließ, wurde die Mensa im Oktober 1995 mit Hilfe des Mauer sägeverfahrens horizontal durchgesägt. Originale Fassungsbe-funde an der Rückwand des Schutzgebäudes schlossen die Verwendung der Seilsäge (Befestigung der Umlen-rollen in der Rückwand) zur Durch-führung der Sägearbeiten aus. Statt dessen verwendete man die Schwert-säge, mit der zudem trocken gesägt werden konnte. So konnte ausge-schlossen werden, daß das hochwer-tige Objekt noch stärker durch Feuch-tigkeit belastet und vorhandene Schadsalze mobilisiert wurden.

Der Sägeschnitt wurde in einer Fuge knapp über dem Gelände angelegt. Der entstandene Sägeschlitz wurde mit Kunststoffkeilen abgestützt und mit glasfaserlaminierter Kunststoff-

Platten (GFK-Platten) isoliert (siehe Abb. 9, 10). So läßt sich für die Zukunft ausschließen, daß Feuchtigkeit aus dem Untergrund in die Mensa ein-dringen und die Kreuzigungsgruppe belasten kann.

Zur kraftschlüssigen Verpressung des Sägeschnitts wurde ein Traßzement unter Zusatz eines Quellmittels ver-wendet. Bei dem Traßzement wurde auf niedrige Alkaligehalte geachtet, um eine zusätzliche Salzbelastung zu vermeiden.

Die hohen Salzkonzentrationen, die in Mensa und Kreuzen nachgewiesen wurden, konnten vor Ort durch das Aufbringen von Kompressen verrin-gert werden. Dem Einfluß der extre-men Witterungsverhältnisse wurde durch Vergrößerung des Dachüber-standes und Anbringen von Regen-rinnen, die an die Kanalisation ange-schlossen wurden, entgegengewirkt. In Zukunft soll die Kreuzigungs-gruppe durch den Einbau eines Winterverschlags (Abschwächen von Kälte- bzw. Wärmespitzen durch Frost bzw. Verhinderung von voller Wär-meeinstrahlung durch niedrigste-hende Sonne im Winter) vor extre-men Temperaturschwankungen ge-schützt werden.

Bohrloch-Injektionsverfahren zur nachträglichen Horizontalabdichtung

Eines der zur Zeit am häufigsten angewendeten Verfahren zur Sanierung von Mauerwerk gegen aufsteigende Feuchtigkeit ist die Horizontalabdichtung mittels Bohrlochinjektionsverfahren.

Zur Abdichtung stehen verschiedene chemische Flüssigsubstanzen zur Auswahl, die mit unterschiedlichen Injektionstechniken ins Mauerwerk eingebracht werden.

Das Mauerwerk wird im Sockel- oder Fundamentbereich mit Bohrlochern versehen und das flüssige Abdichtungsmaterial, je nach Verfahren, drucklos, mit niedrigem oder hohem Druck in die Bohrlöcher eingebracht. Die Abdichtungsflüssigkeit soll sich über Poren und Fugen gleichmäßig im Mauerwerk verteilen, so daß sich eine durchgängige horizontale Sperrschicht bilden kann.

Früher war man allgemein der Ansicht, Bohrlochinjektionsverfahren bedeuteten keinen Eingriff in die Baustanz. Aus diesem Grund wurden die Denkmalschutzbehörden oft nicht von dem bevorstehenden Eingriff in Kenntnis gesetzt. Zudem waren auf Seiten der Bauherrschaft und auch der Denkmalschutzbehörden weder das Problembewußtsein noch genügend chemisches und physikalisches Wissen vorhanden, um Funktionsfähigkeit und Auswirkungen der eingesetzten Substanzen und Injektionstechniken einschätzen zu können.

Zur Technik

Da nach Bohrlochinjektionen immer wieder Probleme oder Schäden auftraten, die auf Fehler in der technischen Ausführung zurückgeführt wurden, gibt es seit einiger Zeit Vorgaben für die Vorbereitung eines Mauerwerks, die in den technischen Merkblättern empfohlen werden. Das Mauerwerk wird mit 1 bis 3 übereinanderliegenden Reihen von Bohrlochern versehen, die im Abstand von 10 bis 12 cm gegeneinander versetzt sind und einen Durchmesser von 18 bis 20 mm haben. Die Bohrlöcher werden in einem Winkel von ca. 15° bis 30° nach unten ins Mauerwerk angelegt, wobei die Bohrlochtiefe der Mauerstärke minus 5 bis 10 cm entspricht (Abb. 19). Da bei einigen der eingesetzten Substanzen damit zu rechnen ist, daß sie sich besser über die Fugen als über die Gesteinsporen verteilen, empfehlen viele Hersteller, in jedem Fall 1 bis 2 Lagerfugen

zu durchbohren. In Abhängigkeit von der Stärke und der Zugänglichkeit des Mauerwerks, wird von einer Mauerseite oder von beiden Seiten injiziert.

Es werden verschiedene *Injektionstechniken* praktiziert, wobei die drucklose Injektion in Gießkannentechnik oder unter Verwendung von Vorratsbehältern angewendet wird. Die Druckinjektion wird mit Hilfe von Packern mit Rückschlagventil oder von perforierten Bohrlochlanzen durchgeführt, die eine gleichmäßigere Verteilung des Drucks innerhalb des Bohrlochs gewährleisten sollen. Man geht bei den Druckinjektionen davon aus, daß die zuvor mit Wasser gefüllten Kapillaren durch Verdrängung mit dem Injektionsmaterial gefüllt werden. Beim Impulsverfahren gibt man die Substanzen stoßweise über Bohrlochlanzen zu, die mit einem Impulsgeber verbunden sind, um den Substanzen Zeit zum Eindringen und Reagieren zu lassen. Die Anzahl der abgegebenen Impulse wird auf die Saugfähigkeit des Mauerwerks abgestimmt.

Seit Jahren gibt es heftige Diskussionen über den Wirkungsgrad einer drucklosen Injektion im Vergleich zu Druckinjektionen. So vertreten verschiedene Autoren (Wacker-Chemie 1991; Hettmann 1993) die Meinung, daß auch im stark durchfeuchteten Mauerwerk eine gute Ausbreitung wassermischbarer Injektionsmittel durch Diffusion möglich ist. Untersuchungen von Honsinger (1992) und Honsinger u. Sasse (1993) dagegen schreiben der Druckinjektion einen höheren Wirkungsgrad zu. Untersuchungen dieser Autoren zeigen, daß bei der Druckinjektion gegenüber der drucklosen Injektion höhere Porenfüllgrade, eine gleichmäßigere Verteilung der Injektionsstoffe auf den Porenwandungen und eine erhebliche Steigerung der Eindringtiefe erzielt werden.

Hier spielt sicher nicht nur der Druck, sondern auch die Dauer der Injektion in Abhängigkeit von Wandstärke und Durchfeuchtungsgrad eines Mauerwerks eine entscheidende Rolle.

Injektionssubstanzen

Es gibt eine Menge verschiedener chemischer Substanzen auf dem Markt, die durch entsprechende Wirkungsmechanismen zur horizontalen Abdichtung des Mauerwerks führen sollen.

Zu den wasserverdünnbaren Systemen gehören die reinen Alkalisilikate (Wassergläser), die Alkalimethyl- und die Propylsilikonate, Gemische aus

Alkaliwasserglas und Methylsilikonat. Siliziumorganische Verbindungen, wie Silane, Siloxane oder Siloxan/Silikon-Gemische, Epoxid-, Polyurethan-, Acryl- und Polyesterharze, sowie Bitumenlösungen werden auf Lösungsmittelbasis angeboten. Paraffin wird in heißem Zustand als Abdichtungsmaterial eingesetzt.

Wirkungsmechanismen

Im Mauerwerk finden bei den genannten Substanzen chemisch-physikalische Reaktionen statt, die die Horizontalabdichtung des Mauerwerks gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit zum Ziel haben.

Je nach eingesetzter Substanz, basiert der Wirkungsmechanismus auf einer Kapillarverstopfung, einer Verengung der Kapillaren oder auf einer Kombinationswirkung von Kapillarverengung und Hydrophobierung (hydrophob = wasserabweisend).

Nähere Angaben über die Zusammensetzung der Produkte findet man im allgemeinen in den technischen Merkblättern, die die Herstellerfirmen zu ihren Produkten herausgeben. Will man eine genauere Deklaration der Zusammensetzung haben, sollte man die zu den Produkten erstellten Sicherheitsdatenblätter anfordern, die ebenfalls von den Herstellerfirmen zu beziehen sind.

– *Alkalisilikate (Wassergläser)*: Früher wurden für die Injektionen vor allem Natriumsilikate verwendet, wogegen heute überwiegend Kaliumsilikate eingesetzt werden.

■ 19 Anlegen der Bohrlöcher für die Bohrlochinjektion im Trockenbohrverfahren. Der Sockel unterhalb der Bohrlöcher wurde zugeputzt, um die Injektionssubstanz am Auslaufen zu hindern. Der Sandsteinsockel (unten im Bild) wurde zum Schutz vor Verschmutzung mit einer Folie abgeklebt.



Die Alkalisilikate scheiden im Kapillarsystem des Baumaterials Kieselgel aus, das im Laufe der Zeit in unlösliche Polykieselsäuren übergeht. Dadurch kommt es zuerst zu einer Verengung bzw. Verstopfung der Kapillaren. Die kapillare Saugfähigkeit des Baustoffs wird vermindert, der Feuchtetransport kommt zum Erliegen und die Trocknung beginnt. Beim weiteren Trocknungsvorgang kommt es zur Entwässerung des Kieselgels, es schrumpft. Durch diesen Schrumpfungsvorgang können sich sogenannte Sekundärkapillaren bilden (Horstschäfer 1975; Wittmann u. Drögsler 1967). Diese wiederum führen zu einer Zunahme der Kapillaraktivität und somit zu einer erneuten Durchfeuchtung des Mauerwerks.

Alkalisilikate brauchen zur Entwicklung ihrer abdichtenden Wirkung Kohlendioxid (CO₂) aus der Luft. Hier zeigen sich ebenfalls Grenzen für dieses Injektionsmaterial. Da historische Gebäude im allgemeinen große Wandstärken aufweisen, in die das Kohlendioxid in einem langwierigen Prozeß erst hinein diffundieren muß, ist bei großen Mauerstärken nur mit einer unvollständigen Umsetzung dieses Injektionsmaterials zu rechnen. Dies wiederum bedeutet, daß es in diesem Fall nicht zu einer vollständigen Abdichtung kommt.

Ein Nachteil besteht auch darin, daß es bei der Umsetzung der Alkalisilikate mit Kohlendioxid zur Bildung von wasserlöslichen Alkalicarbonaten kommt, die als bauschädliche Nebenprodukte zu einer zusätzlichen Salzbelastung und durch ihre Hygrokopizität auch zur zusätzlichen Feuchtebelastung des Mauerwerks führen.

– *Alkalimethylsilikonate*: Auch bei den Silikonaten werden heute ausschließlich die Kaliumverbindungen eingesetzt. Wie die Alkalisilikate brauchen auch die Methylsilikonate zur Umsetzung Kohlendioxid (CO₂). Bei der chemischen Reaktion wird in den Kapillaren Polymethylkieselsäure ausgeschieden, die die Kapillarwandungen mit wasserabweisenden Eigenschaften ausstattet und so die aufsteigende Feuchtigkeit am Durchwandern der getränkten Zone hindert.

Wie bei den Alkalisilikaten bilden sich durch die Aufnahme des Kohlendioxids aus der Luft bei der chemischen Umsetzung Alkalicarbonate als Nebenprodukte, die das Mauerwerk zusätzlich belasten und schädigen können.

Aus den vorher angeführten Gründen (s. o. Alkalisilikate) werden für den

Einsatz dieser Mittel Grenzwerte in bezug auf Mauerstärke (max. 50 cm) und Durchfeuchtungsgrad (max. 50%) empfohlen (z. B. Ahrendt 1994).

– *Alkalipropylsilikonate* (Kaliumpropylsilikonat): Alkalipropylsilikonate benötigen im Gegensatz zu den vorher genannten Methylsilikonaten zur Bildung der Polymethylkieselsäure kein Kohlendioxid. Deshalb fällt bei dieser Wirkstoffgruppe die Einschränkung, sie nur bei geringeren Mauerwerksstärken und niedrigen Durchfeuchtungsgraden einsetzen zu können, weg. Trotzdem sind sie unter den auf dem Markt befindlichen Injektionsmitteln selten zu finden.

Auch hier ist mit der Bildung von bauschädlichen Salzen als unerwünschter Begleiterscheinung zu rechnen.

– *Gemische aus Alkalisilikaten und Alkalimethylsilikonaten*: Der Wirkungsmechanismus dieser Gemische beruht auf einer Kombination von Kapillarverengung und Hydrophobierung. Das Alkalisilikat scheidet im Kapillarsystem Kieselgel aus, wodurch es zu einer Verengung der Kapillaren kommt. Dadurch wird die kapillare Sauggeschwindigkeit vermindert und das Mauerwerk beginnt auszutrocknen (siehe unter Alkalisilikate). Beim weiteren Trocknungsvorgang kommt es auch in diesem Fall zur Entwässerung des zuvor ausgeschiedenen Kieselgels, das dadurch schrumpft. Die Sekundärkapillaren, die sich nun bilden, führen jedoch nicht zu einer erneuten Durchfeuchtung des Mauerwerks, denn nun verhindert die aus dem Alkalimethylsilikonat gebildete Polymethylkieselsäure durch ihre wasserabweisende Wirkung eine erneute Durchfeuchtung des Mauerwerks.

Das Problem der unerwünschten Salzbildung besteht allerdings auch hier.

– *Silikonmikroemulsionskonzentrate* (SMK) sind seit ca. sechs Jahren auf dem Markt. Es handelt sich dabei um Silan/Siloxan-Gemische, die mit Silikontensiden modifiziert sind. Sie können im Gegensatz zu den siliziumorganischen Verbindungen, die auf Lösungsmittelbasis fungieren, mit Wasser verdünnt werden, was aus Gründen des Umweltschutzes und unter gesundheitlichen Aspekten von großem Vorteil ist. Dabei bilden sich besonders feinteilige Mikroemulsionen. Diese wandeln sich in nicht mehr reemulgierbares Polysiloxan um, das die kapillare Saugfähigkeit des Mauerwerks unterbricht, da es im Kapillarsystem seine wasserabweisende Wirkung entfaltet.

Das Einbringen der Silikonmikroemulsion ins Mauerwerk geschieht über eine Mehrstufeninjektion, bei der das Konzentrat in einem bestimmten Verhältnis mit Wasser gemischt und dann als erste Stufe ins Mauerwerk eingebracht wird. Da die Silikonmikroemulsion nur dann reagieren kann, wenn sie in alkalisches Milieu eingebracht wird, muß sie, je nach Alkalität des Mauerwerks in einem zweiten Schritt durch Zugabe eines alkalischen Wirkstoffs (Tränkung des Mauerwerks mit Kalkmilch oder mit Kaliumpropylsilikonat) aktiviert werden. Den zweiten Schritt kann man sich für den Fall sparen, daß vor der Injektion mit Silikonmikroemulsion mit einer Zementsuspension vorverpreßt wurde. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn ein hohlräumiges Mauerwerk vorliegt.

Silikonmikroemulsionen verteilen sich nach Angaben der Hersteller durch Diffusion über die wassergefüllten Poren im Mauerwerk (Wacker-Chemie 1991). Auch wird ihnen die Eigenschaft zugeschrieben, bei hohen Durchfeuchtungsgraden bis hin zur Wassersättigung (gute Eindringtiefe, gute Verteilung) erfolgreich einsetzbar zu sein.

Nach Untersuchungen von Protz u. Friese (1995) ist die Ausbreitung der Emulsion nicht nur vom Durchfeuchtungsgrad abhängig, sondern wird auch vom Porengefüge bestimmt. Bei hohen Durchfeuchtungsgraden ergab sich keine gute Verteilung der Silikonmikroemulsion im Mauerwerk. Aus diesem Grund schlagen die Autoren bei Durchfeuchtungsgraden größer als 50% eine Vortrocknung des Mauerwerks vor. Inzwischen besteht die Meinung, daß zum Erreichen einer guten Verteilung die Silikonmikroemulsion unter Druck oder mit dem Impulsverfahren ins Mauerwerk eingebracht werden sollte (Weber 1997, mündliche Mitteilung). Um eindeutige Aussagen machen zu können, sind auch zu diesen Substanzen weitere Untersuchungen notwendig.

Nach Empfehlungen des Herstellers sollte der Salzgehalt des Mauerwerks in der Injektionszone unter 1% liegen, da die Wirksamkeit des Injektionsmittels bei höheren Salzkonzentrationen eingeschränkt wird.

– *Siliziumorganische Verbindungen* wie z. B. Silane, Siloxane oder Siloxan/Silikon-Gemische haben organische Lösungsmittel als Trägersubstanzen. Sie entwickeln im Mauerwerk eine hydrophobierende Wirkung. Bei Einsatz dieser Verbindungen müssen die Kapillaren wasserfrei bzw. wasser-

arm sein, da die Substanzen sonst nicht in die Kapillaren eindringen können. Zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. eine Vortrocknung des Mauerwerks durch Wärme, sind notwendig, um die Methode mit Erfolg durchführen zu können. Vom Standpunkt der Umweltverträglichkeit aus betrachtet und aus Gründen der Gesundheit, wird inzwischen eher auf wasserlösliche Systeme zurückgegriffen.

Prinzipiell sollten diese Injektionsmittel bei einem Durchfeuchtungsgrad des Mauerwerks von mehr als 50% nicht eingesetzt werden.

– Die Wirkung von *Harz- und Bitumenlösungen* beruht auf einer Verstopfung der Kapillaren. Trägersubstanzen für Harze und Bitumen sind Lösungsmittel.

Probleme bestehen in der gleichmäßigen Verteilung der Harze im Mauerwerk (Weber 1993). Auch besteht die Gefahr, daß die Feuchtigkeit des Mauerwerks ihr Abbinden verhindert.

Epoxidharze z.B. können bei Sichtmauerwerk zu starken Verunreinigungen führen (Abb. 20), die nicht reversibel sind (Kabrede 1995). Mit Acrylatgele wurden in dieser Hinsicht bessere Erfahrungen gemacht. Acrylatgele haben jedoch die Angewohnheit, unter Wasserabgabe zu schrumpfen. Sobald allerdings ein Wasserangebot da ist, sind sie in der Lage, unter Wasseraufnahme wieder zu quellen. Bisher werden sie vor allem zur Abdichtung von Brücken- und Tunnelbauten eingesetzt (Hoeck 1997; Wittemann 1997).

Bitumen kann im Bereich von Sichtmauerwerk ebenfalls zu unerwünschten Verunreinigungen der Oberflächen führen, die durch Reinigen nicht zu entfernen sind. Solche Verunreinigungen können nur steinmetzmäßig entfernt werden.

– Seit einigen Jahren wird auch *Paraffin* zur Abdichtung eingesetzt. Bei normalen Temperaturen liegt es in festem Aggregatzustand vor. Um es zu verflüssigen, muß es vor der Anwendung erhitzt werden.

Bevor das Paraffin ins Mauerwerk injiziert wird, werden Heizstäbe in die Bohrlöcher eingeführt und das Mauerwerk über längere Zeit (8 bis 10 Stunden) aufgeheizt, mit dem Ziel, die in den Poren vorhandene Feuchtigkeit auszutreiben. Nach Entfernen der Heizstäbe wird das Paraffin drucklos bis zur Sättigung ins Mauerwerk eingebracht. Nach dem Abkühlen soll sich nach Firmenaussagen eine 20 cm

starke durchgängige, wasserabweisende Schutzschicht gebildet haben.

Im allgemeinen differieren die Aussagen betreffs der Temperaturen, die zur Aufheizung des Mauerwerks eingesetzt werden, sehr stark. So gibt Dreyer (1991) als Heiztemperaturen für das Mauerwerk 200 bis 250°C an. Bei Untersuchungen von Franke u. Bentrup (1993) zur Funktionsfähigkeit des Verfahrens, wurden an 30 cm starkem Ziegelmauerwerk Temperaturen von 250°C zum Aufheizen eingesetzt. Das Verfahren wurde von den Autoren „als eine wirksame Methode zur Trockenlegung von durchfeuchtetem Mauerwerk bei fachgerechter Durchführung“ bezeichnet. In der Praxis dagegen wird das Mauerwerk nur auf Temperaturen um 150 bzw. 180°C aufgeheizt. Auch die Unterlagen, die die patentinhabende Firma herausgibt, machen bezüglich dieses Punkts keine einheitlichen Aussagen.

Hier sollte einem wichtigen Kriterium Beachtung geschenkt werden: Tests sollten unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt werden. Dies bedeutet, daß eine Untersuchung des Verfahrens nicht nur an hochgebrannten Ziegeln, sondern auch an Baumaterial durchgeführt werden sollte, das häufig in der denkmalpflegerischen Praxis vorliegt, wie z.B. sedimentäres Natursteinmauerwerk. Zudem sollte, neben der Verwendung einheitlicher Temperaturen zum Aufheizen des Mauerwerks, für die Testuntersuchungen – realitätsnah – ein feuchtes oder nasses Mauerwerk verwendet werden. Diesen Vorgaben haben Untersuchungen der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Rechnung getragen. Sie ergaben, daß bei Versuchsmauern, die während des Aufheizvorgangs auf über 200°C und während der Injektion im Wasser standen „eine drucklose Injektion mit siedendem Paraffin... zu keinem Trocknungseffekt führt“ (Hoffmann u. Roß 1992).

Prinzipiell stellt sich die Frage, ob aus einem Mauerwerk größerer Stärke die Feuchtigkeit innerhalb der in der Praxis üblichen Aufheizzeit in genügender Menge ausgetrieben werden kann. In diesem Zusammenhang darf nicht vergessen werden, daß Feuchtigkeit wieder nachgesaugt wird, sobald die Heizstäbe entfernt werden und das Mauerwerk abkühlt. Auch dürften die unterschiedliche Porengeometrie und Porengrößenverteilung in den verschiedenen Baustoffen Auswirkungen auf Aufnahme und Verteilung des Paraffins haben.

Positiv zu werten ist allein die Tatsache, daß es sich bei Paraffin um ein



■ 20 Irreversible Verunreinigungen eines Sandsteinreliefs durch ausgetretenes Epoxidharz.

inertes Material handelt, das nicht zur Bildung sekundärer Produkte führt.

Die Kenntnis, daß keine einheitlichen Ausgangsbedingungen (z. B. unterschiedliche Aufheiztemperaturen etc.) eingesetzt werden bzw. daß in der Praxis an den Objekten andere Parameter angewendet werden als in Tests, die als Nachweis für die Wirksamkeit vorgelegt werden, macht eine objektive Aussage über die Wirksamkeit des Verfahrens schwer.

Verschiedene Beispiele für den Einsatz flüssiger Abdichtungssubstanzen beim Bohrlochinjektionsverfahren

Alkalisilikate kamen zum Einsatz bei der evangelischen Kirche St. Martin in Kirchheim am Ries. Es handelt sich bei diesem Denkmal um einen frühgotischen Kirchenbau, der auf einer römischen Kultstätte errichtet wurde. Beim Bau wurden römische Bauteile verwendet (z. B. römischer Altarstein). Es sind Reste mittelalterlicher freskaler Ausmalung vorhanden.

Da das Gebäude unter aufsteigender Feuchtigkeit litt, wurde in den 80er Jahren eine Sanierung durchgeführt. Der Außenputz wurde damals bis in etwa 2,5 m Höhe abgeschlagen, der Innenputz bis in ca. 1,3 m Höhe. Zur Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit wurde im Sockelbereich des Mauerwerks eine drucklose Bohrlochinjektion mit Alkalisilikaten durchgeführt. Außen- und Innenwand wurden danach einer Salzbehandlung unterzogen und mit einem volldeckenden Spritzbewurf versehen. Auf diesen wurde ein 2-lagiger Traßkalkputz aufgebracht. Nach der Sanierung traten trotz des Einbaus

dieser Horizontalabdichtung ausgeprägte Schäden am Mauerwerk durch Feuchtigkeit und Salze auf, die sich mit der Zeit verstärkten. Dies zeigt, daß die Abdichtung nicht funktionsfähig ist. Es ließ sich außerdem feststellen, daß der volldeckende Spritzbewurf ein Ausdiffundieren der Feuchtigkeit in den unteren Wandbereichen verhinderte. Sie stieg stattdessen über den Neuputz hinaus bis an die Grenze zum historischen Kalkputz, der sehr dampfdiffusionsoffen ist, und führte dort zu einer ausgeprägten Schadenszone (Abb. 1). In dieser Schadenszone wurden unter anderem Salze gefunden, bei denen es sich um Reaktionsprodukte zwischen den alten und den neueren Mörteln handelt (FMPA 1996 b).

Um weitere Schäden an den historischen Materialien zu verhindern, wurden die Neuputze im Sockelbereich der Chorinnenwände entfernt, so daß die Feuchtigkeit ungehindert ausdiffundieren kann und die Wände abtrocknen können.

Als weitere Maßnahmen sind unter anderem eine trockene Abnahme der Salze, die Sicherung der Malschichten und der historischen Mörtel sowie eine Extraktion der Salze in der Schadenszone durch Kompressen vorgesehen.

Die Klosterkirche des Benediktinerklosters in Lorch, ein bedeutendes Denkmal aus staufischer Zeit, hat seit langer Zeit Probleme mit aufsteigender Feuchtigkeit. Hier wurde bereits 1972 an Querschiff und Nordseite der Kirche eine Horizontalabdichtung mit Alkalisilikaten im Bohrlochverfahren durchgeführt. Diese Abdichtungs-

- 21 Feuchteschäden am Putz nach Einsatz einer Bohrlochinjektion mit Alkalisilikaten.
- 22 Heizstäbe zum Aufheizen des Mauerwerks (Paraffinverfahren).
- 23 Schadensfreie Fassade nach Einsatz einer Bitumeninjektion zur Horizontalabdichtung (Kiesstreifen mit Drainage vor dem Gebäude). Kurhaus Bad Boll, Kr. Göppingen.





■ 24 Marienkapelle. Wißgoldingen, Ostalbkreis.

maßnahme blieb jedoch ohne Erfolg, wie an den erneuten Feuchte- und Salzsäuren am Putz zu sehen ist (Abb. 21).

Eine Bohrlochinjektion mit *Paraffin* wurde z.B. beim Alten Rathaus in Göppingen-Faurndau durchgeführt. Hierfür wurde das Sandsteinmauerwerk im Sockelbereich über einen Zeitraum von mehreren Stunden auf etwa 180°C aufgeheizt und das erhitzte flüssige Paraffin drucklos in die Bohrlöcher eingefüllt (Abb. 22). Zur Einschätzung der Feuchtesituation vor Beginn der Maßnahmen wurde nicht der Durchfeuchtungsgrad, sondern nur der absolute Feuchtegehalt des Baumaterials untersucht, so daß keine aussagefähigen Daten über die Feuchtebelastung des Objekts vor Einbringen der Horizontalsperre existieren. Daher läßt sich der Erfolg der Maßnahme in diesem Fall nicht beurteilen.

Viele denkmalgeschützte Gebäude im baden-württembergischen Raum wurden in den letzten 25 Jahren mit *Bitumenlösungen* injiziert. Einige der Denkmale wurden auf ihren heutigen Zustand hin überprüft. Dabei zeigten sich viele in optisch gutem Zustand. Einige der positiven Beispiele sind das Kurhaus in Bad Boll, das 1988/89 abgedichtet wurde (Abb. 23), die Kirche St. Nikolaus in Gundelsheim (1982 Bitumeninjektion), die Kirche St. Dionys in Neckarsulm (1992 Bitumeninjektion) und die Marienkapelle in Waldstetten-Wißgoldingen, die 1989 injiziert wurde (Abb. 24).

An einigen Gebäuden sind nach der Bohrlochinjektion wieder Feuchte-

schäden im Sockelbereich aufgetreten, so z.B. an der St. Michaelskirche in Unterdrackenstein.

Vor der Außeninstandsetzung 1976 waren an der Kirche im Sockelbereich starke Feuchteschäden vorhanden. Erst im Zuge dieser Instandsetzung wurde um die Kirche eine Kanalisation gelegt, an die die Regenabläufe angeschlossen wurden. Eine Drainage wurde nicht eingebaut.

Die Inneninstandsetzung wurde 1978 begonnen. Zum Vorzustand des Kircheninneren liegt ein restauratorisches Gutachten vor, in dem darauf hingewiesen wird, daß „im unteren Sockelbereich an verschiedenen Stellen extreme Feuchtigkeitsschäden mit Moosbildung“ auftreten. Die Instandsetzungsmaßnahmen betrafen Wände und Fußboden. Im Schiff wurde der Putz bis auf 1,50 m Höhe entfernt. Mit Ausnahme des Sockelbereichs, wurde der alte Putz im Chor erhalten. Kirchenschiff und Chor erhielten einen neuen dichten Bodenaufbau (Schotterschicht, Sauberkeitsschicht, PVC-Folie, Betonboden).

1979 wurde im Sockelbereich des Mauerwerks eine Bitumeninjektion von innen und außen durchgeführt. Hohlräume im Mauerwerk wurden von außen zusätzlich mit einer Zementinjektion verfüllt. 1983 wurden seitens der Kirchengemeinde Feuchteflecken und Salzausblühungen reklamiert, die zwischenzeitlich in einigen Wandbereichen aufgetreten waren. Dies führte dazu, daß diese Bereiche nochmals mit Zement und Bitumen injiziert wurden.

■ 25 Durch aufsteigende Feuchtigkeit verursachte Putzschäden über einem dichten Zementputz.





■ 26 Durch aufsteigende Feuchtigkeit verursachte Putzschäden.

Eine Überprüfung durch das Landesdenkmalamt im Jahr 1996 ergab, daß an den Kirchenwänden sowohl innen als auch im Außenbereich wieder Schäden aufgetreten sind, die auf weiterhin aufsteigende Feuchtigkeit hindeuten. Zudem ist die Kirche im Sockelbereich der Außenwände mit einem dichten Zementputz versehen, der mit Sicherheit dazu geführt hat, daß die Feuchtigkeit im Mauerwerk nach oben stieg und oberhalb des Zementputzes zu einer Schadenszone geführt hat (Abb. 25).

Die katholische Kirche St. Mauritius in Oedheim, ist eine im Kern mittelalterliche Kirche, mit einer vollständig erhaltenen Ausmalung des Chores. Sie wurde barock überformt und im 20. Jahrhundert mit einem neuen Seitenschiff versehen. 1981 wurde an der feuchtegeschädigten nördlichen Außenwand dieses Seitenschiffs eine Bitumeninjektion durchgeführt. Bereits relativ kurze Zeit nach der Injektion traten am Innenputz Schäden in Form von Putzabplatzungen, Salzausblühungen und Feuchterändern auf (Abb. 26).

Um den Grund für die erneuten Schäden zu finden, wurden vom Landesdenkmalamt systematische Untersuchungen des Durchfeuchtungsgrades und der Salzbelastung der Baumaterialien der Nordwand veranlaßt. Von besonderem Interesse war die Frage nach der Verteilung des Bitumens in der alten Injektionszone im Sockelmauerwerk der untersuchten Wand. Diese Untersuchungen wurden deshalb durchgeführt, weil eine erneute Renovierung der Kirche, unter anderem des mittelalterlichen Kerns, unter Verwendung der gleichen Abdichtungsmethode geplant war.

Der bei der Untersuchung ermittelte relativ hohe Durchfeuchtungsgrad bestätigte, daß das Abdichtungsverfahren in diesem Fall praktisch unwirksam geblieben ist. Der Grund dafür ergab sich aus der Verteilung des Bitumens im Mauerwerk. Das Bitumen ließ sich im Sockelbereich der Außenwand praktisch nicht nachweisen. Es war offensichtlich, daß die Bitumenlösung über Risse im Mauerwerk in den Untergrund abgeflossen war. Die Eindringtiefe der Bitumenlösung entlang dieser Risse in das Porensystem des Steins (Schilfsandstein) betrug nur wenige Millimeter (FMFA 1996 a).

In der St. Jakobus-Kirche in Herrenberg-Haslach ließ das Landesdenkmalamt im Herbst 1996 den Zustand des Objektes bezüglich seiner Durchfeuchtung und Salzbelastung vor Beginn der Baumaßnahmen überprü-

fen. Die Kirche wurde danach mit Hilfe des Bitumeninjektionsverfahrens trockengelegt. Nach einer längeren Standzeit (Frühjahr 1998) soll nun der Feuchtezustand der Kirche erneut überprüft werden. Dann können Aussagen darüber gemacht werden, wie erfolgreich das Verfahren in diesem Fall war.

Bewertung der Fälle

Die Bewertung der positiv, aber auch der negativ verlaufenen Fälle gestaltet sich aus verschiedenen Gründen schwierig. Zum einen ist der Vorzustand praktisch aller Fälle weder qualitativ noch quantitativ dokumentiert. Zum anderen wurden, mit wenigen Ausnahmen, zusätzlich zur Horizontalabdichtung in allen Fällen, die positiv verlaufen sind, weitere Feuchteschutz- bzw. Begleitmaßnahmen durchgeführt, wie z. B. die Verlegung einer Drainage. In einem Fall wurde sogar zusätzlich das Mauerwerk aufgesägt und eine Isolierschicht eingelegt. Außerdem wurden Reparaturmaßnahmen an Dach, Regenrinnen, Fallrohren etc. durchgeführt oder fehlende Anschlüsse an die Kanalisation hergestellt.

Die Verfahren lassen sich praktisch in keinem Fall sinnvoll bewerten, da man mit den wenigen zur Verfügung stehenden Informationen heute kaum mehr entscheiden kann, wie groß der Einfluß der jeweiligen Injektion im einzelnen Fall auf die eigentliche Trockenlegung war. Hier fehlen wichtige Voruntersuchungen und Informationen, um bewerten zu können, ob das jeweilige Trockenlegungsverfahren bzw. die zur Abdichtung verwendete Substanz letztendlich funktioniert hat.

Versuch einer bautechnischen Qualitätssicherung des Bohrloch-Injektionsverfahrens durch die WTA und den TÜV am Bau

Wie in den vorherigen Kapiteln gezeigt wurde, können beim Einbringen mechanischer Horizontalsperren, vor allem aber bei Bohrlochinjektionen, eine ganze Reihe von Problemen und Unsicherheiten auftreten, die die Wirksamkeit der Produkte beeinträchtigen oder sogar verhindern und im schlimmsten Fall zu Folgeschäden führen können.

Aus diesen Gründen wird von verschiedenen Arbeitskreisen an der Entwicklung qualitätssichernder Maßnahmen gearbeitet, die sich vor allem auf die verfahrenstechnische Seite kon-

zentrieren. Ihre Umsetzung durch die Anwender erfolgt jedoch bis jetzt noch auf freiwilliger Basis.

So können sich ausführende Betriebe, auch im Bereich der Mauerwerks-trockenlegung, freiwillig einer TÜV-Prüfung unterziehen. Dies umfaßt die Überprüfung theoretischer und praktischer Fachkenntnisse im Rahmen eines mehrtägigen Seminars, die Firmenüberprüfung (technische Ausstattung und generelle Eignung) sowie Objekt- und Baustellenüberprüfungen (qualitative Ausführung). Hat die Firma alle Prüfungen erfolgreich bestanden, bekommt sie für den Zeitraum von drei Jahren für ein definiertes Tätigkeitsfeld ein TÜV-Zertifikat ausgehändigt. Sie kann dieses Zertifikat vorzeitig verlieren, wenn sie eine der geforderten Voraussetzungen nicht mehr erfüllt.

Auch die Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) hat sich der Qualitätssicherung verschrieben. Sie weist in ihrem Merkblatt 4-4-96 „Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit“ darauf hin, daß vor Einsatz eines Horizontalabdichtungsverfahrens eine Feuchtebilanz nach dem Stand der Technik erstellt werden sollte. Auch sollten vor Beginn der Arbeiten die Parameter der Injektion durch Probeinjektionen festgelegt werden (Ermittlung des Materialbedarfs etc.).

Obwohl nach dem og. WTA-Merkblatt die Bestimmung des Durchfeuchtungsgrads von entscheidender Wichtigkeit für die Auswahl der Injektionssubstanzen bzw. für deren Eindringverhalten und deren Anwendungsgrenzen bei den entsprechenden Mauerwerken ist, wird im vorliegenden WTA-Merkblatt leider nur auf die verfahrenstechnische Seite der Bohrlochinjektionen näher eingegangen.

Eine eindeutigere Beurteilung der verschiedenen Injektionssubstanzen betreffs Eignung und Wirksamkeit bei entsprechenden Feuchtegehalten und Salzbelastungen der Baumaterialien wäre wünschenswert, da es sich um Substanzen mit zum Teil sehr unterschiedlichem Chemismus und chemisch-physikalischem Verhalten handelt. Dies kommt im Merkblatt jedoch zu kurz.

Es besteht für den Anwender nun die Möglichkeit, eine Substanz auszuwählen, die in ihrer Wirksamkeit durch Prüfzeugnisse belegt ist (Näheres dazu läßt sich im nachfolgenden Kapitel erfahren).

Prüfzeugnisse und Qualitätsgutachten flüssiger Abdichtungssubstanzen

Zum Nachweis für die Wirksamkeit ihrer Produkte lassen viele Hersteller von unabhängigen Prüfungsinstanzen, wie z. B. den Materialprüfungsanstalten des Bundes und der Länder, Eignungs- und Wirksamkeitsprüfungen an ihren Produkten durchführen und Prüfzeugnisse erstellen. So auch bei Substanzen, die der Horizontalabdichtung von Mauerwerk dienen.

Einen standardisierten Nachweis für die Wirksamkeit dieser Produkte gibt es aber bis jetzt noch nicht. Die Prüfkriterien werden zum Teil noch von den Produktherstellern vorgegeben und werden dadurch zwangsläufig uneinheitlich.

Bei den von den Prüfungsstellen durchgeführten Tests sollten die Prüfkriterien zumindest den natürlichen Bedingungen am Bauwerk entsprechen, was aber häufig nicht der Fall ist.

Unter natürlichen Bedingungen liegt ein Mauerwerk vor, das jahre- bis jahrzehntelang durchfeuchtet wurde und deshalb zum Zeitpunkt der Injektion feucht bis naß ist. Bei den Substanzprüfungen wird dieses Kriterium häufig außer acht gelassen.

1. In vielen Fällen wird das Dichtungsmaterial bei den Substanzprüfungen in einen trockenen Probekörper injiziert und der Probekörper erst nach der Injektion mit Wasser beaufschlagt.

Dies ist ein ganz wichtiges, nicht zu unterschätzendes Kriterium, denn gerade bei Injektionen in feuchtes oder nasses Mauerwerk kommt es häufig zu Beeinträchtigungen der Funktionsfähigkeit der Substanzen!

Es entsteht unter Umständen das Problem, daß das Injektionsmaterial das Wasser aus den Poren verdrängen muß, bzw. daß die im Baumaterial vorhandene Feuchtigkeit die Reaktion des Injektionsmaterials verhindert.

2. Es liegen aber auch Untersuchungen vor, in deren Rahmen in einen vorgehäuteten Probekörper injiziert wurde. Zur Durchführung der begleitenden Feuchtemessungen wurde der Probekörper jedoch aus dem Wasser herausgenommen, so daß er zwischenzeitlich abtrocknen konnte. Dadurch hatte das Injektionsmaterial die Möglichkeit „nachzureagieren“.

Diese Möglichkeit steht dem Gebäude in der Praxis ebenfalls nicht zur Verfügung.

Die Kritik an der Vorgehensweise bei Substanztests ist sicher nicht an den „Haaren herbeigezogen“. So haben Zwischenergebnisse von Tests über die Wirksamkeit verschiedener Injektionsmittel an feuchtem Ziegelmauerwerk, die im Rahmen eines Projektes des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) erzielt wurden, bestätigt, daß die Feuchtemessungen vor Ort keinen nennenswerten Trocknungserfolg ergeben hatten, weil durch die hohen Feuchtegehalte des Mauerwerks die Reaktion der Mittel verhindert wurde.

Im Labor hatten die Injektionssubstanzen allerdings zum Erfolg geführt, da das injizierte Baumaterial unter Laborbedingungen austrocknen konnte, und die Substanzen quasi „nachreagieren“ konnten.

Die Untersuchung kam deshalb zu dem Schluß, daß herkömmliche Injektionsmittel bei einem Durchfeuchtungsgrad, der höher als 50% ist, nicht angewendet werden sollten (Ahrendt 1994).

Dies zeigt, daß es dringend notwendig ist, die abdichtende Wirkung dieser Substanzen unter *praxisnahen, realistischen Prüfungsbedingungen* zu testen und unter diesen Bedingungen den Nachweis für ihre Wirksamkeit zu erbringen.

Elektrokinetische Verfahren zur Entfeuchtung von Mauerwerk

Passive und aktive Elektroosmose

Bereits seit einigen Jahrzehnten versucht man das Prinzip der Elektroosmose zur Entfeuchtung von Mauerwerk anzuwenden, das durch aufsteigende Feuchtigkeit belastet ist. Elektrokinetische Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung sind aber bis heute aus verschiedenen Gründen heftig umstritten.

Elektrophysikalische Verfahren zielen darauf ab, das elektrische Potential, das durch die Fließbewegung des Wassers in den Kapillaren entsteht, abzubauen bzw. ein entgegengesetztes stärkeres Potential aufzubauen, um so den Kapillaraufstieg des Wassers ins Mauerwerk zu bremsen bzw. die Fließrichtung des Wassers umzukehren und so das Mauerwerk trockenzulegen (Lohmeyer 1992). Die Richtung der elektroosmotischen Flüssigkeitsströmung folgt einer empirisch gefundenen Regel, nach der sich die Phase mit der höheren Dielektrizitätskonstanten positiv auflädt. Da Wasser eine sehr hohe Dielektrizitätskonstante besitzt, wandern wäßrige

Lösungen in der Regel zur negativen Elektrode.

Auf detaillierte physikalische Erklärungen des Verfahrens wird hier verzichtet, da dies den Rahmen dieses Artikels sprengen würde.

Man unterscheidet zwischen passiver und aktiver Elektroosmose. Bei den *passiven Verfahren* (Erdungsverfahren, galvanische Verfahren, Ladungskompensationsverfahren) wird auf das Anlegen einer Fremdspannung verzichtet. Entweder wird das natürliche Mauerwerkspotential ausgenutzt oder es werden Elektroden aus unterschiedlichen chemischen Elementen verwendet. Entsprechend der Lage dieser Elemente in der elektrochemischen Spannungsreihe, kommt es nach dem Prinzip des galvanischen Elements zu einer Spannungsdifferenz.

Passive Anlagen sind nicht sehr erfolgversprechend, weil die erzeugten Spannungen so niedrig sind, daß kein gerichteter Feuchtetransport möglich ist, und ihre Funktion durch viele Fremdeinflüsse gestört wird, wie durch Blitzableiter, Metallrohre, Elektrokabel etc.

Zur Schaffung *aktiver elektroosmotischer Anlagen* werden in das Mauerwerk, das trockengelegt werden soll, in gleicher Höhe Kabel-, Band-, Stab- oder Gitternetzelektroden aus Metall oder leitfähigem Kunststoff eingebaut, die als Anoden (positiv geladene Elektroden) fungieren.

Werden Stabelektroden eingebaut, müssen im Mauerwerk Löcher mit einer Größe von etwa 20 x 20 x 20 cm angelegt werden. Werden Kabel-, Band- oder Gitternetzelektroden verwendet, muß der Putz entfernt, ein Schlitz im Mauerwerk angelegt und die Elektroden entweder im Schlitz eingemörtelt oder auf der Mauerwerksoberfläche vermörtelt werden. Die Kathode (negative Elektrode) wird in der Nähe des Mauerwerks in den Boden versenkt.

An dieses Elektrodensystem wird eine Gleichspannung angelegt. Um eine merkliche Feuchtebewegung im Mauerwerk zu erreichen, muß die angelegte Spannung sehr hoch sein (40 bis 60 V). Dadurch wird ein elektrisches Feld erzeugt, in dem die Feuchtigkeit zur Kathode wandert, aber gleichzeitig eine Wanderung der im Porenwasser des Mauerwerks vorhandenen Salze zu der / den Anode(n) einsetzt. Das Verfahren wird deshalb auch in Form des sogenannten AET-Verfahrens (AET = Aktive Entsalzung und Trocknung) zur Entsalzung des Mauerwerks angeboten.

Im Laufe der Zeit korrodieren die Elektroden durch die sich an ihnen anlagernden Salze bzw. treten außer Funktion und müssen ausgetauscht werden (Ahrendt u. Demberger 1988).

Elektroosmotische Vorgänge im Mauerwerk sind kaum unter Kontrolle zu halten, da sie von sehr vielen Faktoren abhängig sind. Im folgenden sollen nur einige Faktoren genannt werden, die stimmig sein müssen, damit die elektroosmotische Entfeuchtung einen gewissen Erfolg zeigt.

- Die Elektroden sollten korrosionsbeständig sein und vor allem korrosionsbeständige Anschlüsse haben.

- In den Kapillaren des Mauerwerks muß ausreichend Feuchtigkeit vorhanden sein.

- Die Ionenkonzentration der Porenflüssigkeit sollte bekannt und muß relativ niedrig sein, so daß ein Zetapotential aufgebaut werden kann. Vom Vorhandensein des Zetapotentials (der Zetapotentiale) hängt es ab, ob eine elektroosmotische Trocknung möglich ist (Friese 1984; Hettmann 1993). Dies ist ein sehr kritischer Punkt, da bekannt ist, daß die Feuchtegehalte und Salzkonzentrationen innerhalb eines Mauerwerks auf kürzesten Distanzen sehr stark variieren. Deshalb müssen Anzahl und Anordnung der Elektroden darauf und auf die Wandstärke abgestimmt sein.

- Die an die Elektroden angelegte Betriebsspannung sollte über 20 Volt betragen; im Mauerwerk müssen ein ausreichender Stromfluß und eine homogene Stromdichte (zeitlich und räumlich konstanter Stromzufluß) gewährleistet sein.

- Fremdbeeinflussung durch elektrisch leitende Teile im Mauerwerk und elektrische Felder müssen ausgeschlossen werden können. Auch bei natürlichem Kalksteinmauerwerk funktioniert das Verfahren nicht (Friese 1988).

- Durch die Wanderung der Ionen ändern sich die Salzkonzentrationen im Mauerwerk. Dies führt zu einer Veränderung des Stromflusses. Um den Betrieb der Anlage aufrechtzuerhalten, muß die Spannung deshalb ständig nachgeregelt werden.

Die vorher genannten Punkte zeigen, daß die Voraussetzung für die Anwendung dieser Art der Entfeuchtung flächendeckende Voruntersuchungen und die Durchführung einer umfassenden Vorarbeit sind. Durch die vielen Randbedingungen, die zu beachten sind, ist das Verfahren mit relativ vielen Unsicherheiten behaftet.

Untersuchungen, die im Rahmen eines Projekts des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) durchgeführt wurden, haben gezeigt, daß es z.B. mit Hilfe einer AET-Anlage prinzipiell möglich ist, in einem Mauerwerk Transportvorgänge in Gang zu setzen, die zur Entsalzung und zur mäßigen Entfeuchtung des Mauerwerks führen können (Wiesen 1992).

Trotzdem muß vom Einsatz elektroosmotischer Anlagen an denkmalgeschützten Objekten zum gegenwärtigen Zeitpunkt abgeraten werden, da konkret festgestellt wurde, daß

- es zu unkontrolliertem Salztransport in nicht belastete Bereiche kommen kann, was besonders in der Nähe von Fresken und Originalputzen zu Problemen führt;

- beim Betrieb der Anlage stark korrosive gasförmige Verbindungen entstehen;

- beim Einbau der Elektroden mit einem starken Verlust an historischer Substanz gerechnet werden muß;

- es zu einer Wanderung der Salze zu den Elektroden kommt. Dort werden sie in Behältern aufgefangen, damit sie nicht das umliegende Mauerwerk kontaminieren. Die Behälter müssen regelmäßig entleert werden. Es ist also ein gewisser Wartungsaufwand notwendig, der, wenn er nicht eingehalten, zu Schäden an der Bausubstanz führen kann.

- eine wirkliche Effektivität des Verfahrens bis jetzt noch nicht nachgewiesen werden konnte.

- Zudem sollte man sich vor Augen halten, daß die Transportvorgänge nur solange von statten gehen können, solange die Anlage in Betrieb ist. Die eigentliche Ursache wird dadurch nicht behoben.

Resümee

Feuchtigkeit im Mauerwerk kann eine Vielzahl von Schäden verursachen. Am Beispiel der kapillar aufsteigenden Feuchtigkeit läßt sich zeigen, daß in vielen Fällen Ursachen zur Durchfeuchtung führen, die auf mangelhafte Bauunterhaltung zurückzuführen sind und die durch bessere Wartung und Pflege der Gebäude zu vermeiden wären.

Zumeist ohne Klärung der Ursachen werden aufwendige und zum Teil unnötige Verfahren angewendet. Diese Verfahren werden aber fast immer mit einer konventionellen Sanie-

rungsmaßnahme kombiniert, die oft zur Behebung der Schadensursache ausgereicht hätte. Der Erfolg wird jedoch in vielen Fällen ohne Beweis der aufwendigeren, teuren Maßnahme zugeschrieben.

Deshalb sollte in Zukunft verstärkt darauf geachtet werden, daß durch eine intensive Überprüfung geklärt wird, wo die eigentlichen Ursachen des Problems liegen.

Unabhängig davon, ob ein mechanisches Verfahren eingesetzt wird, das vergleichsweise intensiv in die historische Substanz eingreift, oder ein Bohrlochverfahren, sollte durch Voruntersuchungen abgesichert werden, daß das Verfahren sinnvoll, materialverträglich und notwendig ist.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist von der Anwendung elektroosmotischer Verfahren an denkmalgeschützten Gebäuden abzuraten.

Mauersägeverfahren sind aufwendig und greifen erheblich in die Substanz ein.

Bei den verschiedenen Bohrlochverfahren werden unterschiedliche Flüssigsubstanzen zur Abdichtung ins Mauerwerk eingebracht. Bislang gibt es jedoch zu wenig Nachweise für die Wirksamkeit dieser Substanzen. Einfache Referenzlisten genügen nicht. Standardisierte Prüfverfahren existieren bis jetzt nicht und sollten dringend eingeführt werden.

Insgesamt zeigt sich in vielen Fällen, daß nach Behebung der eigentlichen Ursachen für die Feuchtigkeit mit harmloseren Methoden, wie z.B. dem Einbau einer Drainage oder einem Sanierputzauftrag, Effekte zu erzielen sind, die unter Umständen einen länger andauernden und kostengünstigeren Erfolg erbringen.

Gutachten- und Literaturverzeichnis:

Ahrendt, C. u. Demberger, L.: Standzeiten und Leistungsfähigkeit von bauüblichen Elektroden zur Trockenlegung feuchten Mauerwerks. Bautenschutz und Bausanierung 11, 1988, S. 178-183.

Ahrendt, C.: Neue Erkenntnisse in der Mauerwerkstrockenlegung. Bautenschutz und Bausanierung 2 (1994), S. 69-74.

Dreyer, J.: Thermisch stimulierte Injektion von feuchtegeschädigten Wänden mittels Paraffin. Bautenschutz und Bausanierung 6 (1991), S. 22-28.

FMPA (Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg), Abteilung 3, Referat 32: Oedheim, St. Mauritius, hier: Untersuchung einer nachträglich eingebauten Horizontalsperre mit Bitumeninjektage. Untersu-

- chungsbericht vom 22. 07. 1996 (1996 a). FMPA (Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg), Abteilung 3, Referat 32: Martinskapelle Kirchheim/Ries, hier: Untersuchungen von Ausblühungen und Salzeffekten an der Chorinnenwand. Untersuchungsbericht vom 08. 08. 1996 (1996 b).
- Franke, L. u. Bentrup, H.: Paraffininjektionsverfahren zur Trockenlegung von Mauerwerk – Beurteilung der Wirksamkeit. *Bautenschutz und Bausanierung* 16 (1993), S. 5–8.
- Friese, P.: Elektrochemische Entsalzung von Mauerwerk, Teil I: Notwendigkeit und theoretische Grundlagen. *Bauphysik* 3 (1984), S. 94–97.
- Friese, P.: Ein neues Verfahren zur Sanierung salzverseuchter Wände mit aufsteigender Feuchtigkeit. *Bautenschutz und Bausanierung* 11 (1988), S. 122–127.
- Hettmann, D.: Zur Beeinflussung des Feuchte- und Salzgehaltes in Mauerwerk. *Bautenschutz und Bausanierung* 16 (1993), S. 72–75.
- Hoeck, T.: Abdichten einer Unterführung durch Vergelungsinjektion. *Bautenschutz und Bausanierung* 3 (1997), S. 32–37.
- Hoffmann, D. u. Rooß, H.: Versuche zur Wirksamkeit von Paraffininjektionen für die nachträgliche Trockenlegung von Mauerwerk. *Bautenschutz und Bausanierung* 15 (1992), S. 81–83.
- Honsinger, D.: Feuchtereduzierung von kapillar durchfeuchtetem Mauerwerk durch Bohrlochinjektion, Teil 2. *Bautenschutz und Bausanierung* 15 (1992), S. 75–78.
- Honsinger, D. u. Sasse, H.-R.: Materialauswahl für feuchtereduzierende Maßnahmen am Mauerwerk: Stoffe und ihre Eignung. *Werkstoffwissenschaften und Bausanierung*, Teil 2 (1993), S. 1336–1354.
- Horstschäfer, H.-J.: Verkieselung, Erfahrungen mit Wasserglas – insbesondere im Baubereich. *Das Baugewerbe* 12 (1975), S. 14–15.
- Kabrede, H.-A.: Abdichtung der Krypta Markuskirche – eine gelungene Sache oder ein Flop? *Bautenschutz und Bausanierung* 8 (1995), S. 14–15.
- Lohmeyer, G.: *Praktische Bauphysik*. Stuttgart 1992. S. 192.
- Protz, A. u. Friese, P.: Zur Verteilung von Sili-
- konmikroemulsionen in porösen Baustoffen. *Bautenschutz und Bausanierung* 2 (1995), S. 42–46.
- Reul, H.: *Handbuch Bautenschutz, Bausanierung: Leitfaden für die Sanierungsbranche*. Köln 1990, 264 S.
- Wacker-Chemie GmbH: *Silicon-Microemulsionen für die Mauertrockenlegung*. Technisches Merkblatt 4912.7 (1991).
- Weber, H.: Instandsetzung von feuchte- und salzgeschädigtem Mauerwerk. In: *Werkstoffwissenschaften und Bausanierung*, Teil 2 (1993), Hrsg. F. H. Wittmann; *Kontakt und Studium*, Bd. 420, S. 1296–1324.
- Weber, H.: mündliche Mitteilung, 8. Hanseatische Sanierungstage, Kühlungsborn, 1997.
- Wiesen, H.: Möglichkeiten zur elektrophysikalischen Entfeuchtung und Entsalzung eines Ziegelmauerwerks durch das AET-Verfahren. In: *7. Münchener Sanierungstage: Seminar Trockenlegung feuchter Wände und Salzsanierung*. Veranstaltung des TÜV Bayern, München 1992.
- Wittemann, B.: Acrylatgel – eine neue Möglichkeit für nachträgliche Bauwerksabdichtungen. *FAS-Schriftenreihe Heft 8: Bautenschutzmittel* (1997), S. 110–115.
- Wittmann, W. u. Drögsler, O.: *Mauerfeuchtigkeit, Ursachen – Auswirkungen – Trockenlegung*. Heidelberg 1967. S. 113.
- Wittmann, F. H.: Kann das Prinzip der Elektroosmose zur Trockenlegung von Mauerwerk angewendet werden? *Bautenschutz und Bausanierung* 4 (1981), S. 126–132.
- Wolko, F., Venzmer, H. u. Grün, M.: Untersuchung zur Effizienz elektrokinetischer Verfahren zur Trocknung und Entsalzung, dargestellt am Beispiel einer AET-Anlage im Kloster und in der Kirche in Zarentin/Mecklenburg-Vorpommern. In: *Werkstoffwissenschaften und Bausanierung*, Teil 3 (1993), Hrsg. F. H. Wittmann; *Kontakt und Studium*, Bd. 420, S. 1808–1817.

Dr. Ulrike Henes-Klaiber
LDA · Restaurierung
Silberburgstraße 123–125
70176 Stuttgart